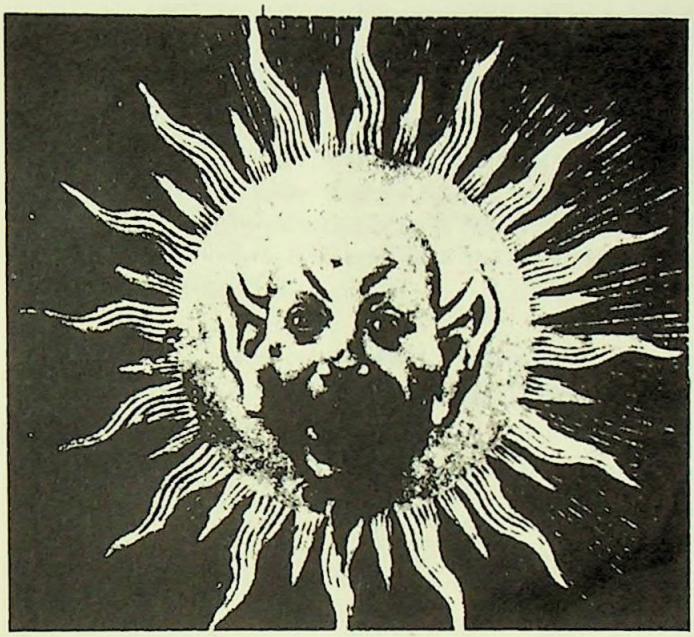
Projet Alter



Esquisse d'un régime à long terme tout SOLAIRE

SYROS

SOMMAIRE[1]

Chapitre I

INTRODUCTION

I.1. Motivation.
I.2. Démarche.
I.3. Présentation résumée du régime à long terme.
I.4. Commentaires.

Chapitre II

GENERALITES SUR L'ENERGIE ET LES BILANS ENERGETIQUES

II.1. Préliminaire.
II.2. Classification des formes d'énergie.
II.3. Classification des secteurs d'utilisation et d'approvisionnement.
II.4. Unités de mesure.
II.5. Bilans d'approvisionnement-distribution.
II.6. Bilans d'utilisation finale.

Chapitre III

CATALOGUE DE TECHNIQUES DE CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE

III.1. Généralités.
III.2. Chauffage des locaux, eau chaude, cuisine.
III.3. Production de la chaleur industrielle.
III.4. Production de combustibles et carburants.
III.5. Production d'électricité.
III.6. Autres filières.

Chapitre IV

EVALUATION DES BESOINS ENERGETIQUES DE LA FRANCE DANS UNE PERSPECTIVE A LONG TERME

IV.1. Préliminaire : Demande et besoins.
IV.2. Evaluation des besoins énergétiques directs de la population.
IV.3. Evaluation des besoins énergétiques de l'agriculture, de l'industrie et des transports de marchandises.

Chapitre V

PRESENTATION DU REGIME A LONG TERME

V.1. Préliminaire : Prévision et anticipation.
V.2. Bilans.
V.3. Analyse du bloc UTILISATION.
V.4. Analyse du bloc PRODUCTION.
V.5. Régulation du système électrique.
V.6. Commentaires et variantes.

Annexe

EBAUCHE D'UN SCENARIO DE TRANSITION

A.1. Préliminaire.
A.2. Tableau diachronique.
A.3. Traits principaux du scénario.
A.4. Quelques évaluations.

* *
*

Le Groupe de Bellevue est constitué de chercheurs de divers horizons, Centre National de la Recherche Scientifique, Collège de France, Electricité De France, Institut National de la Recherche Agronomique, impliqués professionnellement dans les recherches sur les énergies renouvelables.

Frappé par la timidité de la prospective énergétique actuellement disponible pour la France, ce groupe a naïvement entrepris, avec les moyens du bord, l'étude d'un scénario énergétique axé sur le potentiel renouvelable.

Le Groupe de Bellevue.

correspondance : 85 Boulevard de Port Royal
75013 PARIS

Diffusion : Editions SYROS, 9 Rue Borromée 75015
CCP PARIS 19 706 28 T (15 Francs + 3.50 port).

(1) On trouvera en bas de chaque page l'indication du ou des paragraphes ou alinéas qu'elle contient.

Chapitre I
INTRODUCTION

I.1. Motivation

(a) Ce texte constitue le premier résultat d'un travail qui a pour but d'évaluer ce que peut être pour la France un avenir énergétique axé, à long terme, sur l'énergie solaire et ne faisant pas ou très peu (et seulement à court terme) appel à l'énergie nucléaire. Comme réponse à la pénurie de combustibles fossiles, on envisage :

* A court et moyen terme (1975-2000) une stabilisation progressive des consommations[1] et une réorganisation "à l'économie" de l'activité du pays plutôt qu'un appel massif à l'électricité nucléaire de fission par neutrons lents.

* A long terme (2000-2050) un passage progressif du régime basé sur les combustibles fossiles à un régime stable d'auto-subsistance énergétique exclusivement basé sur le gisement renouvelable que constitue l'énergie solaire sous toutes ses formes. En particulier, vu la richesse forestière et agricole de la France, la conversion par les plantes y joue un rôle déterminant ; on ne fait appel ni à la fission par neutrons rapides, ni à l'hypothétique fusion thermonucléaire.

(b) On ne cherche ici ni à motiver, ni à situer politiquement l'option non nucléaire retenue : elle constitue un point de départ de l'étude. Cependant, parmi les facteurs susceptibles d'empêcher le développement du système nucléaire, on retient tout particulièrement :

* d'une part les difficultés techniques et politiques qui accompagnent le cycle du plutonium indispensable au surrégénérateur,

* d'autre part la psychose anti-nucléaire qui se traduit par l'absence d'un consensus de la population et peut entrainer un blocage socio-politique dans le cas d'un grand "accident de référence".

En fait, on cherche plutôt à réduire l'autre psychose : celle selon laquelle un arrêt du développement nucléaire provoquerait nécessairement à terme une pénurie dramatique, pénurie qui concernerait en premier lieu les classes sociales aujourd'hui défavorisées[2] et ruinerait l'économie du pays.

On explicite la démarche du travail au § I.2. ; le § I.3. contient un résumé de son contenu technique ; enfin le § I.4. contient quelques commentaires.

I.2. Démarche

(a) On remet nettement en cause l'impératif catégorique de croissance industrielle qui règne sur l'économie depuis deux siècles et on le remplace par un impératif de stabilisation de l'activité productrice (et de la population) du microcosme humain[3]. On valorise ainsi la perspective d'un équilibre post-industriel stable de l'écosystème planétaire ; équilibre économisant les ressources non renouvelables et limitant les perturbations causées à la bio-sphère par l'homme.

(1) Cette stabilisation est déjà entrée dans les faits : la consommation de 1977 n'a pas dépassé celle de 1973.

(2) Voir à ce sujet I.3.b.

(3) Impératif sans doute plus pressant pour les pays industrialisés que pour le tiers monde ; mais, d'une part on s'intéresse ici essentiellement à la France, d'autre part on récuse le sophisme consistant à justifier la poursuite de la croissance en occident par le besoin de développement du tiers monde (Voir I.4.a. ci-après).

(b) Pour prospecter l'avenir dans l'esprit précédent, la démarche de *prévision par extrapolation du passé récent* est inopérante puisque ce passé a été justement marqué par la croissance industrielle narcissique et, récemment, par l'accélération nucléaire ; développement de l'énergie nucléaire et poursuite de cette croissance sont en fait étroitement liés, à la fois par les mécanismes de la grande industrie internationale et par le mythe du progrès-providence.

On procède donc par anticipation selon la démarche suivante.

(c) On commence par étudier ce que pourrait être à *très long terme* pour la France un *régime stable* (*régime de croisière*) d'auto-subsistance énergétique exclusivement basé sur la captation locale de l'énergie solaire. Il correspond à une économie post-industrielle stabilisée ayant retrouvé un niveau raisonnable de structuration des équilibres locaux[1]. C'est la présentation de ce régime à long terme qui fait l'objet de cette première étude[2].

(d) On a volontairement limité l'étude au domaine des contraintes imposées par la géographie physique du pays, l'état des techniques d'utilisation et de conversion de l'énergie et certains gros plans macro-économiques (démographie, niveau de vie, croissance, ...). Ce parti technocratique est destiné à éclairer le champ des possibles[3] du point de vue physique en préjugeant le moins possible des caractéristiques socio-politiques de l'avenir. Toutefois, il est clair que le régime énergétique envisagé à long terme s'inscrit davantage dans la perspective d'une société "déconcentrée" et valorisant l'auto-subsistance que dans celle d'une hyper spécialisation. Ainsi, bien que les hypothèses retenues n'impliquent pas un projet de société au sens politique usuel du terme, ce travail peut apporter un certain éclairage sur les limites physiques d'un tel projet.

(e) L'étude faite reste à un niveau rudimentaire d'évaluations numériques. En particulier, les échanges inter industriels ou extérieurs du pays ne sont pas étudiés avec un modèle élaboré[4]. Il reste donc beaucoup à faire techniquement : ce travail n'est qu'une *esquisse* dont le développement réclame des moyens dépassant le cadre artisanal où a travaillé le Groupe Bellevue[5]. Dans le même ordre d'idées, le texte ne contient aucune référence :

- d'une part pour les données importantes, celles qui concernent l'avenir, les sources utilisées sont trop fragmentaires pour être référées utilement,
- d'autre part une recherche-discussion bibliographique complète dépasse les moyens du groupe si tant est qu'elle ait un sens.

Ce sont davantage la démarche et les gros plans que les décimales qui comptent ici.

(f) Dans une publication ultérieure, on explicitera un *scénario de transition* conduisant, par une modération à court et moyen terme, puis un arrêt progressif à long terme de la croissance (tant industrielle que démographique), du régime actuel de croissance-dépendance, au régime d'auto-subsistance présenté ici. L'étude de ce scénario prendra en compte comme un facteur essentiel les investissements nécessaires à la mise en place du régime à long terme. En fait, cette étude, conçue également comme anticipation, concernera un scénario d'évolution économique du pays précisant comment rendre compatibles le maintien des équilibres macro-économiques avec une stabilisation de l'activité industrielle et les investissements nécessaires à la mise en place du système énergétique auto-subsistant. Cette étude de transition doit faire appel à un modèle des échanges inter-industriels et extérieurs du pays ; elle sort donc du cadre économique rudimentaire où se situe la présentation actuelle, plus technique qu'économique, du régime à long terme. Elle réclame du temps et des moyens (de documentation et de calcul) dont n'a pas disposé jusqu'ici le groupe de Bellevue ; il a donc paru raisonnable de ne pas en attendre l'achèvement pour diffuser l'image normative que constitue le régime à long terme. Toutefois, on donne en annexe une description rudimentaire du scénario envisagé, en se limitant aux lignes directrices du point de vue énergétique et sans aborder les problèmes économiques ci-dessus mentionnés.

(1) Dans le débat entre autonomie et spécialisation, on opte nettement pour l'autonomie, sans toutefois la confondre avec la stricte autarcie.

(2) Voir I.3. et I.2.f.

(3) Concernant un avenir énergétique pour la France axé sur le potentiel renouvelable.

(4) Voir (f) ci-après et IV.1.c. à ce sujet.

(5) Voir (f) ci-après.

I.3. Présentation résumée du régime à long terme[1]

(a) On définit le régime d'auto-subsistance énergétique à long terme basé sur l'énergie solaire à partir d'hypothèses concernant, d'une part les besoins à satisfaire[2] et d'autre part les technologies considérées comme alors disponibles pour la conversion de l'énergie[3].

(b) Conformément à la démarche d'anticipation employée[4], les consommations sont déterminées par *évaluation de besoins à satisfaire* et non comme *prévisions d'une demande*. On évalue les besoins au chapitre IV. en fonction de la conception déjà mentionnée[5] : population avoisinant 60 Millions d'habitants [contre 53 en 1975], niveau de vie confortable pour tous[6], mais avec économie systématique et minimisation plutôt que maximisation de l'activité industrielle et des échanges extérieurs.

Le résultat de ces évaluations de besoins est en gros le suivant[7] : le total de la consommation des secteurs d'utilisation est peu différent du total actuel [141,5 MTEP[8] contre 146,5 en 1975]. Cependant :

* la répartition entre secteurs est notablement différente [43,5 % pour le secteur résidentiel tertiaire contre 36,8 % en 1975 ; 14,5 % pour les transports contre 21,4 % ; 6,7 % pour la sidérurgie contre 8,5 %],
* la beaucoup plus grande diversification des vecteurs d'énergie permet une meilleure utilisation finale à énergies distribuées voisines [34,1 % de chaleur solaire directement distribuée ; 10,3 % de carburants liquides contre 54,6 % (combustibles et carburants) en 1975 ; 14,1 % de combustibles solides[9] contre 11,3 % ; 31 % d'électricité contre 24,6 %].

(c) Les technologies envisagées à long terme pour la captation de l'énergie solaire correspondent à des hypothèses modestes ("conservatrices") en ce sens que l'on ne retient que des procédés dont la faisabilité technique (mais pas nécessairement économique selon les critères actuels) est pratiquement acquise[10]. Elles concernent essentiellement[11] :

* le chauffage des locaux : en plus de l'utilisation directe des apports solaires, chauffage urbain alimenté par des centrales solaires avec stockage été-hiver dans le sous-sol[12],
* le chauffage industriel par des installations à concentration diverses,
* la production de combustible solides commodes[13] ou de carburants à partir de la bio-masse : récupération de déchets, plantations et cultures énergétiques,
* la production d'électricité par diverses filières de captation directe (thermodynamique ou photovoltaïque) en plus des filières hydraulique, marémotrice, éolienne.

Par contre, on ne suppose pas acquise la photolyse directe de l'eau dont aucune démonstration de faisabilité n'a encore été effectuée. L'hydrogène est donc produit électrolytiquement ; enfin, les satellites solaires ne sont pas retenus à cause de leur gigantisme.

(d) Cela étant, on propose au chapitre V un système d'approvisionnement énergétique du pays basé sur les techniques précédentes et assumant entièrement les besoins explicités en (b) ci-dessus :

* le chauffage solaire fournit 80 % [34 MTEP] des besoins du chauffage résidentiel-tertiaire et 40 % [11,5 MTEP] des besoins de chaleur industrielle. Il réclame 250.000 hectares d'installations disséminées.

(1) Pour un aperçu du scénario de transition ; voir A.1 et A.3. (2) Voir (b) ci-après.
(3) Voir (c) ci-après. (4) Voir I.2.b. (5) Voir I.2.c.
(6) 20 millions de logements de 100 m² ; consommation moyenne de produits courants par habitant : 1.3 fois la consommation en 1975 ; niveau moyen d'équipement par habitant : 1,5 fois le niveau en 1975 (mais avec du matériel durant 2 fois plus longtemps en moyenne). Ces niveaux suffisent à assurer une vie matérielle confortable pour tous à condition d'une juste répartition des biens correspondants.
(7) Voir le chapitre IV. et V.3.g. et h. pour plus de détails.
(8) MTEP = million de tonne d'équivalent pétrole ; voir II.4.a.
(9) Combustibles solides et carburants liquides sont tirés de la bio-masse ; voir (c) ci-après.
(10) Voir I.4.b. à ce sujet (11) Pour plus de détails voir le chapitre III.
(12) Stockage géothermique qui peut suppléer la géothermie proprement dite à long terme ; cette dernière, n'étant pas une source d'énergie renouvelable, intervient à moyen terme (voir A.2), mais plus à très long terme.
(13) Granulats : Voir III.4.d.

* la production d'électricité [54,2 MTEP(1) contre 40 en 1975] résulte :

  . d'une part de l'exploitation à un niveau maximum non intensif des potentiels hydraulique [20 MTEP contre 13,4 en 1975], marémoteur [7,5 MTEP], éolien [6,7 MTEP],

  . d'autre part de centrales solaires [13 MTEP] qui produisent aussi par électrolyse la majeure partie de l'hydrogène utilisé [14 MTEP] et occupent 450.000 hectares.

* la production des combustibles solides [22,1 MTEP qui fournissent un complément de chauffage domestique (4,5 MTEP) et surtout industriel (10,6 MTEP)].

* celle des carburants liquides [14,9 MTEP] ou gazeux autres que l'hydrogène [2,8 MTEP de méthane] réclame l'exploitation en régime permanent de 5 Millions d'hectares de forêt [sur 15 en 1975] et de 2,5 Millions d'hectares de terres agricoles [sur 35 en 1975]. La bio-masse est transformée en combustibles ou carburant dans des unités de taille moyenne [50.000 TEP/an de capacité] situées sur les lieux de production forestière ou agricole, une usine pour quelques cantons .

Ces superficies sont certes importantes, mais non redibitoires, d'autant que, sur les 700.000 hectares d'installations de captation, moins de 200.000 sont industrialisés (sur 5 Millions d'hectares de surfaces non agricoles en 1975). Le reste demeure très probablement accessible à l'élevage et à certaines cultures.

(e) Le résultat notable ainsi dégagé réside dans le fait que le potentiel solaire (le "gisement solaire") obtenu pour le territoire peut assumer les besoins "post-industriels" envisagés, mais cela à la limite de ses possibilités. Il apparait en effet qu'une augmentation substantielle des superficies consacrées à l'approvisionnement énergétique est difficilement compatible avec l'impératif écologique introduit au § I.2.a. Par exemple, un doublement des apports semble exclu, au moins avec les technologies conservatrices envisagées(2).

I.4. Commentaires

(a) Malgré le caractère planétaire du problème de l'énergie et des problèmes écologiques, on se limite strictement ici au cadre du territoire de la France. Cette limitation rédibitoire pour une étude de prévision du type dynamique des systèmes, ne l'est pas pour l'anticipation que l'on a en vue, puisqu'on s'intéresse à une perspective d'auto-subsistance énergétique basée sur la captation locale de l'énergie solaire.

Par ailleurs, la France occupe une position spécialement favorable(3) tant en ce qui concerne le potentiel d'auto-subsistance (pas seulement énergétique) que le gisement solaire, grâce à la conjugaison de son état de développement et de ses richesses agricoles, forestières, hydrauliques, éoliennes, ... Une étude parallèle pour l'Europe des Neufs donnerait sans doute des résultats notablement différents : transition plus facile grâce au charbon Allemand et au pétrole de la Mer du Nord, mais long terme solaire plus juste. Par contre, les Etats-Unis ou l'URSS conjuguent évidemment toutes les faveurs.

Pour les pays du tiers monde, l'option de stabilisation et d'auto-subsistance envisagée ici aurait l'avantage de leur laisser disposer à terme des ressources fossiles existant sur leurs sols ; on considère que leur problème énergétique (comme d'ailleurs celui de leur développement) est leur affaire, sans toutefois éliminer une collaboration technique ou des échanges sélectifs.

(b) On s'intéresse donc à un avenir énergétique conduisant à un équilibre à très long terme basé sur des techniques et des besoins modestes. Cette étude peut sembler peu réaliste, vu la rapidité et la brutalité avec lesquelles le microcosme numain transforme actuellement la planète ; il est en effet probable que des redistributions et des innovations techniques importantes se produiront avant l'épuisement des ressources fossiles. La démarche d'anticipation employée permet de s'abstraire de ces incertitudes grâce au jeu des hypothèses faites.

(1) Avec l'équivalence nominale 1 MTEP = 4,5 TWh ; Voir II.4.c.

(2) Pour plus de détails voir le chapitre V ; en particulier V.6. où sont discutées certaines variantes.

(3) Entre autres par rapport à la moyenne Européenne.

(4) Si elle était partagée par une majorité des pays développés ... ce qui est évidemment problématique ; voir (c) ci-dessous.

En ce qui concerne les techniques considérées comme disponibles aux termes en cause, on a préféré faire des hypothèses modestes. En effet, si un équilibre est possible sous ces hypothèses, il le serait à fortiori si des innovations techniques importantes avaient lieu.

(c) Il est clair qu'envisagé dans la perspective de l'expansion triomphante, le réalisme historique du scénario proposé apparaît comme correspondant à court et moyen terme à des économies draconiennes -à la limite du dramatique et de l'absurde- dont la mise en oeuvre est bien improbable car on ne voit pas quelle force politique pourrait l'imposer ! ... Par contre, dans la perspective d'une aggravation de la crise mondiale, ces économies pourraient être imposées par la force des choses. Le scénario proposé leur donne alors une cohérence et un contenu positif grâce à l'équilibre à long terme auquel il conduit. Ce nouvel équilibre peut apparaître alors comme un objectif et plus seulement comme un aboutissement possible.

Chapitre II

GENERALITES SUR L'ENERGIE ET LES BILANS ENERGETIQUES

II.1. Préliminaire

Dans le processus économique, les transferts de l'énergie d'une forme à un autre jouent un rôle crucial ; l'étude quantitative que l'on envisage exige un mode de représentation synthétique de ces transferts.

Cet instrument synthétique est constitué par des bilans annuels en termes physiques croisant *formesd'énergie* et *secteurs d'approvisionnement ou d'utilisation : bilans d'approvisionnement-distribution* et *bilans d'utilisation finale*.

La structure de ces bilans est présentée aux § II.5 et II.6. Au préalable, on rappelle les éléments de base des transferts énergétiques que sont :

- *La classification des formes d'énergie*(1)
- *La classification des secteurs d'utilisation et d'approvisionnement*(2)
- *Les unités de mesure*(3).

II.2. Classification des formes d'énergie

(a) *Les énergies primaires* [énergies telles que la nature les offre] :

- *Combustibles fossiles* [charbon, pétrole brut, gaz naturel].
- *Matériaux fissiles* [Uranium, Thorium].
- *Energie géothermique*.
- *Energie des marées*.
- *Energie solaire et ses dérivés* [Bio-masse, hydraulique, éolien, ..]

(b) *Les énergies distribuées* ou *vecteurs d'énergie* [énergies telles qu'elles sont utilisables (et consommées par les secteurs d'utilisation)] :

- *Chaleur* [basse température (BT), moins de 100°C ; moyenne température (MT), entre 100°C et 600°C ; haute température (HT), plus de 600°C].
- *Combustibles* [solides (CS), minéraux issus du charbon ou organiques issus de la bio-masse ; liquides (CL), hydrocarbures, alcools ; gazeux (CG), gaz pauvre, méthane, hydrogène, ..].
- *Electricité* (E).

(c) *Les énergies finales* [énergies telles qu'elles sont effectivement utilisées] :

- *Chaleur* BT, MT, HT .
- *Force motrice* Fixe (FMF) ou mobile (FMM) .
- *Electricité spécifique* [ES], incluant l'éclairage, la force motrice au détail (petits moteurs) et les usages industriels spécifiques (électrochimie, ...).

(1) Voir II.2. (2) Voir II.3. (3) Voir II.4.

Notons la distinction entre la chaleur comme énergie distribuée (par exemple dans les canalisations d'une installation de chauffage géothermique) et la chaleur comme énergie finale.

II.3. Classification des secteurs d'utilisation et d'approvisionnement.

Les *secteurs d'approvisionnement* transforment les énergies primaires en énergies distribuées ; tandis que les *secteurs d'utilisation* consomment des énergies distribuées et les transforment en énergies finales.

Ces *secteurs d'utilisation* sont agrégés ici selon les usages de la comptabilité énergétique nationale :

- *Résidentiel et tertiaire* (RESID. TERT.)[1].
- *Transports* (TRANSPORTS).
- *Agriculture* (AGRICULTURE).
- *Sidérurgie* (SIDERURGIE).
- *Industrie* (INDUSTRIE).

On peut classer les *secteurs d'approvisionnement* de la façon suivante :

(a) *Secteurs* (actuels) *de transformation des énergies primaires non renouvelables* en énergies distribuées :

- Les *charbonnages et cokeries* (CHARB.& COKE.) fournissent des combustibles solides utilisables (CS), charbon, coke, à partir de la houille.
- Les *raffineries* (RAFFINERIES) fournissent des combustibles et carburants (CL ou CG) à partir du pétrole brut.
- L'*industrie du gaz* (IND.DU GAZ) fournit des combustibles gazeux (CG) à partir de la houille (usines à gaz) ou du gaz naturel.
- Les *centrales thermiques* (CENTR.THERM.) fournissent de l'électricité à partir de combustibles.
- L'*industrie nucléaire* (CENTR.NUCL.) fournit de l'électricité à partir de l'uranium.
- Les *installations géothermiques* (GEOTHERMIE) fournissent de la chaleur BT puisée dans les nappes aquifères.

A long terme, on admettra certaines modifications de ces secteurs : du coke pourra être fabriqué à partir de bio-masse par le secteur CHARB.& COKE[2], de l'hydrogène fabriqué électrolytiquement par le secteur IND.DU GAZ[3].

(b) *Secteurs* (actuels ou potentiels) *de conversion de l'énergie solaire* en énergies distribuées :

- *Conversion en chaleur* (SOLAIRE THERM.) centralisée ou non[4].
- *Conversion par les plantes* suivie de la transformation de la bio-masse en combustibles ou carburants (CS, CL, CG) utilisables (SOLAIRE AGR.[5]).
- *Conversion en électricité via les installations hydrauliques et éoliennes* (HYDRAUL.& EOL.[6]).
- *Conversion directe en électricité*, puis éventuellement en hydrogène par électrolyse (SOLAIRE ELECT.[7]).

On étudie au chapitre III les diverses filières de conversion de l'énergie solaire correspondant à ces secteurs.

(1) Les appellations données entre parenthèses en majuscules sont celles qui figurent dans les bilans (Voir II.5 et II.6.).
(2) Voir V.4.i.
(3) Voir V.4.g.
(4) Voir III.2 et III.3.
(5) Voir III.4.
(6) Voir III.5.
(7) Voir III.5.

(c) *Secteurs de récupération* d'énergie utilisable (BT, MT, CS) à partir de déchets organiques (RECUP.DECHETS). Les déchets pris en compte sont les ordures et déchets organiques industriels (déchets de bois, ...). Par contre, l'utilisation des déchets agricoles ou forestiers est incluse dans le secteur SOLAIRE AGR.(1).

I.4. Unités de mesure.

(a) La comparaison des diverses formes d'énergie et l'établissement des bilans nécessitent l'emploi d'une unité de mesure commune et par conséquent la définition de coefficients d'équivalence tenant compte des contraintes technologiques inhérentes aux transformations envisagées.

Conformément aux usages actuels de la comptabilité énergétique nationale, l'unité adoptée est une quantité de chaleur, la TEP [Tonne d'Equivalent Pétrole(2)] :

(1) $1\ TEP = 10^4$ thermies,

et (dans les bilans) son multiple, la MTEP (Mega TEP) :

(2) $1\ MTEP = 10^6\ TEP = 10^{10}$ thermies.

Les quantités de chaleur (BT, MT, HT) s'expriment naturellement en TEP ; par contre, pour les combustibles, l'électricité et la force motrice, il faut définir des équivalences.

(b) Pour les *combustibles* (primaires ou distribués), chaque quantité physique est mesurée (en TEP ou MTEP) par son *pouvoir calorifique total* [quantité de chaleur résultant de la combustion complète, par exemple sans condensation de la vapeur d'eau produite (PCI)].

Pour passer aux masses, on peut utiliser les coefficients suivants :

(3)	. Uranium naturel	15.000 TEP/tonne	(3)	
(4)	. Produits pétroliers liquides	1 TEP/tonne	(4)	
(5)	. Charbon	0,67 TEP/tonne	(5)	
(6)	. Gaz naturel (méthane)	1,2 TEP/tonne		
	"	0,9 TEP/1 000 m^3 TPN		(6)
(7)	. Hydrogène	3,3 TEP/tonne		
(8)	. Bio-masse sèche	0,4 TEP/tonne		

(c) Pour *l'électricité*, il faut modifier l'équivalence physique :

(9) $1\ MTEP = 11,6\ TWh$(7)

en fonction des conditions de production ou d'utilisation. Il est d'usage de mesurer l'énergie électrique par la quantité de chaleur nécessaire à la produire avec un rendement thermodynamique conventionnel de 0,39 ; ce qui donne :

(10) $1\ MTEP = 4,5\ TWh$,

ou encore :

(11) $1\ TWh = 0,222\ MTEP$.

Cette équivalence est raisonnable pour les *usages spécifiques* de l'électricité (éclairage, production de force motrice, électrochimie, ...) ou pour le *chauffage par l'action de pompes à chaleur* ayant un coefficient de performance de l'ordre de 1/0,39 = 2,56(8). Par contre, lorsque l'électricité est utilisée pour le *chauffage par effet joule*, l'équivalence (10) surestime par un facteur ϕ voisin de 2 la chaleur finale disponible. Théoriquement ce facteur vaut 1/0,39 = 2,56 ; pratiquement, lorsque l'électricité est produite à partir d'une source de chaleur, il vaut $\rho/0,39$ où ρ est le rendement de l'utilisation directe ($\rho = 0,7$ donne $\phi = 0,7/0,39 = 1,8$).

(1) Voir III.4.c.
(2) Voir la relation (4) ci-dessous et la note (4).
(3) Dans les réacteurs à neutrons lents.
(4) Chiffre moyen ; d'où le nom de TEP.
(5) Chiffre moyen ; 0,67 = 1/1,5 ; 0,67 TEP = 1 TEC.
(6) Chiffre moyen ; TPN : température et pression normales.
(7) $1\ TWh = 10^{12}\ Wh = 10^9\ KWh = 10^6\ MWh$.
(8) Le coefficient de performance électricité-chaleur des pompes à chaleur (rapport de la quantité de chaleur fournie à la quantité d'électricité consommée) est couramment de l'ordre de 2,5. Ainsi, la fourniture de 1 MTEP de chaleur requiert 1 MTEP d'électricité (mesurée selon l'équivalence (10) en II.4. ; i.e avec la coefficient d'amplification 1/0,39 = 2,56 par rapport à l'équivalence physique (9) ; voir aussi III.5.a. à ce sujet).

(d) Pour la *force motrice fixe*, l'équivalence (10) est raisonnable comme pour l'électricité spécifique.

Enfin, pour la *force motrice mobile* fournie par les moteurs à combustion interne, le rendement est de l'ordre de 0,25 plutôt que 0,39, ce qui conduirait à l'équivalence :

(12) 1 MTEP = 3 TWh (mécanique).

Mais on se conformera à l'usage qui est de conserver l'équivalence (10).

II.5. Bilans d'approvisionnement-distribution.

Les *bilans annuels d'approvisionnement-distribution* constituent l'instrument de base. Ils croisent[1] secteurs d'approvisionnement ou d'utilisation[2] figurant en lignes avec, en colonnes, les énergies distribuées (BT, MT, HT, CS, CL, CG, E[3]).

Toutes les quantités d'énergie sont mesurées en MTEP conformément au § II.4. et concernent l'année indiquée.

Le bloc UTILISATION (partie supérieure) fournit pour chaque forme d'énergie distribuée les consommations des secteurs d'utilisation (RESID.TERT., TRANSPORTS, AGRICULTURE, SIDERURGIE, INDUSTRIE[4]) le signe - indiquant une production.

Le bloc PRODUCTION (en bas et à gauche) fournit, pour chaque forme d'énergie distribuée, les productions des secteurs d'approvisionnement (RECUP.DECHETS, SOLAIRE AGR., SOLAIRE ELECTR., HYDRAUL.& EOL., SOLAIRE THERM., GEOTHERMIE, CENTR.THERM., CENTR.NUCL., CHARB.& COKE, RAFFINERIES, IND.DU GAZ) le signe - indiquant une consommation. La ligne PERTES DISTRIB. indique les pertes à la distribution, énergie par énergie.

Dans la colonne Σ_{th} (sigma thermique) figurent, ligne par ligne, les totaux des colonnes BT, MT, HT, CS, CL, CG.

La ligne TOTAUX EN DISTRIB. est la charnière du bloc UTILISATION et du bloc PRODUCTION : y figurent, colonne par colonne, les totaux des lignes de chacun de ces blocs, totaux qui coïncident, exprimant ainsi l'équilibre de la production et de la consommation.

La colonne Σ fournit des totaux de plusieurs manières. D'abord dans sa partie supérieure, jusqu'à la ligne PERTES DISTRIB. incluse, figure, sur chaque ligne, la somme des chiffres des colonnes Σ_{th} et E. En particulier, le chiffre situé dans cette colonne et dans la ligne TOTAUX EN DISTRIB. est le *total des énergies distribuées*, parfois appelé *total secondaire*. Ensuite, dans sa partie médiane, de la ligne RECUP.DECHETS à la ligne GEOTHERMIE incluse, figure, sur chaque ligne, *l'apport total* du secteur correspondant, c'est à dire soit la somme du chiffre de la colonne Σ_{th} et de celui de la colonne E si ce dernier est positif (i.e. une production), soit seulement le chiffre de la colonne Σ_{th} si celui de la colonne E est négatif (i.e. une consommation[5]). Enfin, dans sa partie inférieure (lignes CENTR.NUCL., CHARB.& COKE, RAFFINERIES, IND.DU GAZ), elle indique les *apports primaires* (en Uranium, charbon, pétrole brut, gaz naturel) aux secteurs de transformation concernés ; le bloc APPROVIS.COMB.& U. indique la répartition de ces apports entre extraction locale (colonne EXTR.LOCALE) et importations (colonne IMP.), avec sommation sur la ligne TOTAUX PRIMAIRES. Les pertes lors de la transformation des énergies primaires en énergies distribuées peuvent être calculées, pour chacune des lignes CENTR.NUCL., CHARB.& COKE, RAFFINERIES, IND.DU GAZ, en faisant la différence entre le total des productions (colonne BT, MT, HT, CS, CL, CG, E) et de l'apport primaire (colonne Σ).

A la ligne TOTAUX PRIMAIRES et dans la colonne Σ figure le *total primaire*, somme (dans la colonne Σ) des apports totaux ou primaires des divers secteurs (lignes RECUP.DECHETS à GEOTHERMIE et CENTR.NUCL. à IND.DU GAZ). La part de ce total résultant d'importations (respectivement de l'extraction locale) de combustibles ou Uranium figure, toujours à la ligne TOTAUX PRIMAIRES, dans la colonne IMP. (respectivement EXTR.LOCALE).

Enfin, le bloc SUPERFICIES indique les superficies [industrielles (SI), mixtes (SM), agricoles (SA), forestières (SF)[6]] occupées par les divers secteurs d'approvisionnement, avec les totaux, par lignes dans la colonne Σ_s et par colonne dans la ligne TOTAUX PRIMAIRES.

(1) Voir le tableau II.1. ci-après ou le tableau II.3. au II.7.
(2) Voir II.3. (3) Voir II.2.b. (4) Voir II.3.
(5) La situation inverse (chiffre négatif dans la colonne Σ_{th}) ne se produit pas, au moins sur les lignes en cause.
(6) Voir III.1.β.

Destinés à permettre une vue synthétique des transferts d'énergie, ces bilans contractent certaines informations. Par exemple, en ce qui concerne les pertes à la distribution, les chiffres indiqués incluent certaines auto-consommations de producteurs ; en ce qui concerne la sidérurgie, la production de gaz de hauts fourneaux n'apparait que comme réduction de la consommation de CG du secteur(1).

Les produits pétroliers ou la bio-masse utilisés comme matières premières non énergétiques sont exclus des consommations indiquées.

Tableau II.1. - Bilan d'approvisionnement-distribution. Tableau de référence indiquant la numérotation des cases.

		BT	MT	HT	CS	CL	CG	Σ_{th}	E	Σ	APPROVIS. COMBUSTIBLES EXTRA-LOCALE	APPROVIS. COMBUSTIBLES IMP.	SUPERFICIES (Mha) Si	SM	SF	SA	Σ_s
UTILISATION	RÉSID-TERT.	(1,1)							(1,8)	(1,9)							
	TRANSPORTS																
	AGRICULTURE																
	SIDÉRURGIE																
	INDUSTRIE	(5,1)							(5,8)	(5,9)							
TOTAUX EN-DISTRIB.		(6,1)							(6,8)	(6,9)							
PRODUCTION	PERTES DISTRIB.	(7,1)							(7,8)	(7,9)							
	RÉCUP. DÉCHETS	(8,1)								(8,9)			(8,12)			(8,15)	(8,16)
	SOLAIRE AGRIC.																
	SOLAIRE ELECTR.																
	HYDRAUL. & EOL.																
	SOLAIRE THERM.																
	GÉOTHERMIE	(13,1)							(13,8)	(13,9)							
	CENTR. CLASS.																
	CENTR. NUCL.	(15,1)							(15,8)	(15,9)	(15,10)	(15,11)					
	CHARB. & COKE.																
	RAFFINERIES																
	IND. DU GAZ	(18,1)							(18,8)	(18,9)	(18,10)	(18,11)					
TOTAUX PRIMAIRES										(19,9)	(19,10)	(19,11)	(19,12)			(19,15)	(19,16)

II.6. Bilans d'utilisation finale.

(a) Les bilans d'utilisation finale croisent(2) secteurs d'utilisation(3) figurant en lignes avec, en colonnes, les énergies finales (BT, MT, HT, FMM, FMF, ES(4)). Afin de distinguer la partie de la chaleur haute température consommée sous forme de coke, on introduit une colonne "HT COKE" ; la colonne HT correspond aux autres consommations HT.

Le tableau fournit, pour chaque secteur d'utilisation (RESID.TERT., TRANSPORTS, AGRICULTURE, SIDERURGIE, INDUSTRIE(5)) et pour chaque forme d'énergie finale, la quantité (mesurée en MTEP conformément au § II.4.) qui a été consommée par le secteur pour être finalement utilisée sous cette forme, avec les totaux et pourcentages, colonne par colonne, sur les lignes TOTAUX et %.

(1) Le lecteur pourra comparer ces bilans avec ceux dits "bilans énergétiques simplifiés" qui sont utilisés par les organismes officiels.
(2) Voir le tableau II.2. page suivante ou le tableau II.4. au § II.7.
(3) Voir II.3. (4) Voir II.2.c. (5) Voir II.3.

Tableau II.2. - Bilan d'utilisation finale : tableau de référence.

SECTEURS	BT	MT	HT	HTcoke	Σ_{th}	FMM	FMF	ES	Σ_F	Σ_D
RESID- TERT.										
TRANSPORTS										
AGRICULTURE										
SIDERURGIE										
INDUSTRIE										
TOTAUX										
%										

Les chiffres ainsi donnés n'incluent pas le rendement de conversion de l'énergie (distribuée) incidente au secteur en énergie finale. Cette lacune est sérieuse et appelle une remarque : les chiffres indiqués ne sont que des évaluations sans doute assez grossières provenant d'origines disparates(1).

Pour chaque ligne, on a fait figurer : dans la colonne Σ_{th} le total thermique, c'est à dire la somme des chiffres des colonnes BT, MT, HT, HT Coke ; dans la colonne Σ_F le total de l'énergie utilisée dans le secteur correspondant, c'est à dire la somme des chiffres des colonnes Σ_{th}, FMM, FMF, ES ; dans la colonne Σ_D le total de l'énergie distribuée au secteur, chiffre qui coïncide avec celui indiqué dans la colonne Σ et sur la ligne correspondante du bloc UTILISATION du bilan d'approvisionnement-distribution.

Lorsque dans un secteur, une quantité Q d'électricité distribuée est utilisée pour le chauffage par effet joule, sur la ligne correspondante, le total utilisé (colonne Σ_F) est inférieur de Q/2 au total distribué (colonne Σ_D). Cela provient de ce que la quantité Q MTEP d'électricité distribuée (mesurée selon l'équivalence (10)(2)) ne correspond qu'à un usage thermique de l'ordre de Q/2 MTEP (Q/2,56 théoriquement(3)) d'où la différence Q/2 = Q - Q/2 mentionnée.

(b) Pour serrer la réalité de plus près, il faudrait introduire des bilans à trois dimensions croisant secteurs d'utilisation, énergies distribuées et énergies finales : l'introduction des rendements de conversion (énergie distribuée-énergie finale) serait alors naturelle, car ces rendements sont spécifiques de chaque énergie. Mais l'information nécessaire pour remplir de tels bilans semble faire encore défaut.

En fait, dans la suite,on emploiera surtout des bilans d'utilisation finale partiels : soit qu'ils ne concernent horizontalement qu'un ou deux secteurs, soit qu'ils mêlent énergies distribuées et énergies finales.

II.7. Bilans 1975

Pour illustrer la description abstraite des bilans faite ci-dessus aux § II.5 et II.6. et pour références ultérieures, on fait figurer ci-après les bilans 1975.

Le schéma figurant sur la dernière page (couverture) donne une image simplifiée du système actuel. Ce schéma regroupe de façon synthétique les informations des tableaux II.1 et II.2.

Les quantités d'énergies distribuées ou utilisées sous diverses formes sont proportionnelles aux surfaces des cercles. L'épaisseur des vecteurs les joignant exprime la valeur comparée des flux d'énergie.

(1) Voir aussi (b) ci-après. (2) Voir II.4.c. (3) Voir II.4.c.

Tableau II.3. - Bilan 1975

		BT	MT	HT	CS	CL	CG	Σ_{th}	E	Σ
UTILISATION	RÉSID-TERT.				5.5	24.5	7.8	37.8	16.1	53.9
	TRANSPORTS					30.1		30.1	1.3	31.4
	AGRICULTURE					5.1		5.1	0.8	5.9
	SIDÉRURGIE				8.4	2.1	-0.2	10.3	2.1	12.4
	INDUSTRIE				2.6	18.2	6.3	27.1	15.8	42.9
TOTAUX EN-DISTRIB.					16.5	80.0	13.9	110.4	56.1	166.5
PRODUCTION	PERTES DISTRIB.					-2.6	-0.7	-3.3	-2.6	-6.4
	RÉCUP-DÉCHETS				1.0			1.0		1.0
	SOLAIRE AGRIC.				0.8			0.8		0.8
	SOLAIRE ELECTR.									
	HYDRAULIQUE								13.4	13.4
	SOLAIRE THERM.									
	GÉOTHERMIE									
	CENTR. CLASS.				-10.5	-12.1	-4.3	-26.9	22.7	
	CENTR. NUCL.					-0.1		-0.1	3.9	3.9
	CHARB-⅓ COKE.				25.2		1.2	26.4	-0.5	27.8
	RAFFINERIES					35.2		35.2	-0.7	101.8
	IND. DU GAZ					-0.4	17.7	17.3	-0.1	17.3
TOTAUX PRIMAIRES :										166.0

APPROVIS.	
EXTR. LOCALE	IMP.
3.9	
17.9	9.9
1.4	100.4
6.6	10.7
29.8	121.0

SUPERFICIES (Mha)				
SI	SM	SF	SA	Σ_s

Tableau II.4. - Bilan d'utilisation finale : 1975.

SECTEURS	BT	MT	HT	HTcoke	Σ_{th}	FHM	FHF	ES	Σ_F	Σ_D
RESID-TERT.	37.8	2.3	—	—	40.1	—	—	11.5	51.6	53.9
TRANSPORTS	—	—	—	—	—	31.2	—	0.2	31.4	31.4
AGRICULTURE	1.6	—	—	—	1.6	3.7	0.3	0.3	5.9	5.9
SIDÉRURGIE	0.1	—	3.4	7.2	10.7	—	0.2	1.2	12.1	12.4
INDUSTRIE	4.3	15.2	5.8	0.4	25.7	1.3	10.8	4.8	42.6	42.9
TOTAUX	43.8	17.5	9.2	7.6	78.1	36.2	11.3	18.0	143.6	146.5
%	30.5	12.2	6.4	5.3	54.4	25.2	7.9	12.5	100.0	

Chapitre III
CATALOGUE DE TECHNIQUES DE CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE

III.1. Généralités

Dans ce chapitre on dresse l'inventaire des diverses filières de conversion de l'énergie (solaire essentiellement) susceptibles d'être techniquement disponibles à long terme.

On ne prend en compte que des procédés dont la faisabilité technique est pratiquement réalisée dès à présent. On note que, parmi ces procédés, la plupart n'ont pas encore donné lieu à des réalisations industrielles à grande échelle. Ils ne seraient vraisemblablement pas compétitifs, financièrement parlant, par rapport aux modes d'approvisionnement énergétique actuellement dominants. Il s'agit là d'un grave handicap pour la mise en oeuvre à court terme de ces procédés, mais non pour la perspective à long terme envisagée.

Chaque filière considérée est décrite de façon très schématique : on n'en retient que les caractéristiques globales permettant de la situer dans le concert envisagé. Ce sont :

(α) *Le type de l'énergie distribuée* qui est produite [chaleur (BT, MT, HT) ; combustibles (CS, CL, CG), électricité (E)] et une indication sur le mode de production [solaire direct, brulage, pyrolyse, ...].

(β) *Le type d'occupation du sol :*

- *Surface industrialisée* (SI).
- *Surface mixte* (SM) : installations laissant le sol au moins partiellement disponible pour d'autres usages (culture, locaux, parkings, ...).
- *Surface forestière* (SF).
- *Surface agricole* (SA).

(γ) *La productivité*, c'est à dire le quotient Q/S de la quantité [1] d'énergie Q (mesurée en TEP) susceptible d'être produite *en 1 an* par la superficie du terrain S (mesurée en hectares) qu'occupe (tous auxiliaires compris) l'installation productrice.

La productivité est ainsi mesurée en *TEP/ha x an*.

Cette productivité est calculée, pour les installations de captation de l'énergie solaire, en partant d'un *apport solaire de 1 000 TEP/ha x an*, valeur correspondant aux portions les moins ensoleillées du territoire français. *Le rendement moyen de conversion* (par rapport au sol) vaut alors :

α = productivité (en TEP/ha x an)/1 000.

Le type d'occupation du sol et la productivité indiquent la "*consommation de territoire*" par l'approvisionnement énergétique décrit.

(δ) L'ordre de grandeur des *capacités*, et éventuellement des *superficies*, des installations envisagées ; on mesure la capacité d'une installation par sa production annuelle en TEP/an. Cette caractéristique donne une idée du degré de décentralisation possible du système décrit.

(ε) *La durée maximum de stockage* de l'énergie distribuée produite. Cette caractéristique permet de situer l'installation considérée par rapport au problème crucial de la régularisation d'un apport solaire intermittent.

(1) Quantité nette des pertes d'énergie du même type dans l'installation productrice, mais pas nécessairement des auto-consommations d'énergies d'autres types (voir les tableaux ci-après).

Ces caractéristiques sont présentées, ci-dessous, dans des tableaux de format standard afin de faciliter les comparaisons. Les filières sont classées selon les quatre rubriques suivantes qui correspondent aux besoins énergétiques fondamentaux à satisfaire :

* Chauffage des locaux, eau chaude, cuisine.
* Production de la chaleur industrielle.
* Production de combustibles ou carburants.
* Production d'électricité.

III.2. Chauffage des locaux, eau chaude, cuisine

(a) Le chauffage des locaux et l'eau chaude peuvent d'abord être fournis, soit par des pompes à chaleur électriques [1], soit par des installations classiques dont les chaudières sont alimentées par du combustible solide (CS) tiré de la bio-masse (granulats)[2]. Ces intallations constituent la filière [I].

(b) Le chauffage solaire direct comporte trois filières ; le tableau, ci-après, et les commentaires qui le suivent présentent ces filières.

Tableau III.1. - Chaleur BT par apport solaire direct

TYPE DE LOCAUX	TYPE ENERGIE	TYPE DE SOL	PRODUCTIVITÉ (TEP/ha.an)	CAPACITÉ UNITÉ (TEP/an)	DURÉE STOCKAGE (jours)	INDICATIONS
[2] Pavillon, imm. isolé (< 10 lgts), usages agr.	BT solaire direct + Brulage CS ou CG	SM[3]	120[3]	2 à 20	< 8 j	Chauffage solaire direct partiel (60%) + appoint par brulage de CS ou par pompe à chaleur. capteurs intégrés.
[3] Village, petit ens. (50-100 lgts), ens. tertiaire ou industriel.	BT solaire direct	SM	300	100 à 200	> 150 j	chauffage solaire direct intégral ; distribution BT. Capteurs intégrés + petite centrale solaire. stockage BT au voisinage en enceinte souterraine calorifugée (15 à 30.000 m³).
[4] ville, grd ens. ; Zone urb. (> 1000 lgts), grd ens. tert., ind. ou agr.	BT solaire direct	SM	250	2×10^3 à 10^5	> 150 j	Chauffage solaire direct intégral ; distribution MT type chauffage urbain ; transp. longue dist. pass. ; stockage MT en nappes captives ; alimentation par centrale solaire moy. concentration.

(1) Voir V.3.b. à ce sujet.

(2) Voir III.4.e.

(3) Type d'occupation du sol et productivité de l'installation solaire seule ; les caractéristiques correspondantes de l'appoint ne sont pas prises en compte ici (voir III.4.b. et d. pour les (CS)).

Les productivités indiquées en chaleur BT sont nettes des pertes diverses, mais pas de la consommation d'énergie noble (E) nécessaire au fonctionnement. Cette consommation peut être évaluée à 100 kWe/el par TEP produite, c'est à dire :

(1) 1 TEP(E) pour 50 TEP(BT) produites.(1)

(c) Les filières [2], [3], [4] comportent une installation de captation directe de l'énergie solaire.

Elles se distinguent surtout par leurs possibilités de stockage :

* A l'échelle individuelle (filière [2]), le stockage saisonnier semble difficilement réalisable ; l'apport solaire des beaux jours ne peut donc pas servir au chauffage pendant les longues périodes de mauvais temps. Il est indispensable de disposer d'un chauffage d'appoint (pompe à chaleur ou chaudière à granulats).

* Par contre, le stockage de chaleur à long terme des filières [3] et [4] permet le chauffage solaire intégral et augmente considérablement la productivité.

(d) Dans les filières [4] on peut réaliser le stockage en réchauffant jusqu'à 200°C une couche géologique poreuse (nappes aquifères captives à des profondeurs de quelques centaines de mètres) : par forage on injecte de l'eau surchauffée sous pression ; les mêmes forages servent au déstockage. La température de travail (> 150°) rend possible le transport de la chaleur sur des distances de l'ordre de 60 km.

(e) Cette possibilité de transport de l'énergie laisse beaucoup de souplesse pour le choix des sites d'implantation des centrales de captation et des installations de stockage. En particulier, on peut prévoir plusieurs modules de captation disséminés alimentant un même stockage. Le sous-sol français est riche en nappes aquifères ; le potentiel représenté par la filière [4] n'est donc pas tant limité localement par les contraintes géologiques du site de stockage (sauf peut être dans l'Ouest) que par les superficies à consacrer aux centrales solaires.

(f) Voici deux exemples relatifs à la filière [4] :

* Une zone urbaine de 5 000 logements réclame 5 00 x 2/250 = 40 hectares(2).

* Si l'on évalue à très long terme, à 6 MTEP les besoins BT de la région parisienne (dont 4 pour le résidentiel), on obtient :

$$6 \times 10^6/250 = 24\,000 \text{ hectares}$$

(dont 80 % de surface mixte) à répartir à 60 km à la ronde (i.e sur 10^6 hectares).

(g) Compte tenu des remarques précédentes, il semble raisonnable d'utiliser au maximum la filière [4]. On limite les filières [2] et [3] aux locaux ruraux ou dispersés, la filière [1] à des locaux anciens difficilement accessibles au chauffage urbain(3).

(h) Les filières [3] et [4] fournissent l'eau chaude sanitaire toute l'année sans problème grâce au stockage à long terme, ainsi que les filières [1] et [2] dans le cas d'installations collectives. Par contre, pour l'usage individuel de ces dernières filières, un système d'appoint au gaz (réservé à l'eau chaude) peut être plus commode ; mais la consommation correspondante de gaz qui en résulte est faible vu le caractère très minoritaire de ces filières(4).

(i) Pour fournir la chaleur MT nécessaire à la cuisine, on envisage essentiellement de brûler des combustibles gazeux : hydrocarbures gazeux tirés de la bio-masse(5) ou hydrogène électrolytique(6).

(1) Voir aussi V.4.h. à ce sujet.
(2) 2 TEP/log^t x an (voir IV.2.a.)
(3) Voir en V.3.b. et V.4.h. la répartition proposée.
(4) Voir (g) ci-dessus.
(5) Voir III.4.d.
(6) Voir III.4.g et h.

III.3. Production de la chaleur industrielle

(a) La chaleur industrielle peut d'abord être obtenue par brulage, soit de combustibles solides ou gazeux tirés de la bio-masse, soit d'hydrogène électrolytique : les granulats (CS) remplacent le charbon ou le fuel[1] ; l'hydrogène ou le méthane biologique (CG) remplacent le gaz naturel. Par ailleurs, certains besoins de chauffage MT (séchage par exemple, spécialement en appoint d'un apport solaire direct) peuvent être assurés par l'action de pompes à chaleur. Enfin, le chauffage HT de certains fours peut être assuré électriquement. Mais cet usage de l'électricité est réduit au minimum[2]. Pour référence ultérieure, on convient que ces divers procédés de chauffage constituent la filière [5].

Par contre, on réserve les combustibles liquides à leurs usages spécifiques (moteurs à combustion interne ou piles à combustible).

(b) Le chauffage solaire industriel direct comporte trois filières que présente le tableau III.2. et les commentaires qui le suivent :

Tableau III.2.-Chaleur MT et HT par chauffage solaire direct

TEMPÉRATURE	TYPE ENERGIE	TYPE DE SOL	PRODUCTIVITÉ (TEP/hectare)	CAPACITÉ UNITÉ (TEP/an)	DURÉE STOCKAGE (jours)	INDICATIONS.
[6] < 200°C	MT Solaire direct intégral	SM	250	2×10^3 à 10^5	> 150 j	Centrale solaire Moy. Concentration (Concentrateurs cylindro-paraboliques). Stockage en nappe captive.
[7] 200°C à 600°C	MT Solaire direct + brulage CS ou CG	SI[1] & SM	250	10^3 à 10^4	1 j	Centrale solaire à héliostats + tour. Stockage journalier à sels fondus. Appoint par brulage CS ou CG.
[8] > 600°C	HT Solaire direct + brulage CS ou CG	SI[1] & SM	200	10^3 à 10^4	0	Centrale solaire à héliostats + tour. pas de stockage Appoint par brulage CS ou CG.

(1) Voir (c) ci-dessous.

(2) Voir III.5.h.

(1) Une partie seulement de la superficie (20 à 30 %) est industrialisée.

Les productivités indiquées en chaleur (MT et HT) sont nettes des pertes diverses, mais pas de la consommation d'énergie noble (E) nécessaire au fonctionnement. Cette consommation peut être évaluée à 150 kWh(e) par TEP produite, c'est à dire :

(2) 1 TEP(E) pour 30 TEP(MT ou HT) produites.(1)

(c) La filière [6] est analogue à la filière [4](2). Elle a l'avantage de l'autonomie que procure le stockage à long terme. Elle est, par contre, limitée en température. Elle convient bien aux usages de séchage.

(d) Les filières [7] et [8] supposent un chauffage d'appoint pour pallier le défaut de stockage à long terme, appoint par brulage de combustibles solides tirés de la bio-masse ou d'hydrogène(1).

Par ailleurs, il faut implanter ces installations dans les lieux particulièrement ensoleillés.

Ces filières peuvent assumer certains besoins MT ou HT de l'industrie chimique (par exemple pour la transformation de bio-masse en carburants(4)), de l'industrie des matériaux de construction (cimenterie par la filière [8]) ou de la métallurgie.

III.4. Production de combustibles et carburants

(a) Les combustibles fossiles étant exclus (épuisés ou réservés à meilleurs usages que leur brulage), il s'agit d'inscrire la production de combustibles ou carburants dans les cycles naturels du carbone et de l'hydrogène :

- Puiser ces corps dans les volants de la biosphère que sont le gaz carbonique de l'air et l'eau.
- Décomposer ces derniers par apport, direct ou indirect, d'énergie solaire pour les transformer en combustibles ou carburants.
- Restituer par brulage le carbone et l'hydrogène à leur état initial.

Le cycle est ainsi bouclé.

(b) La photo-décomposition industrielle directe du gaz carbonique ou de l'eau pose des problèmes dont la solution n'est pas en vue(5). On se limite donc, d'une part aux filières qui permettent de produire combustibles et carburants à partir de la bio-masse (s'appuyant donc sur la *photosynthèse* réalisée par les plantes), d'autre part à la production d'hydrogène par *électrolyse de l'eau*.

Le tableau III.3. et les commentaires qui le suivent présentent ces filières.

(1) Voir aussi V.4.h. à ce sujet.
(2) Voir III.2.c et d.
(4) Voir III.4.
(5) Voir III.6. et V.6.b. à ce sujet.

Tableau III.3. - Combustibles et carburants

TYPE INSTALLATION	TYPE ENERGIE	TYPE DE SOL	PRODUCTIVITÉ (TEP/ha x an)	CAPACITÉ UNITÉ (10^3 TEP/an)	BIO-M INCIDENTE (10^3 T/an)	SUPERFICIE UNITÉ (10^3 ha)	INDICATIONS
[9] COMPLEXE AGRO-ÉNERGETIQUE (135.000 ha)	CS	SF ou SA DÉCHETS	0.7	38	110	55	Prod. granulats : Broyage, séchage, agglomération. Rend. En. = 80%
		SF PLANT. EN.	4.0	40	120	10	
		SA CULT. EN.	6.2	31	90	5	
	CL ou CG	SF ou SA DÉCHETS	0.55	14	50	25	Prod CL ou CG : hydrocraking (500°C, 70 bars). Rend. En. = 70%
		SF PLANT. EN.	3.2	22	84	7	
		SA CULT. EN.	4.7	14	54	3	
	CG (Méthane)	SA DÉCHETS HUMIDES.	0.25	7	60	30	Fermentation anaérobie. Rend. En. = 30%
				166	508	135	TOTAUX UNITÉ
					DURÉE STOCKAGE (jours)		
[10] CENTRALE À HYDROGÈNE	CG (Hydr.)	SM	45 (1)	< 100	< 30 (1) (adsorpt.)	< 0.002	Centrale solaire électrogène + électrolyseurs (Rend. 60% à 70%)
			50 (1)	> 10^5	> 300 (1) (cavités souterr.)	> 2	

Les productivités indiquées pour la filière [9] sont nettes des diverses auto-consommations du système de production :

- Auto-consommation des installations de conversion par brulage d'une partie de la bio-masse incidente (2).
- Consommation des plantations et cultures énergétiques.

Ces dernières sont évaluées à 0,3 TEP/ha x an [0,25 (CL ou CG) + 0,05 (E[] (3).

La productivité indiquée pour la filière [10] est aussi nette des auto-consommations.

(c) La filière [9] concerne la production de combustibles ou carburants à partir de bio-masse.

Cette bio-masse peut être constituée de déchets organiques divers : *ordures ménagères*, *déchets de l'industrie du bois*, *déchets forestiers* (branchages), *déchets agricoles* (pailles non utilisées par

(1) Ces deux sous-filières se distinguent par le rendement des électrolyseurs (60 % pour les petites puissances et 70 % pour les grosses) et par la capacité de stockage. Des installations intermédiaires sont évidement possibles (voir III.4.g.).

(2) Voir (d) et (e) ci-après.

(3) Voir à ce sujet le tableau IV.7. en IV.3.b.

exemple). Elle peut aussi être produite par des *plantations* (par exemple de peupliers, roseaux ou eucalyptus selon la région) ou des *cultures à haut rendement* (par exemple fourragères).

Les rendements retenus ici sont les suivants :

(i) déchets (forestiers ou agricoles) : 2 tonnes/ha x an,
(ii) plantations énergétiques : 12 T/ha x an (α = 0,48 %),
(iii) cultures énergétiques : 18 T/ha x an (α = 0,72 %), (1)
(Tonnes de bio-masse sèche).

(d) La bio-masse peut être transformée en divers combustibles ou carburants : granulats, méthanol, hydrocarbures liquides ou gazeux.

Le *granulat* est un combustible solide se présentant sous forme de grains ($\emptyset$ < 1 cm) de bio-masse. On peut le manipuler comme un liquide : il remplace alors le fuel ou le charbon pour l'approvisionnement de chaudières ou de fours convenablement modifiés à cet effet(2).

Sa production à partir de bio-masse (broyage, séchage, agglomération) a un rendement énergétique de l'ordre de 90 %.

La transformation de bio-masse en *carburants liquides* ou *hydrocarbures gazeux* s'obtient avec un rendement énergétique de l'ordre de 70 % par des procédés d'hydrocracking sous pression vers 500°C [Ce rendement inclue toute l'énergie absorbée par la réaction].

Aux procédés précédents, s'ajoute la transformation de la bio-masse en *méthane* par fermentation, à l'abri de l'air, en cuves étanches. Le contenu énergétique du méthane ainsi obtenu représente environ 30 % de celui de la bio-masse de départ ; le résidu humide constitue un compost (environ 1 tonne par tonne de bio-masse sèche incidente). Les déchets humides et le fumier sont spécialement favorables à ce type de transformation.

(e) Les *complexes agro-énergétiques*, dont la filière [9] donne un exemple, sont des éléments essentiels du système énergétique envisagé : ce sont eux qui produisent *la totalité* des combustibles solides et carburants liquides consommés par le pays(3), ainsi que les produits de base de la chimie organique actuellement tirés du charbon et des hydrocarbures naturels.

Chacun des ces complexes est prévu pour traiter la bio-masse produite au voisinage sur 100 à 150.000 hectares : déchets usuels d'exploitations forestières ou agricoles, déchets organiques domestiques ou industriels locaux, récolte des plantations ou cultures énergétiques. Les proportions de ces apports peuvent varier selon la région d'implantation de même que peuvent varier les proportions des combustibles et carburants produits.

Dans l'exemple que constitue la filière [9] ces diverses proportions correspondent grosso-modo à la moyenne nationale envisagée(4).

L'usine se trouve à moins de 20 km des terres productrices. Cela permet le transport de la bio-masse (400.000 à 600.000 T/an) directement des champs ou zones forestières à l'usine de traitement, éventuellement après broyage. Les installations industrielles nécessaires au traitement ressemblent à celles d'une très petite raffinerie [production de 55.000 TEP/an de CL ou CG et de 110.000 TEP/an de CS], avec, en plus, l'accueil et le stockage de la bio-masse incidente. La chaleur MT requise par la conversion peut éventuellement être fournie par une centrale solaire de la filière [7](5) qui fournit aussi l'électricité locale (filière [15])(6) : le rendement de conversion en CL ou CG dépasse alors 80 %. Un apport d'hydrogène améliore aussi ce rendement.

(1) α est le rendement de conversion de l'énergie solaire en bio-masse (voir III.1.γ.) calculée avec l'équivalence (8) en II.4.b.

(2) Il peut aussi être converti en coke (Voir II.3.a).

(3) et pas seulement pour les zones rurales avoisinantes ; ils produisent aussi du méthane consommé localement, et éventuellement, d'autres hydrocarbures gazeux.

(4) Voir V.4.c. (5) Voir tableau III.2.

(6) Voir III.5.e.

(f) On souligne le caractère décentralisé de cette production : un complexe agro-énergétique pour quelques cantons ruraux. Les cuves de fermentation méthanique peuvent même être décentralisées au niveau communal, voire au niveau des fermes moyennes.

On souligne aussi que l'introduction de ces complexes n'implique pas d'organisation agricole spéciale (en particulier pas de collectivisation) : ils peuvent par exemple constituer de grosses coopératives.

(g) La filière [10] représente une installation de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau : l'électricité est produite ici par une centrale solaire électrogène d'une productivité moyenne de 190 TEP/ha x an(1). L'électricité peut aussi être produite par une centrale hydraulique. Les électrolyseurs peuvent avoir des capacités très variables : de 10 kW(e) à plusieurs centaines de MW(e) en groupant de nombreux éléments. Le rendement des gros électrolyseurs (quelques MW(e) au moins) est supérieur à 70 % ; il tombe à 60 % pour les petits.

Un électrolyseur peut fonctionner 5 à 6 000 heures par an. La taille des unités est surtout dictée par le stockage de l'hydrogène produit : pour de petites unités, le stockage, pour quelques semaines, est possible par adsorption sur des métaux. Pour de grosses unités, il est possible, à long terme, en cavités souterraines ; le volume du stockage est alors nécessairement important (plusieurs millions de m^3) mais les unités productrices peuvent être décentralisées.

Le transport de l'hydrogène par gazoduc et son utilisation comme gaz distribué ne posent pas de problème.

(h) L'hydrogène est essentiellement réservé à des usages thermiques spécifiques (cuisine(2) ou chauffage industriel HT(3)) à la production de force motrice (fixe ou mobile) ou d'électricité de pointe via des piles à combustibles et des turbines à gaz(4).

III.5. Production d'électricité

(a) On présente séparément, d'une part les filières hydrauliques et la filière éolienne, d'autre part les filières solaires électrogènes directes(5).

Rappelons que l'on mesure l'énergie électrique en TEP (équivalent thermique pour la produire) selon l'équivalence :

1 TEP = 4 500 kWh,

qui introduit un rendement conventionnel de 0,39 pour la conversion de la chaleur en électricité. Il en résulte que les productivités indiquées pour l'électricité sont amplifiées par un facteur 1/0,39 = 2,56 si on envisage des usages thermiques ou chimiques (production de combustibles). Par exemple (filière [10])(6) une productivité de 45 TEP/ha x an en hydrogène électrolytique (avec rendement d'électrolyse de 60 %) correspond à une productivité en électricité de :

(45/0,6)/0,39 = 190 TEP/ha x an.

(1) Voir III.5.a et h.
(2) Voir III.2.i.
(3) Voir III.3.a.
(4) Voir III.5.h.
(5) Voir tableaux III.4. et III.5. et commentaires suivant.
(6) Voir tableau III.3.

Tableau III.4. - Electricité hydraulique et éolienne

TYPE INSTALLATION	TYPE ENERGIE	TYPE DE SOL	PRODUCTIVITÉ (TEP/hexan)	CAPACITÉ UNITÉ (TEP/an)	DURÉE STOCKAGE (jours)	INDICATIONS.
11 Usine au fil de l'eau	E	SM plan d'eau	Moyenne: 250		0	Utilise le débit tel qu'il se présente : Durée de remplissage < 2 heures.
12 Eclusée	E	SM plan d'eau	50 à 500 ;	< 2×10^5	< 15 (1)	Durée de remplissage entre 2 et 400 heures.
13 Lac	E	SM lac	Moyenne: 150		15 (1) à 200	Durée de remplissage > 400 heures.
14 Eoliennes	E	SM	150	< 50	< 15 (2)	Puissance max installable : 1 MW(e) pour 3 ha. Durée moyenne de fonctionnement : 2000 heures/an.
				50 à 1500	0	

Les productivités indiquées sont nettes des auto-consommations.

(1) Stockage hydraulique gravitaire.

(2) Stockage chimique par batteries ou mécanique par volants.

Tableau III.5. - Electricité solaire directe.

TYPE INSTALLATION	TYPE ENERGIE	TYPE DE SOL	PRODUCTION (TEP/hstau)	CAPACITÉ UNITÉ (TEP/an)	DUPÉE STOCKAGE (jours)	INDICATIONS.
15 Filière thermodynamique (THEM (1))	E	SI (2) & SM	200	10^3 à 5×10^4	1	centrale solaire à héliostat + tour. Stockage journalier à sels fondus. Appoint éventuel par brulage CS.
16 Filière Thermodynamique (THEK (1))	E	SM	180	$< 10^2$	< 15 (3)	héliostats autonomes (50 m² de verre ; 10 KW(e)) Une chaudière + turbo-alternateur HT à air par héliostat ; concentr. > 1000.
				$> 10^2$	0	
17 Filière photovoltaïque sans concentration.	E	SI	250	$< 10^2$	< 15 (3)	L'absence de concentration permet d'utiliser le rayonnement diffus, et la totalité de la surface au sol.
				10^2 à 10^3	0	
18 Filière photovoltaïque avec concentration	E	SM	100	$< 10^2$	< 15 (3)	héliostats autonomes (50 m² de verre ; 5 KW(e)) Un capteur photovoltaïque par héliostat ; Concent. ≃ 100.
				$> 10^2$	0	

Une capacité (en équivalent thermique)(4) de 100 TEP/an correspond à une puissance installée de 225 kW(e) pour 2 000 heures/an de fonctionnement.

(1) simple référence indicative aux projets actuels.

(2) une partie seulement de la superficie (20 à 30 %) est industrialisée.

(3) stockage chimique par batteries ou mécanique par volants.

(4) Voir (a) ci-dessus.

(b) La productivité des filières hydrauliques correspond au quotient de la capacité de l'unité par la superficie du plan d'eau ou du lac.

Pour les *usines au fil de l'eau*, on part de l'exemple du Rhône, entre Lyon et la mer. En 1976, les 7 usines existantes ont produit 8,8 TWh ; des usines d'une productivité de 1,2 TWh sont en chantier ou en projet. On obtient donc une capacité totale de 10 TWh/an. Par ailleurs, la superficie occupée est de 7 500 ha (250 m de large sur 300 km de long). D'où une productivité de 300 TEP/ha x an ($300 = 10 \times 10^6/4,5 \times 7\,500$) pour le Rhône. Il est raisonnable de prendre un chiffre un peu plus faible (250 TEP/ha x an) comme moyenne nationale.

Les *barrages (écluses et lacs)*, en 1976, ont produit 21 TWh pour 32.600 hectares occupés (dont 15 TWh, i.e 3,3 MTEP, sont stockables) ; soit une productivité moyenne de 145 TEP/ha x an[1].

Autour de cette moyenne, la variance est forte :

- Tignes 500 TEP/ha x an (750 GWh/an, 330 ha).
- Serre-Ponçon 50 TEP/ha x an (700 GWh/an, 3 100 ha).

(c) Le potentiel marémoteur[2] des îles Chausey (Baie du Mont Saint Michel) n'a pas été inclu dans la filière [11], vu son caractère gigantesque[3]. La capacité peut en être de 7 MTEP/an, pour une surface du bassin de 80.000 ha ; soit une productivité de 90 TEP/ha x an.

(d) Dans l'évaluation des superficies occupées par les filières hydrauliques, on n'a pas pris en compte celle des lignes à haute tension (actuellement 35.000 km). Cela conduit, pour une largeur moyenne de 30 m, à 100.000 ha de surface mixte (SM)[4].

(e) Les diverses filières de conversion directe de l'énergie solaire en électricité[5] ne permettent pas de stockage à long terme.

La filière [15] comporte une centrale solaire à héliostats + tour analogue à celle de la filière [7]. Mais la chaleur recueillie par la chaudière située au sommet de la tour est transformée en électricité par un turbo-alternateur.

Les installations des filières [16] et [18] sont de tailles très variables, de 1 à plusieurs dizaines de milliers d'héliostats[6].

Le stockage de l'énergie produite n'est possible que pour les petites unités, par exemple sous forme chimique par batteries ou mécanique par volants.

(f) La productivité des filières photo-voltaïques est beaucoup plus élevée pour la filière [17], sans concentration, que pour la filière [18], avec concentration. En effet, la concentration, ne permet pas d'utiliser le rayonnement diffus et impose un taux d'occupation du sol à peine supérieur à 30 % (cela à cause des ombres qui se font mutuellement les concentrateurs au cours de la journée). Par contre, la concentration permet une économie énorme de photopiles (très couteuses) et une diminution notable des pertes électriques par interconnexions (on a admis dans les deux cas un rendement de photopiles de 15 %, moins 5 % de pertes électrique pour la filière [17] et 3 % pour la filière [18]). On a limité la filière sans concentration aux petites unités [< 300 kW(e)] pour des raisons économiques[7].

(g) Pour pallier le défaut de stockage dans les systèmes thermodynamiques, on peut avoir un chauffage d'appoint par brulage de CS ; cela n'est envisagé que dans la filière [15] où la chaudière est assez grosse.

(1) $145 = 21 \times 10^6/4,5 \times 32.600$.

(2) Une usine marémotrice est à la fois solaire et lunaire !

(3) Mais cette installation n'est pas éliminée à priori (Voir V.4.d.).

(4) Voir III.1.8.

(5) Voir tableau III.5.

(6) Chaque héliostat correspond à une puissance électrique installée de 5 à 10 kW(e) selon la filière.

(7) Cette politique peut être remise en cause si l'on parvient à produire des photopiles à très bas prix.

(h) Les centrales fournissant l'électricité nécessaire à la production d'hydrogène électrolytique (filière [10][1]) sont de l'une ou l'autre des filières électrogènes [11] à [18]. A côté de ses usages spécifiques[2], l'hydrogène peut être reconverti en électricité au moyen de piles à combustible (rendement 65 %) ou de turbines à gaz (rendement 45 %). L'hydrogène apparaît donc comme un moyen de stocker l'électricité à plus ou moins long terme. La productivité de l'électricité en question est alors de l'ordre de 70 TEP/ha x an[3] ; cette valeur est comparable à celle des barrages. Ce mode de stockage de l'électricité intervient dans la régulation des réseaux électriques[4]. Il n'est avantageux que pour les usages spécifiques de l'électricité (y compris l'action des pompes à chaleur[5]). Pour les usages thermiques MT ou HT (cuisine ou chaleur industrielle), l'hydrogène et les CS sont utilisés de préférence à l'électricité (sauf lorsque l'usage des pompes à chaleur est possible).

III.6. Autres filières

Le catalogue présenté, ci-dessus, n'est pas exhaustif. Plusieurs filières qui sont actuellement en cours d'étude et qui semblent prometteuses n'ont pas été prises en compte par manque d'informations précises. On peut citer entre autres les cultures aquatiques, la photo-électrolyse de l'eau, les centrales utilisant l'énergie thermique des mers ou l'énergie des vagues, ... On a préféré se limiter à des filières dont la faisabilité technique est indiscutable, afin que la discussion du régime à long terme proposé porte principalement sur le niveau des besoins à satisfaire et l'organisation du système énergétique plutôt que sur sa base technique[6].

(1) Voir tableau III.3. et III.4.g.
(2) Voir III.4.h.
(3) 70 = 45 x 0,60/0,39.
(4) Voir V.4.f,g. et V.5.
(5) Voir III.2.a. / III.3.a. / V.3.b. / V.3.f.
(6) Voir aussi I.5.b. et V.6. à ce sujet.

Chapitre IV
EVALUATION DES BESOINS ENERGETIQUES DE LA FRANCE DANS UNE PERSPECTIVE A LONG TERME POST-INDUSTRIELLE

IV.1. Préliminaire : Demande et besoins

(a) L'étude d'un régime d'auto-subsistance énergétique à long terme pour la France[1] suppose une évaluation des consommations énergétiques du pays pour cet avenir. Cette évaluation est envisagée en IV.2. et IV.3., ci-dessous, selon une démarche en termes de besoins qui s'éloigne de celle de la planification actuellement en vigueur. Cette planification se limite presque toujours au moyen terme(25 ans) ; les évaluations de consommations avenir apparaissent très généralement comme des *prévisions de la demande*. Ces prévisions s'appuient, d'une part sur les consommations actuelles et d'autre part sur des *hypothèses de croissance* : extrapolations plus ou moins amendées des tendances du passé récent ou alignement sur les Etats-Unis. Aussi, dans la plupart de ces études, l'analyse du processus physique de consommation ou de sa finalité en termes de niveau et de genre de vie de la population ne joue qu'un rôle accessoire : le raisonnement "par croissance" tient lieu de ces analyses.

(b) La démarche précédente ne donne rien pour l'anticipation à long terme proposée[2](si ce n'est la confrontation aux exponentielles croissant à l'infini ..). Opposant donc *évaluation des besoins* à *prévision de la demande*, on tente ici certaines des analyses mentionnées ci-dessus, de façon à déduire les consommations énergétiques d'une *évaluation intrinsèque des besoins* dans la perspective à long terme envisagée ; évaluation intrinsèque, déduite d'hypothèses sur la démographie, le niveau de vie de la population et le potentiel (l'état technique) du système de production et d'échanges[3], cela en se référant le moins possible à la situation actuelle[4]. Cette situation ne doit intervenir qu'au stade suivant de la démarche : stade du scénario de raccordement du présent à l'avenir anticipé.

(c) En fait, une telle évaluation intrinsèque des besoins suppose la détermination des niveaux d'activités industrielles, adéquats aux critères retenus[5]et susceptibles de satisfaire à des consommations finales données[6] et de permettre l'équilibre des échanges inter-industriels et extérieurs du pays.

Ce problème est d'une extrême difficulté car il suppose un modèle de ces échanges inserrant les hypothèses faites sur l'état de la technologie et de l'environnement international envisagé. Devant l'absence d'un tel modèle, on se contente d'évaluations plus rudimentaires qui se limitent aux consommations d'énergie (alors que tous les biens devraient intervenir) et se réfèrent à l'état actuel de l'activité ou de l'équipement pour la détermination de certains coefficients techniques globaux[7].

(d) Les hypothèses sur lesquelles s'appuient les évaluations de besoins faites ci-dessous en § IV.2. et IV.3. seront explicitées chemin faisant. Elles sont des expressions quantitatives de la conception post-industrielle de l'économie du pays que schématisent les points suivants[8] :

(1) Population avoisinant 60 millions d'habitants.

(2) Niveau de vie confortable pour tous, mais avec économie systématique.

(3) Activité industrielle stationnaire[9] et minimale pour satisfaire aux besoins de la population et permettre l'équilibre d'échanges extérieurs restreints.

(1) Voir V.1. et V.2.
(2) Voir V.1.a.
(3) Voir (c) ci-dessous.
(4) Voir cependant IV.3.a.
(5) Points (3), (4) en d.
(6) Consommations de tous les biens intervenant pour réaliser le niveau de vie envisagé ; points (1), (2) en d.
(7) Voir aussi IV.3.a.
(8) Voir aussi I.2.c. et I.3.b.
(9) Sans croissance systématique, ce qui ne veut pas dire figée.

(4) Approvisionnement énergétique, renouvelable et auto-subsistant, basé sur la captation locale de l'énergie solaire.

(e) On souligne le caractère "bouclé" du problème : les besoins dépendent du système d'approvisionnement énergétique[1] et, inversement, ce dernier dépend des besoins. Ainsi, à un niveau fin d'analyse, c'est à la résolution d'un système d'équations implicites que l'on serait confronté pour la détermination simultanée des besoins et du système d'approvisionnement énergétique. Au niveau rudimentaire où on se limite ici, on peut tourner la difficulté en faisant au préalable un dimensionnement grossier du système énergétique.

Dans l'étude faite en IV.2. et IV.3. ci-dessous, cette démarche de dimensionnement préalable n'est pas reproduite : on se limite à la vérification de cohérence qui consiste à introduire directement les niveaux obtenus (pour le système d'approvisionnement retenu[2]) et à évaluer les besoins à partir de ces niveaux. La vérification que ces niveaux sont satisfaisants pour assumer les besoins ainsi calculés est l'objet du chapitre V[3].

IV.2. Evaluation des besoins énergétiques directs de la population

Les secteurs concernés sont *le résidentiel, le tertiaire* et *les transports de personnes*. Il s'agit pour ces secteurs de concrétiser, d'exprimer quantitativement, la condition de niveau de vie "confortable pour tous mais avec économie systématique" énoncée ci-dessus[4].

(a) *Secteur résidentiel*. Les besoins de la population sont analysés comme ceux des ménages[5]. On admet d'abord que 60 millions d'habitants (hypothèse démographique[6]) correspondent à :

(1) 20 millions de ménages[5].

On admet ensuite que le parc de logements est défini par :

(2) 1 logement (à alimenter en énergie) par ménage.

Ce qui donne :

(3) 20 millions de logements (à alimenter en énergie).

Les conditions (1) et (2) n'impliquent pas l'élimination des résidences secondaires[7] mais seulement leur utilisation rationnelle, avec régulation convenable du chauffage en cas d'occupation partielle.

On admet par ailleurs que les logements possèdent en moyenne les caractéristiques techniques suivantes qui correspondent à un niveau de vie confortable quoique sans gaspillage :

- Superficie = 100 m^2.
- Bonnes isolation et régulation thermiques, avec :

(4) G moyen = 1 kcal/m^3 x heure x °C.

Pour une température intérieure de 20°C, cela donne :

(5) 13.000 thermies/an pour le chauffage, c'est à dire :

(6) 50 thermies/m^3 x an[8] ; avec en plus :

(7) 100 kWh(e)/an pour la régulation du chauffage.

(1) Point (4) ci-dessus.
(2) Voir en IV.3.b. le commentaire du tableau IV.6., en IV.3.c. la discussion précédant la relation (6), et en IV.3.e. celle entourant le tableau IV.16.
(3) Voir V.2.c.
(4) en IV.1.d.(point (2)).
(5) Le terme "ménage" est entendu au sens large de cellule sociale élémentaire (de 3 personnes en moyenne) disposant d'un logement [relation (2)] et d'un véhicule [relation (18) en IV.2.c.], plutôt qu'au sens démographique (2,65 personnes en moyenne actuellement).
(6) Voir le point (1) en IV.1.d. ci-dessus.
(7) 1,6 million sur 20,4 millions de logements en 1973, dont 1,5 vacants.
(8) 50 th/m^3 x an = 13.000 th/an/100 m^2 x 2,6 m.

* Eau chaude distribuée largement (10 à 12 thermies par jour[1]).

* Cuisine au gaz (2,5 à 3 thermies par jour).

* Equipement électro-ménager complet donnant une consommation totale d'électricité (y compris l'éclairage et la régulation du chauffage) de :

(8) 2 200 kWh(e)/an.

Le tableau suivant récapitule les besoins d'un logement :

Tableau IV.1. - Besoins d'un logement

Usage	type énergie	Besoin annuel (TEP/an)
chauffage	BT	1.3
eau chaude	BT	0.4
cuisine	CG	0.1
appareils, éclairage & régulation chauffage	E	0.5
Totaux		2.3

Ce qui donne, au niveau national, d'après (3),

Tableau IV.2. - Besoins du secteur résidentiel (MTEP)

BT	CG	ES	total
34	2	10	46

Dans ce tableau, la chaleur BT est entendue comme énergie finale. On renvoie au tableau V.1. et au § V.2.a. pour ce qui est des énergies distribuées correspondantes.

(b) *Secteur tertiaire.* Il s'agit d'évaluer :

* Le volume des locaux à chauffer.
* Les besoins de la cuisine (hotels, hopitaux, cantines).
* Les besoins spécifiques en électricité.

(1) Contre une moyenne de 7,5 Th/jour x log[t] en 1975.

En ce qui concerne le *volume des locaux*, à défaut d'une évaluation intrinsèque directe, on part de la situation actuelle : en 1975, le volume des locaux tertiaires était de 1 060 Mm^3. On propose à long terme le chiffre de 1 400 Mm^3, avec la répartition suivante :

Tableau IV.n. - Volumes de locaux tertiaires

Type locaux	Volume Locaux (MM^3)	
	long terme	1975
Bureaux, Commerce	550	500
Enseignement	400	300
Sanitaire, Sociaux	250	120
Hotels	150	100
Divers	50	40
Totaux	1400	1060

Le volume de bureaux et commerces par habitant[1] reste ce qu'il est actuellement, tandis que celui des locaux d'enseignement, locaux sanitaires et sociaux, hotels, augmente substantiellement pour permettre une baisse des effectifs par classe dans l'enseignement, une vie collective plus nourrie, etc ...

En supposant une isolation et une régulation thermique moyenne, avec :

(9) G moyen = 1,3 kcal/m^3 x heure x °C

et, en tenant compte de l'utilisation partielle des locaux, on évalue à :

(10) 60 Thermies/m^3 x an

les besoins unitaires pour le chauffage et l'eau chaude[2]. Ce qui donne, pour 1 400 Mm^3 :

(11) 8,5 MTEP(BT) pour le chauffage.

En ce qui concerne la *cuisine*, on évalue la consommation à 50 % de celle du secteur résidentiel (en admettant qu'un repas sur trois en moyenne est pris "dehors") ; ce qui donne :

(12) 1 MTEP(CG) pour la cuisine

(en la supposant toujours faite au gaz).

En ce qui concerne les *besoins spécifiques en électricité*, on peut distinguer :

- la *régulation du chauffage et l'aération*. On admet un besoin unitaire un peu supérieur au besoin correspondant d'un logement[3], soit 0,6 kWh/m^3 x an ; ce qui donne, pour 1 400 Mm^3, *0,8 TWh*.

(1) 9,5 m /hab. en 1975.

(2) Comptant 10 Thermies/m^3 x an pour l'eau chaude, il reste 50 Thermies/m^3 x an pour le chauffage ; ce qui correspond, avec G = 1,3 kcal/m^3 x heure x °C, à D = 1 600 degrés x jours (50 = Q_1 = G x 24 x D/1 000).

(3) 0,4 kWh/m^3 = 100 kWh/260 m^3 - d'après (7).

* Les *appareils de cuisine* (Frigos, lave vaisselles, ...).

D'après l'hypothèse sur la cuisine du tertiaire faite ci-dessus (50 % de celle du résidentiel) et en admettant que, pour un logement, 25 % de l'énergie électrique consommée l'est par les appareils de cuisine[1], on obtient : 5,5 TWh. (0,5 x 0,2 x 2 200 x 20 = 5,5 x 10^3).

* L'*entretien des locaux* (ascenseurs, nettoyage, ...) : on admet qu'il réclame en moyenne 2 kWh/m² x an[2], ce qui donne, pour 540 Mm² (540 Mm² = 1 400 Mm³/2,6 m), 1,1 TWh.

* l'*éclairage des locaux* : on admet qu'il réclame en moyenne :

(13) . 15 W/m²[3] pendant 800 heures/an ;

ce qui donne, pour 540 Mm², 6,5 TWh (15 x 800 x 540 = 6,5 x 10^6).

* L'*éclairage public* : on prend une consommation de :

(14) 50 kWh/hab x an[4] ;

ce qui donne, pour 60 Mhab, 3 TWh[5].

* Les *autres usages spécifiques de l'électricité* (chauffage électrique exclu).

Ils concernent toutes les machines de bureaux et ordinateurs, les petites machines employées par les artisans, le matériel audio-visuel collectif, les matériels des hopitaux, des laboratoires, ... On admet une puissance installée de 100 W/m² (1 kW par pièce de 10 m²) et 2 000 heures/an de fonctionnement sur une surface de 50 Mm² (5 millions de pièces de 10 m² correspondant à un nombre analogue d'employés) ; ce qui donne 10 TWh (100 x 2 000 x 50 = 10 x 10^6)[6].

Au total, on obtient, 26,0 TWh ; c'est à dire, 6,0 MTEP(E) pour l'électricité[7].

D'où, d'après (11), (12), (15) :

Tableau IV.3. - Besoins du secteur tertiaire (MTEP).

BT	CG	ES	total
8.5	1	6.0	15.5

La chaleur BT est entendue dans ce tableau comme dans le tableau IV.2.[8].

(c) *Transport de personnes*. Vu la charge affective de l'automobile dans la société occidentale, la détermination d'une politique des transports de personnes est une tâche extrêmement délicate qui sort complètement du cadre des évaluations rudimentaires tentées ici.

Restant dans ce cadre, on envisage, pour la perspective à long terme, un système de transports des personnes schématisé par les indications suivantes :

* Le centre des villes est aménagé pour favoriser systématiquement les transports en commun et les cycles, avec un taux moyen de déplacement, pour les transports en commun de :

(1) c'est à dire, d'après (8), 550 kWh/log[t] x an.
(2) c'est à dire, 200 kWh/an sur 2 200 pour un log[t] de 100 m²(voir (8)).
(3) 2 lampes de 75 Watts par pièce de 10 m².
(4) A Paris, en 1977, 46 kWh/hab x an, et 37 kWh/hab x an comme moyenne française.
(5) 2 TWh en 1975.
(6) La quantité actuelle correspondante semole être très mal connue : les évaluations de la somme de cette quantité et de l'éclairage pour 1975 varient entre 20 et 30 TWh.
(7) En 1975, 7,6 MTEP dont 1 à 2 pour le chauffage.
(8) Voir l'alinéa suivant le tableau IV.2.

(16) 2 000 km/an par citadin[1]

et avec une population concernée par ces transports de :

(17) 25 millions de citadins (habitants ou passagers[2]).

* Pour les déplacements locaux (< 100 km), la population dispose de voitures (possédées, louées, banalisées, ..., avec un taux moyen d'utilisation de :

(18) 8 000 véhicules x km/an par ménage.

Pour 20 millions de ménages, cela fait :

160 x 10 millions de véhicules x km par an[3].

* Les déplacements à distance (> 100 km) se font essentiellement en chemin de fer (une organisation convenable permettant la transition commode des véhicules locaux aux trains), avec un taux moyen de déplacement de :

(19) 3 000 km/an par habitant[4].

* Les déplacements par air sont essentiellement limités aux très longues distances, avec un taux moyen de déplacement de :

(20) 400 km/an x hab[5].

Ce taux peu élevé signifie que les déplacements par air ne sont pas banalisés. En fait, on admet que l'emploi généralisé des techniques audio-visuelles de communications à distance permet d'éviter nombre de déplacements de personnes.

A ces hypothèses relatives au genre de vie, il faut adjoindre les données concernant les consommations unitaires des divers moyens de transport :

(21) 15 TEP/MVgr x km pour les transports urbains collectifs[6]

[métro (E), tramway (E), mini-bus hybride (CG)[7]]

(22) 0,5 TEP/10 000 km pour les voitures individuelles[8]

[voitures hybrides[7] alimentées avec un carburant liquide (CL) ou avec de l'hydrogène (CG), éventuellement utilisé dans des piles à combustible pour une propulsion électrique. La consommation indiquée est alors sans doute surévaluée : elle correspond à 5 litres d'essence/100 km].

(23) 12 TEP/MVgr x km pour les chemins de fer (E),

(24) 100 TEP/MVgr x km pour les avions (CL).

En conjuguant ces coefficients avec les hypothèses (16), (20) ainsi que (1) et en ajoutant 0,5 MTEP (CL) pour les extras (Motocycles[9], sport automobile, ...), on obtient les évaluations suivantes :

(1) En 1975, environ 1 000 km/an x hab dans la Région Parisienne.
(2) En 1973, 29 Mhab vivaient dans les agglomérations de plus de 100 000 hab., dont 10 M dans les centres des villes.
(3) Chiffre analogue à celui de 1973 où il y avait 14 M de voitures faisant en moyenne 11 500 km par an (8 x 20 = 14 x 11,5).
(4) En 1973, 850 km/an x hab en moyenne (53 Mhab).
(5) En 1973, 370 km/an x hab en moyenne (53 Mhab).
(6) M Vgr x km = Millions de Voyageurs x km.
(7) Un véhicule hybride possède, en plus du moteur, un système de stockage de l'énergie et de récupération de l'énergie de freinage permettant un moteur de puissance limitée (donc une faible consommation), tout en conservant de bonnes accélérations.
(8) Ou encore 50 TEP/MVgr x km avec 1 personne à bord et 25 TEP/MVgr x km avec 2 ; comparer ces chiffres avec ceux des transports collectifs.
(9) En 1973 : 0,3 MTEP.

Tableau IV.4. - Besoins des transports de personnes.

Mode de transport	Trafic (2) (10^3 MVgr x km)	Besoins énergétiques (MTEP)			
		CL	CG	E	Total
Tr. collectifs urbains	50		0.4	0.4	0.8
motocycles, sport auto, ...	5	0.5			0.5
Voitures (1.5 pers./voit.)	240 (3)	5.5	2.5		8.0
chemins de fer	180			2.2	2.2
Avions	25	2.5			2.5
Totaux :	500	8.5	2.9	2.6	14.0

La part réservée au gaz correspond à des véhicules alimentés avec de l'hydrogène[3] : autocars et autobus (0,4 MTEP) ; voitures non particulières (commerciales, banalisées, louées) 2,5 MTEP (CG) sur un total de 8 MTEP[4].

Pour référence, en 1973, les transports de personnes ont consommé 16,4 MTEP, dont 12,5 pour les voitures, 1,1 pour les chemins de fer et 1,9 pour les avions.

IV.3. Evaluation des besoins énergétiques de l'agriculture, de l'industrie et des transports de marchandises.

(a) *Remarque méthodologique*. Contrairement aux cas précédents, il ne semble pas possible d'évaluer les besoins énergétiques de ces secteurs sans se référer à l'état actuel de l'appareil de production. Cela tient, entre autres, à la complexité du système des échanges entre sous-secteurs de production et à la complexité correspondante des hypothèses à faire pour préciser l'état de l'économie dont on veut évaluer les besoins énergétiques[5].

Nous ne prendrons donc en compte cette complexité que par certaines de ses caractéristiques globales actuelles (par exemple : répartition des terres pour l'agriculture ou part de la production des biens d'équipement pour l'industrie), pour évaluer des besoins énergétiques à long terme à partir de deux types d'hypothèses :

- d'une part des hypothèses relatives au degré actuel de saturation de la demande.
- d'autre part des hypothèses relatives à l'influence sur les consommations d'énergie de la restructuration de l'appareil de production envisagé (par exemple : en vue d'une alimentation moins carnée ou d'une plus grande longévité des biens d'équipement).

(b) *Agriculture*. Il est utile de distinguer l'agriculture à *finalité alimentaire* (cultures et élevage) ou à *finalité industrielle* (cultures industrielles), de l'agriculture à *finalité énergétique*[6] et de la *sylviculture* à finalité industrielle ou à finalité énergétique.

(1) MVgr x km = Million de voyageurs x km.
(2) 160 x 10^3 MVéhicules x km donne 160 x 10^3 MVgr x km avec 1 personne/voiture et 240 x 10^3 MVgr x km avec 1,5 personne/voiture.
(3) Voir (21) et (22).
(4) Voir aussi V.3.c. à ce sujet.
(5) Voir IV.1.c. à ce sujet.
(6) Voir III.4.

L'agriculture énergétique est actuellement quasi-inexistante, mais joue un rôle important dans la perspective envisagée. Ses consommations énergétiques (ainsi que celles de la sylviculture énergétique) sont comptabilisées comme auto-consommation des installations de production[1] ; celles de la sylviculture à finalité industrielle font partie traditionnellement de celles de l'industrie. On n'évalue donc que les besoins énergétiques de l'agriculture à finalité alimentaire ou industrielle, mais en envisageant l'ensemble des utilisations du territoire.

On part de la répartition actuelle des terres, caractéristique globale[2] qui permet de situer le potentiel du territoire du point de vue des sols :

Tableau IV.5. - Répartition du territoire français en 1975 (unité : Million d'hectares).

Cultures vivrières	11,9
(dont céréales)	(9,5)
Vigne et vergers	1,6
Cultures fourragères	4,6
Cultures industrielles	0,5
Total des cultures alimentaires et industrielles	18,6
Prairies	13,9
Surface agricole non utilisée	2,8
Total surface agricole	35,3
Surface boisée	14,5
Surface non agricole	5,1
Surface totale	54,9

Pour le long terme envisagé, on propose les modifications suivantes :

- Moindre importance de l'élevage qui se traduit par l'extension des cultures vivrières (dans un rapport un peu inférieur au rapport 60/53 des populations), au détriment des plantes fourragères (élevage plus extensif, de montagne) et des prairies.

- Extension des cultures industrielles, principalement pour produire de la bio-masse servant de matière première, en remplacement du pétrole, à l'industrie chimique organique (dont celle des matières plastiques).

- Reconversion des parties médiocres du vignoble, en particulier à des cultures industrielles ou énergétiques.

- Implantation de cultures ou plantations énergétiques[3] sur certaines terres agricoles actuellement non utilisées ou consacrées aux plantes fourragères ou au vignoble.

- Exploitation en plantations énergétiques de surfaces boisées (taillis simples) actuellement laissées à l'abandon ; entretien productif de toutes les surfaces sous futaies parallèlement à une augmentation de la production des bois utilisés comme matériaux de structure.

(1) Voir l'alinéa suivant le tableau III.3. en III.4.b. (2) Voir (a) ci-dessus.
(3) Voir III.4.c.

Ces modifications sont exprimées quantitativement par le tableau IV.6. ci-après. Il est raisonnable d'admettre qu'au prix d'une modération des excès de consommation et gaspillages actuels concernant la viande et les produits laitiers, elles permettent de nourrir largement la population sans altérer le précieux caractère excédentaire de l'agriculture française du point de vue des échanges extérieurs.

Tableau IV.6. - Répartition du territoire dans la perspective à long terme (unité : Million d'hectares).

Cultures vivrières	13,0	
(dont céréales,	(10,5)	
et centrales solaires SM[1])	(0,1)	[0,1]
Vignes et vergers	1,1	
Cultures fourragères	3,0	
Cultures industrielles	1,8	
Total des cultures alimentaires et industrielles	18,9	
Prairies	11,5	
(dont centrales solaires SM[1])	(0,4)	[0,4]
Cultures énergétiques	2,5	[2,5]
Surface agricole non utilisée	1,0	
Total surface agricole	33,9	
Surface boisée	15,6	
(dont plantations énergétiques)	(5,0)	[5,0]
Surface non agricole	5,4	
(dont centrales solaires SI[1])	(0,2)	[0,2]
Surface totale	54,9	[7,6]

Les cultures industrielles[2] produisent une partie des matières premières de la chimie organique[3], l'exploitation forestière fournit l'autre partie. Pour produire l'équivalent bio-masse des 12 MTEP requis[4], c'est à dire 30 MT, il faut, par exemple, 1 Mha de cultures et 1 Mha de forêt avec les rendements (ii) et (iii) indiqués en III.4.c.[5].

A droite du tableau, figurent (entre crochets) les surfaces à finalité énergétique : cultures énergétiques (2,5 Mha), plantations énergétiques (5 Mha) et centrales solaires (0,7 Mha). Parmi les surfaces couvertes par ces dernières, une partie (0,5 Mha) reste utilisable pour l'élevage ou certaines cultures (SM). Tandis que le reste est industrialisé (SI)[6].

Ces indications sont tirées du bilan étudié au chapitre V[7]; elles sont introduites ici pour montrer la cohérence du système envisagé[8] du point de vue superficies.

Afin d'évaluer les besoins énergétiques correspondant à l'activité agricole sous jacente au tableau IV.6., on introduit les coefficients techniques moyens suivants :

(1) Voir III.1.8. et ci-après.
(2) 1,8 Mha contre 0,5 en 1975.
(3) Voir ci-dessus.
(4) Voir en IV.3.c. l'alinéa suivant le tableau au IV.12.
(5) Cependant, vu l'importance des réserves mondiales de charbon, on peut penser que pendant des siècles ce dernier sera préféré à la bio-masse pour cet usage non énergétique (voir aussi la note (2) de V.4.i. à ce sujet).
(6) Voir III.1.8.
(7) Voir V.4.c.
(8) Voir IV.1.e.

Tableau IV.7. - Besoins énergétiques moyens de la culture et de l'élevage ramenés à l'unité de surface

(unité : TEP/ha x an)

	BT	FMH	FMF	ES	Total	Engrais
Cultures	0.06	0.16	0.01	0.01	0.24	0.18
Prairies (élevage)	0.04	0.06	0.02	0.02	0.14	0.05

Les cultures fourragères sont comptées comme cultures (avec les consommations indiquées) et non comme prairies. Les engrais sont comptés en énergie nécessaire pour les produire ; cette consommation est donnée à titre indicatif, mais n'est pas inclue dans le total, car elle le sera dans celles de l'industrie(1).

Les chiffres du tableau IV.7. représentent des valeurs moyennes entre les divers types de culture ou d'élevage ; valeurs moyennes un peu supérieures aux valeurs actuelles en ce qui concerne les usages spécifiques de l'électricité : appliquées aux superficies du tableau IV.5. (18,6 Mha de cultures et 13,9 Mha de prairies), elles donnent des consommations un peu supérieures aux consommations de 1975 (6,4 MTEP au total contre 5,9 (2)). Par contre, les valeurs moyennes retenues pour les énergies BT et FMM et les engrais sont des moyennes actuelles. Cela traduit une perspective de diffusion de méthodes de culture moins intensives et plus économes en additifs chimiques, en particulier grâce à des plants capables de fixer directement l'azote atmosphérique : on économise ainsi des engrais azotés couteux en énergie.

Du tableau IV.7. et du tableau IV.6. (lequel indique 18,9 Mha de cultures et 11,5 Mha de prairies), on tire :

Tableau IV.8. - Besoins énergétiques de l'agriculture en énergies finales (unité : MTEP).

	BT	FMM	FMF	ES	Total	Engrais
Cultures	1.1	3.0	0.2	0.2	4.5	3.4
Élevage	0.5	0.7	0.2	0.2	1.6	0.6
Total	1.6	3.7	0.4	0.4	6.1	4.0

En énergies distribuées, on obtient :

Tableau IV.9. - Besoins de l'agriculture (unité : MTEP)

BT	CS	CL	CG	E	Total	Engrais
1.0	0.6	1.5	2.2	0.8	6.1	3.9

(1) Voir la discussion suivant le tableau IV.12. en IV.3.c.

(2) Voir le tableau II.3. en II.7.

Le combustible gazeux (CG) qui apparaît correspond à l'alimentation de tracteurs avec le méthane biologique produit localement[1]. Pour référence à 1975, voir les tableaux II.3. et II.4., ainsi que le tableau IV.11.[2] en ce qui concerne la consommation énergétique des engrais.

On rappelle que les besoins de l'agriculture et de la sylviculture énergétique sont comptabilisés comme auto-consommation des complexes agro-énergétiques[3]. Il est cependant utile de les expliciter. Si l'on prend :

- les mêmes besoins unitaires en énergie pour les plantations et cultures énergétiques que pour les cultures usuelles[4],
- 0,05 TEP/ha x an pour les plantations énergétiques et 0,18 TEP/ha x an pour les cultures énergétiques,

on obtient, sur la base de 5 Mha de plantations énergétiques et 2,5 Mha de cultures énergétiques[5] :

Tableau IV.10. - Besoins des plantations et des cultures énergétiques (unité : MTEP).

	BT	CS	CL	CG	E	Total	Engrais
Plant. En.	0.10	0.20	0.70	0.10	0.10	1.20	0.25
Cult. En.	0.05	0.10	0.35	0.05	0.05	0.60	0.45
Total	0.15	0.30	1.05	0.15	0.15	1.80	0.70
Productions	0.5	22.1	14.9	2.8	—	40.3	

Pour comparaison, la dernière ligne indique les productions du secteur solaire agricole[6].

(c) *Sidérurgie et industrie.* Il s'agit d'exprimer quantitativement la condition[7] d'activité industrielle "stationnaire et minimale pour satisfaire aux besoins de la population et permettre l'équilibre d'échanges extérieurs restreints".

Au niveau très global de cette étude, on représente chaque état de l'appareil de production et des échanges vis à vis des consommations énergétiques par un couple (α,β), où α et β, mesurés en TEP/hab x an, représentent les consommations énergétiques globales[8], rapportées à 1 habitant, nécessaires pour la production :

- des *biens de consommation courante* pour α,
- des *biens d'équipement* (ménagers ou industriels) ou des *biens intermédiaires* pour β.

La consommation totale C, en MTEP, de l'industrie + sidérurgie est alors :

(1) $$C = (\alpha + \beta) \times P,$$

où P est la population en millions d'habitants.

Le problème est alors de déterminer le couple (α^*,β^*) correspondant au régime à long terme envisagé. On va le faire, à partir du couple (α_0,β_0) représentant l'état en 1973 (avant la crise de l'énergie), par une suite de transformations, portant inégalement sur α et β, dont chacune exprime l'une des hypothèses ou conditions introduites.

(1) Voir III.4.d. et e.
(2) En IV.3.c.
(3) Voir ci-dessus le début de IV.3.b. et III.4.b.
(4) Voir tableau IV.7.
(5) Voir tableau IV.6.
(6) Voir tableau V.1.
(7) condition énoncée au point (3) en IV.1.d.
(8) Toutes énergies incluses ; voir (2) en dessous à propos d'un modèle plus fin.

On rappelle d'abord les consommations en 1973 :

Tableau IV.11. - Consommations énergétiques de l'industrie en 1973 (unité : MTEP).

Sidérurgie	14,3
Mines	1,2
Métaux non ferreux	3,0
Métallurgie	1,2
Chimie	11,9
(dont engrais, parachimie et pharmacie[1])	(4,0) (4,6)
Matériaux	5,9
Verre	1,5
Machines et matériels électriques	6,6
Ind. agro-alimentaire	4,7
Textiles et cuirs	3,0
Papier, carton, bois	2,9
Bâtiment et Travaux publics	3,0
Divers	0,3
Total	59,5

A partir de ce tableau, on commence par déterminer le couple (α_0,β_0) représentant l'état en 1973 : les branches produisant les biens de consommation courante (chimie[2], indust. agro-alimentaire, textile et cuirs, papier, carton, bois) ont une consommation de 22,5 MTEP. D'où :

(2) $$\alpha_0 = 0{,}42 \text{ TEP/hab x an et } \beta_0 = 0{,}70 \text{ TEP/hab x an}$$

(la population de 1973 étant de 53 Mhab, $\alpha_0 = 22{,}5/53$ et $\beta_0 = (59{,}5 - 22{,}5)/53$).

On va maintenant faire subir au couple (α_0,β_0) la suite des transformations annoncées.

On remarque d'abord que le niveau de consommation (de tous biens) de la population en 1973 n'est pas uniforme. On admet (*hypothèse 1*) que le niveau de consommation moyen (celui qui aurait résulté d'une répartition uniforme de la production sur l'ensemble de la population) n'atteint que 75 % du niveau envisagé à long terme pour ce qui est des biens de consommation courante et 65 % pour ce qui est des biens d'équipement. Cela conduit à remplacer (α_0,β_0) par (α_1,β_1) défini par :

(3) $$\alpha_1 = \alpha_0/0{,}75 \text{ et } \beta_1 = \beta_0/0{,}65.$$

Le couple (α_1,β_1) représente l'état de l'appareil de production nécessaire pour assurer, avec les techniques et la croissance actuelles, le niveau de consommation finale requis.

On tient compte ensuite de ce que les coefficients α_1,β_1 sont relatifs à une économie en croissance : par conséquent β_1 (correspondant à l'équipement) est plus élevé d'un facteur γ que dans le *régime stationnaire* envisagé (*hypothèse 2*), tandis que α_1 reste constant. Si l'on prend, pour 1973, un taux de croissance de 5,8 % par an et une durée moyenne de renouvellement des biens d'équipement de 8 ans, on trouve un facteur γ égal à 1,46. En effet, pour un parc de matériel de x l'année considérée, il faut produire $x/8$ pour le renouvellement et 5,8 $x/100$ pour la croissance ; au total $x/8 + 5{,}8\ x/100 = 1{,}46\ x/8$; c'est à dire $\gamma = 1{,}46$ fois plus qu'en régime stationnaire où il ne faut produire que $x/8$. Cela conduit à remplacer (α_1,β_1) par (α_2,β_2) défini par :

(4) $$\alpha_2 = \alpha_1 \text{ et } \beta_2 = \beta_1/1{,}46.$$

Le couple (α_2,β_2) représente l'état de la production nécessaire pour assurer le niveau de consommation finale requis, avec les techniques actuelles, mais sans croissance.

De plus, certaines *économies d'énergie* sont possibles dans les procédés de fabrication (*hypothèse 3*) ; on les évalue à 15 % en moyenne. Cela conduit à la réduction :

(5) $$\alpha_3 = 0{,}85 \times \alpha_2 \text{ et } \beta_3 = 0{,}85 \times \beta_2.$$

(1) Chimie de base (dont.engrais) = 7,3 (7,3 = 11,9 - 4,6).
(2) On inclut tous les produits chimiques dans les produits de consommation courante pour être sûr de ne pas les sous estimer (en particulier les engrais) ; voir l'alinéa suivant le tableau IV.12.

Enfin, il reste à tenir compte de la condition de minimisation de l'activité industrielle. On l'introduit en admettant (*hypothèse 4*) que les branches fabriquant les biens d'équipement sont modifiées de façon à produire des matériels durant en moyenne *deux fois plus* qu'actuellement. Cela entraine une production deux fois moindre, pour les branches modifiées fabriquant les biens d'équipement. Il en est de même pour celles qui produisent les biens intermédiaires nécessaires à la fabrication des biens d'équipement (tout au moins dans la perspective où les échanges extérieurs sont limités au nécessaire (*hypothèse 5*)). Appliqué sans précaution, ce raisonnement conduit à diviser β_3 par 2 pour obtenir le coefficient β^*. Afin de tenir compte :

- d'une part des éventuelles sur-consommations entrainées par les modifications de l'appareil industriel envisagé ci-dessus ou par celles dues à la captation à grande échelle de l'énergie solaire[1],
- d'autre part de ce que certains gros équipements sont déjà fabriqués pour durer,

on prend un facteur 0,65 au lieu de 0,5 ; ce qui fournit les coefficients α^* et β^* cherchés :

(6) $\alpha^* = \alpha_3$ et $\beta^* = 0{,}65 \times \beta_3$.

Les relations (3) à (6) donnent alors :

(7) $\alpha^* = \frac{0{,}85}{0{,}75} \times \alpha_0$ et $\beta^* = \frac{0{,}85 \times 0{,}65}{0{,}65 \times 1{,}46} \times \beta_0$.

D'où, d'après (2) :

(8) $\alpha^* = 0{,}48$ TEP/hab x an et $\beta^* = 0{,}41$ TEP/hab x an.

On note que α^* est un peu supérieur à α_0, tandis que β^* est très inférieur à β_0, exprimant ainsi la perspective post-industrielle envisagée[2].

On obtient alors, comme évaluation des besoins énergétiques totaux :

(9) 53,4 MTEP (industrie + sidérurgie)

[d'après (8) et (1) avec P = 60 Mhab].

La part de la sidérurgie qui produit essentiellement des biens intermédiaires correspond à une fraction $\overline{\beta}$ du coefficient β ; on admet que cette fraction reste la même qu'en 1973 : 14,3/(59,5 - 22,5) = 0,39, ce qui donne :

(10) $\overline{\beta}^* = 0{,}39 \times \beta^* = 0{,}16$ TEP/hab x an.

D'où, l'évaluation :

(11) 9,5 MTEP pour la sidérurgie[3].

On obtient de même l'évaluation b^* des besoins de chacune des branches en fonction de la consommation b_0 en 1973 par les formules :

(12) $b^* = (b_0/22{,}5) \times \alpha^* \times 60$, pour les branches produisant des biens de consommation courante, et

(13) $b^* = (b_0/(59{,}5 - 22{,}5)) \times \beta^* \times 60$, pour les branches produisant des biens d'équipement ou des biens intermédiaires.

(1) Voir le point (4) en IV.1.d. et IV.1.e.

(2) Voir le point (3) en IV.1.d.

(3) 0,16 x 60 = 9,5.

Ce qui donne :

Tableau IV.12. - Besoins énergétiques à long terme de l'industrie (unité : MTEP).

Sidérurgie	9,5
Mines	0,8
Métaux non ferreux	2,0
Métallurgie	0,8
Chimie	15,2
(dont engrais,	(4,7)
paracnimie et pharmacie)	(5,9)
Matériaux	3,9
Verre	1,0
Machines et matériels électriques	4,4
Ind. agro-alimentaire	6,0
Textiles et cuirs	3,8
Papier, carton, bois	3,7
Bâtiment et Travaux publics	2,0
Divers	0,3
Total	53,4

L'importance de la consommation obtenue pour la branche chimie[1] tient (du point de vue du calcul) à ce que cette branche a été traitée comme si elle ne produisait que des biens de consommation courante (représentés en α), alors que certains de ses produits (comme l'acide sulfurique ou les matières plastiques) sont des biens intermédiaires (autrement représentés par β). Cette sur-consommation peut être attribuée en partie à la production des engrais réclamés par les plantations et cultures énergétiques (0,7 MTEP[2]) et en partie à l'utilisation de la bio-masse comme matière première de la chimie organique.

A partir des hypothèses 2 et 4 ci-dessus, on évalue l'équivalent énergétique de cette biomasse, pour le long terme envisagé, à un niveau de 12 MTEP voisin de la consommation en 1973 de produits pétroliers à usage non énergétique[3]*.

Enfin, on a conservé une répartition des besoins par forme d'énergies finales analogue à la répartition actuelle[4].

Tableau IV.13. - Besoins énergétiques de l'industrie et de la sidérurgie en *énergies finales* (unité : MTEP).

SECTEUR	BT	MT	HT	HTcoke	Σ_{th}	FMM	FMF	ES	Σ_F	Σ_D
SIDÉRURGIE	0.1	—	4.3	3.6	8.0	—	0.2	1.0	9.2	9.5
INDUSTRIE	4.5	15.5	6.0	0.2	26.2	0.7	11.2	5.3	43.4	43.9
TOTAUX	4.6	15.5	10.3	3.8	34.2	0.7	11.4	6.3	52.6	53.4

La part du coke dans la sidérurgie est diminuée pour tenir compte des modifications dues au recyclage systématique des déchets métalliques et de l'utilisation de l'hydrogène[5].

(1) On pourrait faire une remarque analogue à ce qui suit pour la branche papier, carton, bois.
(2) Voir le tableau IV.10.
(3) Voir à ce sujet le commentaire du tableau IV.6.
(4) Tableau II.4. en II.7.

* tous ces renvois manifestent le caractère "bouché" du problème mentionné en IV.1.e. : on ne fait ici qu'une très grossière étude de cohérence (voir IV.1.c.).

(5) Voir tableau ci-après.

En énergies distribuées, on obtient :

Tableau IV.14. - Besoins de l'industrie et de la sidérurgie (unité : MTEP).

	BT	MT	HT	CS	CL	CG	Σ_{th}	E	Σ
SIDÉRURGIE	0.1	—	1.5	4.4	0.2	1.5	7.7	1.8	9.5
INDUSTRIE	4.0	6.0	1.5	10.6	1.0	3.3	26.4	17.5	43.9
TOTAUX	4.1	6.0	3.0	15.0	1.2	4.8	34.1	19.3	53.4

Le combustible gazeux qui intervient est essentiellement de l'hydrogène.

(d) *Remarques.*

(1) L'évaluation faite ci-dessus présente de nombreuses faiblesses ; entre autres :

- On ne prend en compte que très grossièrement [par le facteur 0,65 au lieu de 0,5 dans (6)] les modifications de la structure industrielle que réclameraient la production systématique de matériel durable et la captation à grande échelle de l'énergie solaire(1).
- On laisse dans l'ombre (derrière l'hypothèse 5) les répercussions des modifications précédentes sur l'équilibre des échanges extérieurs.

(2) On peut élaborer un peu plus le modèle sans prendre explicitement en compte la complexité des échanges inter-industriels(2) :

- d'une part en appliquant la méthode pour chaque forme d'énergie (finale ou distribuée),
- d'autre part en représentant l'état de l'appareil de production par un multiplet $(\alpha_1,\ldots,\alpha_n)$ [au lieu d'un couple (α,β)]. Ce multiplet résulte d'un découpage plus fin des branches en n agrégats [au lieu de 2], par exemple avec $n = 15$ comme pour la nomenclature des tableaux IV.11. et IV.12. Des distinctions peuvent ainsi être introduites entre les divers biens, via les transformations effectuées sur les coefficients $\alpha_1,\ldots,\alpha_n$ qui les caractérisent.

(e) *Transports de marchandises.* L'activité de ce secteur est fonction de celle des secteurs de production (agricole et industrielle) ; on évalue donc ses besoins énergétiques en traduisant en termes de transports de matières les diverses hypothèses faites en (b) et (c) ci-dessus qui concernent l'activité envisagée à long terme pour ces derniers secteurs.

On distingue les *transports intérieurs*, en mesurant le trafic en millions de tonnes x km (MT x km), et les *transports maritimes* (échanges extérieurs) en mesurant le trafic en millions de tonnes (MT) transportées. Dans chaque cas, on admet que le trafic en 1973 rapporté, produit par produit, au volume de la production de cette année constitue une mesure acceptable du coefficient technique "besoin unitaire de transports de marchandises". Les modifications de l'activité productrice postulées entre 1973 et le long terme envisagé déterminent alors le besoin total de trafic à long terme ; après quoi, des hypothèses sur la répartition du trafic entre les divers moyens de transport envisagés permettent d'évaluer les besoins énergétiques.

(1) Voir cependant la discussion suivant le tableau IV.12. en ce qui concerne les sur-consommations énergétiques éventuelles de la branche chimie.

(2) Voir IV.1.c. et IV.3.a.

Pour évaluer les *transports intérieurs*, on part du schéma suivant de la situation en 1973.

Tableau IV.15. - Trafics intérieurs en 1973 selon les marchandies transportées.

Marchandises transportées	Trafic (10^3 MTxKm)	%
Biens de consommation courante	60	30
Biens d'équipement et Biens intermédiaires	95	50
Produits énergétiques	40	20
Total.	195	100

Cela étant, les hypothèses 1, 2 et 4 faites en (c) ci-dessus sur la structure de la production à long terme [hypothèses dont les relations (3), (4) et (6) sont les traductions énergétiques] amènent à multiplier, pour le régime envisagé, le trafic des biens de consommation courante par (60/53)/0,75 = 1,5 et celui des biens d'équipement et des biens intermédiaires par (60/53) x 0,5/(0,65 x 1,46) = 0,6. De plus, le tonnage de produits énergétiques à manipuler passe de plus de 170 MT à moins de 60 MT[1]. On ne comptabilise pas ici le transport local de la chaleur solaire captée directement (filière [2], [3], [4][2]) déjà pris en compte dans l'auto-consommation des installations.

D'où, l'évaluation :

Tableau IV.16. - Trafics intérieurs envisagés selon les marchandises transportées.

matières transportées	Trafic (10^3 MTxKm)	%
Biens de Consommation courante	90	53
Biens d'équipement et Biens intermédiaires	60	35
produits énergétiques	20	12
total	170	100

Le trafic retenu pour les produits énergétiques est supérieur à celui que fournit le raisonnement indiqué (20 au lieu de 14) du fait de la décentralisation du système d'approvisionnement en combustibles.

Afin d'évaluer les consommations d'énergie correspondantes, on a besoin du tableau IV.17.

(1) Cette dernière indication est tirée du bilan étudié au chapitre V - tableau V.1. en V.2.a. Voir IV.1.e. à propos du caractère "bouché" de la démarche logique.

(2) Voir III.3.b.

Tableau IV.17. - Consommations unitaires moyennes des divers modes de transports intérieurs.

Moyen de transport	TYPE ENERGIE	CONSOM. UNIT. (TEP/MTxKm)
Route	CL ou CG	50 (2)
chemin de fer	E (1)	12
Navigation fluviale	CL ou CG	15
Oléoduc	E (1)	4

Conformément aux options prises pour les transports de personnes(3), la priorité est donnée aux transports ferroviaires (et fluviaux à un degré moindre) sur les transports routiers. Ces derniers sont limités autant que possible aux transports à courte distance (avec des moyens importants de conjugaison rail-route). Quantitativement, on propose la répartition suivante (colonne "trafic"), d'où résultent, compte tenu du tableau IV.17., les consommations énergétiques cherchées (colonnes "besoins énergétiques").

Tableau IV.18. - Besoins énergétiques des transports intérieurs de marchandises.

MODE DE TRANSPORT	TRAFIC (10^3 MTxKm)	BESOIN ENERG. (MTEP)			
		CL	CG	E	Totaux
Route	50	0.7	1.8	—	2.5
Chemin de fer	95	—	—	1.2	1.2
Navig. fluviale	18	0.1	0.2	—	0.3
oléoduc	7	—	—	ε	ε
Totaux	170	0.8	2.0	1.2	4.0

La part réservée au gaz correspond à des transports routiers ou fluviaux alimentés à l'hydrogène.

(1) Electricité comptée selon l'équivalence nominale 1 TEP = 4,5 MWh (relation (10) en II.4.c.).

(2) 55 ℓ/100 km pour un camion de 10 T de charge utile.

(3) Voir le début de IV.2.c.

Pour référence :

Tableau IV.19. - Consommations énergétiques des transports intérieurs de marchandises en 1973.

MODE DE TRANSPORT	TRAFIC (10^3 MT x Km)	CONSOM. ENERG. (MTEP)			
		CL	CG	E	Totaux
Route	90	8.0	—	—	8.0
Chemin de fer	72	0.4	—	0.7	1.1
Navig. fluviale	13	0.3	—	—	0.3
oléoduc	20	—	—	ε	ε
Totaux	195	8.7	—	0.7	9.4

On note sur ce tableau la prédominance des transports routiers, leur forte consommation unitaire (2 000/90 = 89 TEP/MT x km) et l'influence sur la consommation unitaire moyenne des chemins de fer (1 100/72 = 15 TEP/MT x km) de ce que l'électrification n'est pas actuellement totale.

En 1973, les *transports maritimes* ont consommé (soutes) 5,5 MTEP pour assurer le transport de :

(14) 55 (embarqué) + 238 (débarqué) = 293 MT,

dont environ 150 MT de produits énergétiques (charbon, pétrole, gaz). Dans la perspective à long terme envisagée, les importations de produits énergétiques disparaissent (ce qui divise par 2 le tonnage à transporter) et les échanges extérieurs sont restreints[1]. Il semble donc raisonnable de prendre, à long terme :

(15) 2 MTEP (CL) pour les soutes.

Finalement, le tableau IV.18. et (15) donnent, en ajoutant 0,5 MTEP (CL) pour des consommations diverses (manutention, frêt aérien, pêche, ..., ayant représenté 0,3 MTEP en 1973) :

Tableau IV.20. - Besoins énergétiques des transports de marchandises (énergies distribuées ; unité : MTEP).

CL	CG	E	total
3.3	2.0	1.2	6.5

(1) Hypothèse 5 en IV.3.c.

Chapitre V

REGIME A LONG TERME

V.1. Préliminaire ; anticipation et prévision

(a) L'objet de ce chapitre est d'expliciter un système d'approvisionnement énergétique pour la France conjuguant les éléments introduits aux chapitres III et IV. Ce système doit permettre à très long terme au pays un *régime stationnaire d'auto-suffisance énergétique basée sur l'énergie solaire*.

Ce système est proposé comme *anticipation et non comme prévision*. Autrement dit, il constitue une image structurelle (un modèle même s'il est rudimentaire) qui permet de vérifier la conérence d'un ensemble d'hypothèses concernant les besoins à satisfaire, les techniques de conversion de l'énergie et le potentiel du territoire.

(b) Les besoins à satisfaire ont fait l'objet du chapitre IV ; ils correspondent à un régime stationnaire d'économie post-industrielle, régime schématisé par les points (1), (2), (3), (4) énoncés en IV.1.d.

Les techniques retenues pour la conversion de l'énergie ont fait l'objet du chapitre III ; elles concernent essentiellement la captation locale de l'énergie solaire, sous des hypothèses "conservatrices" : on n'a retenu que des procédés et rendements dont la faisabilité technique est pratiquement acquise(1). Des indications complémentaires sur le potentiel du territoire sont introduits ci-dessous en V.4. et V.5.

(c) Le bilan d'approvisionnement-distribution présenté en V.2. schématise quantitativement la cohérence physique du système énergétique proposé en faisant apparaître l'équilibre entre productions et consommations. Cette cohérence n'induit évidemment en elle-même aucune *prévision* de l'éventualité d'une évolution historique susceptible de conduire le pays du régime actuel de croissance-dépendance au régime de croisière proposé.

V.2. Bilans

(a) Le tableau V.1. ci-après présente le bilan d'approvisionnement-distribution(2) du régime à long terme envisagé.

Ce bilan est commenté et développé dans les paragraphes V.3., V.4. et V.5. Les divers alinéas de ces paragraphes peuvent être lus en suivant ou comme notes explicatives du bilan : les indications entre crochets figurant en tête ou dans le cours de ces alinéas renvoient aux lignes, colonnes et cases du tableau(3).

(b) L'ensemble des chiffres rassemblés dans ce bilan constitue une évaluation du *gisement solaire de la France*, évaluation relative à l'état des techniques de conversion et aux niveaux de consommations définis aux chapitre III et IV. Il s'agit bien d'une évaluation du gisement solaire de la France puisque c'est en poussant le système envisagé à la limite de ses possibilités que l'apport solaire assure les consommations correspondant aux besoins précédemment définis au chapitre IV. On peut évidemment discuter ce niveau limite en fonction des diverses variantes possibles :

* On pourrait le réduire, en évaluant les besoins plus strictement (on souligne que l'évaluation faite au chapitre IV est confortable), si la pression sur l'éco-système est jugée excessive.

(1) Voir III.1.a. et V.6.b. et c. ci-dessous.

(2) Voir II.5. en ce qui concerne la structure du bilan.

(3) Voir le tableau II.1. en II.5. pour la numérotation.

* On pourrait le relever par une amélioration substantielle des technologies que l'on a préféré ici ne pas postuler[1].

La présente étude montre de toute manière qu'avec les technologies conservatrices retenues, l'énergie solaire ne peut pas assurer des consommations doubles de celles envisagées, consommations qui, on le répète, sont susceptibles d'assurer à une population française de 60 Millions d'habitants *un niveau de vie confortable pour tous* (en moyenne 1,4 fois le niveau actuel) dans le cadre d'une économie stabilisée.

Tableau V.1. - Bilan à long terme

		BT	MT	HT	CS	CL	CG	Σ_{th}	E	Σ
UTILISATION	RÉSID-TERT.	34.0	—	—	4.5	—	3.0	41.5	20.0	61.5
	TRANSPORTS	—	—	—	—	11.8	4.9	16.7	3.8	20.5
	AGRICULTURE	1.2	—	—	0.4	1.5	2.2	5.3	0.8	6.1
	SIDÉRURGIE	0.1	—	1.5	4.4	0.2	1.5	7.7	1.8	9.5
	INDUSTRIE	4.0	6.0	1.5	10.6	1.0	3.3	26.4	17.5	43.9
TOTAUX EN-DISTRIB.		39.3	6.0	3.0	19.9	14.5	14.9	97.6	43.9	141.5
PRODUCTION	PERTES DISTRIB.	-4.0	-0.6	-0.3	—	-0.4	-0.7	-6.0	-3.5	-9.5
	RÉCUP-DÉCHETS	0.2	0.2		4.0			4.4		4.4
	SOLAIRE AGRIC.	0.5			22.1	14.9	2.8	40.3		40.3
	SOLAIRE ELECTR.	2.5					12.5	15.0	13.0	28.0
	HYDRAUL-ÉOL.								34.2	34.2
	SOLAIRE THERM.	38.5	6.3	3.3				49.1	-1.2	49.1
	GÉOTHERMIE									—
	CENTR. THERM.	0.5			-5.0		-1.8	-6.3	7.0	
	CENTR. NUCL.									—
	CHARB-3,COKE.	0.1	0.1		-1.2		0.6	-0.4	-0.1	—
	RAFFINNERIES									—
	IND. DU GAZ						1.5	1.5	-5.5	—
TOTAUX PRIMAIRES										156.0

APPROVIS.	
EXTR. LOCALE	IMP.

SUPERficies (Mha)				
SI	SM	SF	SA	Σ_S
ε				ε
0.01		5.00	2.50	7.51
0.11	0.33			0.44
0.02	0.12			0.14
0.05	0.20			0.25
ε				ε
ε				ε
ε				ε
0.13	0.65	5.00	2.50	8.34

(1) Voir III.1.a. et V.6.b. et c. ci-dessous.

(c) Le bilan d'utilisation finale ci-après rassemble les évaluations faites au chapitre IV.(:)

Tableau V.2. - Bilan d'utilisation finale à long terme.

SECTEURS	BT	MT	HT	HTcoke	Σ_{th}	FNM	FMF	ES	Σ_F	Σ_D
RESID-TERT.	42.5	3.0	—	—	45.5	—	—	16.0	61.5	61.5
TRANSPORTS	—	—	—	—	—	20.3	—	0.2	20.5	20.5
AGRICULTURE	1.6	—	—	—	1.6	3.7	0.4	0.4	6.1	6.1
SIDÉRURGIE	0.1	—	4.3	3.6	8.0	—	0.2	1.0	9.2	9.5
INDUSTRIE	4.5	15.5	6.0	0.2	26.2	0.7	11.2	5.3	43.4	43.9
TOTAUX	48.7	18.5	10.3	3.8	81.3	24.7	11.8	22.9	140.7	141.5
%	34.6	13.2	7.3	2.7	57.8	17.5	8.4	16.3	100.0	

(d) Le schéma de la couverture donne une image simplifiée du système énergétique proposé. On pourra le comparer au schéma actuel (1975) sur la dernière page (couverture).

V.3. Analyse du bloc UTILISATION

(a) Les consommations indiquées dans le tableau V.1. pour les secteurs d'utilisation [bloc UTILISATION ; lignes 1 - 5] correspondent aux besoins évalués au chapitre IV. Les répartitions des diverses énergies distribuées sont commentées ligne par ligne dans les alinéas b. à g. ci-dessous.

(b) [RESID - TERT.]. Au total 80 % de la chaleur utilisée pour le *chauffage des locaux résidentiels ou tertiaires* et *l'eau chaude* (34 MTEP sur 42,5) [case (1,1]. sont obtenus par apport solaire direct au moyen des filières [2], [3], [4](2). Les 20 % restant (8,5 MTEP) le sont pour un peu plus de la moitié (4,5 MTEP) [case (1,4]. par brulage de combustibles solides tirés de la bio-masse (granulats(3)), pour le reste par l'action de pompes à chaleur. L'alimentation de ces dernières consomme 4 MTEP d'électricité(4) ; elle s'ajoute au besoin en électricité spécifique de 16 MTEP(5), pour aboutir à une consommation électrique du secteur de 20 MTEP [case (1,8]. Ce complément de 20 % par brulage de CS ou pompes à chaleur correspond : soit à un appoint lorsque le chauffage solaire n'est pas intégral (filière [2](6)), soit au chauffage complet de locaux anciens. Au centre des villes en particulier le chauffage solaire direct, même du type "chauffage urbain" de la filière [4], est difficilement envisageable. Par contre cette dernière filière domine largement dans le parc des logements à chauffage solaire(7).

La *cuisine* est faite au gaz [case (1,6]](8), principalement à l'hydrogène.

(c) [TRANSPORTS] - Dans les *transports*, l'électricité [case (2,8)] est utilisée par les chemins de fer (3,4 MTEP) et par une partie des transports urbains (0,4 MTEP). Les transports automobiles et les transports fluviaux sont alimentés, en partie avec des carburants liquides (6,8 MTEP) [case (2,5)] et en partie avec de l'hydrogène (4,9 MTEP) [case (2,6)]. L'hydrogène (2,5 MTEP) alimente principalement le parc des voitures de service (voitures commerciales, louées, banalisées), tandis que les carburants liquides (5,5 MTEP), de distribution plus commode, alimentent les voitures particulières. Enfin, les transports aériens et maritimes emploient exclusivement des carburants liquides (2,5 MTEP pour chacun) [case (2,5)].

(1) Voir II.6. en ce qui concerne la structure du bilan.
(2) Voir III.2.
(3) Voir III.4.d.
(4) Voir II.4.c.
(5) Voir les tableaux IV.2. et IV.3. au IV.2.a. et IV.2.b.
(6) Voir III.2.c.
(7) Voir III.2.g. et le tableau V.8. en V.4.h.
(8) Voir IV.2.a. et IV.2.b.

(d) [AGRICULTURE] - Dans l'*agriculture*, les besoins de chaleur BT (séchage, serres, ...) sont assumés, soit par apport solaire direct [case (3,1)] (filière [2] ou [4]) selon la taille des installations[1]), soit par brulage de combustibles solides [case (3,4)] produits localement dans les complexes agro-énergétiques[2]. Les tracteurs ou machines mobiles sont alimentés en partie avec du carburant liquide [case (3,5)] et en partie avec du méthane biologique [case (3,6)] également produits localement dans ces complexes.

L'électricité [case (3,8)] est réservée aux usages spécifiques (éclairage, machines fixes).

(e) [SIDERURGIE] - Dans la *sidérurgie*, l'usage du coke [case (4,4)] est conjugué avec celui de l'hydrogène [case (4,6)][3]. Des centrales solaires de la filière [8][4] fournissent un appoint de chaleur à haute température [case (4,3)]. Le coke est lui-même produit à partir des combustibles solides tirés de la bio-masse, ainsi que cela apparait à la ligne CHARB. & COKE[5].

(f) [INDUSTRIE] - Dans l'*industrie*, le chauffage des locaux et celui des appareils fonctionnant à moins de 200°C (séchoirs, étuves, ...) est assuré par apport solaire direct au moyen de la filière [4] [case (5,1)] ou de la filière [6] [case (5,2)], avec un appoint éventuel, soit par brulage de combustibles solides [case (5,4)][6] soit par l'action de pompes à chaleur ; leur consommation[7] est de l'ordre de 0,5 MTEP (E) [case (5,8)]. Le chauffage à plus haute température (MT ou HT) est assuré principalement par brulage de combustibles solides [case (5,4)] ou d'hydrogène [case (5,6)] et accessoirement par apport solaire direct au moyen des filières [7] et [8] [cases (5,2),(5,3)][8] avec appoint par brulage de combustibles solides [case (5,4)] ou d'hydrogène [case (5,6)][9]. On limite les combustibles liquides [case (5,5)] à des usages spécifiques (engins entre autres[10]), ainsi que l'électricité [case (5,8)], mis à part les pompes à chaleur mentionnées ci-dessus et quelques usages thermiques exceptionnels (16,5 MTEP d'électricité spécifique sur 17,5[11]).

(g) [TOTAUX EN DISTRIB.] - le tableau suivant illustre la diversification des vecteurs d'énergie utilisés dans le régime à long terme par opposition à la prédominance actuelle des combustibles liquides :

Tableau V.3. - Proportions comparées des diverses énergies distribuées dans le régime à long terme et en 1975

(en %)

	BT	HT	HT	CS	CL	CG	Σ_{th}	E	Σ
LONG TERME	27.8	4.2	2.1	14.1	10.3	10.5	69.0	31.0	100.0
1975	ε	—	—	11.3	54.6	9.5	75.4	24.6	100.0

On souligne que le régime proposé diffère profondément du régime actuel (du point de vue distribution[12]), bien que les totaux distribués soient peu différents (141,5 MTEP contre 146,5 en 1975) : l'utilisation spécifique de chaque vecteur d'énergie augmente la quantité d'énergie finale disponible pour une même quantité d'énergie distribuée.

(h) [colonne Σ, lignes 1-6]. Le régime proposé et le régime actuel diffèrent aussi par les répartitions des énergies distribuées entre les différents secteurs d'utilisation. Le tableau suivant illustre ce propos.

(1) Voir III.2. et V.4.h. ci-dessous.
(2) Voir III.4.d. et e.
(3) Cette case inclut aussi des gaz de cokeries [case (16,6)] et des gaz de haut fourneaux.
(4) Voir III.3.b. et d. et V.4.h.
(5) Voir V.4.i. ci-dessous.
(6) Voir III.2., III.3. et V.4.h.
(7) Voir II.4.c.
(8) Voir V.4.h.
(9) Voir III.3.
(10) Les transports sont comptés à part.
(11) Voir le tableau V.2. en V.2.c.
(12) Les différences sont évidentes en ce qui concerne l'approvisionnement (Voir V.4.j. ci-dessous entre autres).

Tableau V.4. - Répartition comparée de l'énergie totale distribuée entre les divers secteurs d'utilisation (en %)

SECTEUR D'UTILISATION	LONG TERME	1975
RESIDENTIEL-TERTIAIRE	43.5	36.8
TRANSPORTS	14.5	21.4
AGRICULTURE	4.3	4.0
SIDÉRURGIE	6.7	8.5
INDUSTRIE	31.0	29.3
TOTAUX	100.0	100.0

V.4. Analyse du bloc PRODUCTION

(a) L'approvisionnement énergétique du pays est entièrement autosubsistant(1). Il est assuré par :

- La chaleur et les combustibles tirés des déchets.
- L'apport de la sylviculture et de l'agriculture en combustibles et carburants.
- L'apport en électricité des centrales hydrauliques et éoliennes.
- L'apport en chaleur, électricité et hydrogène des diverses installations de conversion de l'énergie solaire.

La condition (4) introduite au § IV.1.d. est ainsi satisfaite.

Les apports des divers secteurs de production de l'énergie [bloc PRODUCTION du tableau V.1. , lignes 8-18] sont analysés dans les alinéas b à j ci-dessous.

(b) [RECUPERATION] - Le secteur *récupération* traite les déchets domestiques (ordures ménagères - 7 à 8 millions de tonnes) et les déchets des industries du bois (4 à 5 millions de tonnes). On transforme la plus grande partie des déchets en granulats (4 MTEP) [case (8,4)] dans des installations analogues à celles des complexes agro-énergétiques(2) ou dans ces complexes eux-mêmes. Une partie résiduelle est directement brûlée [cases (8,1), (8,2)]. Notons que l'énergie tirée des déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière dans les complexes agro-énergétiques n'est pas comptabilisée avec le secteur récupération, mais avec le secteur solaire agricole(3).

(c) [SOLAIRE AGRIC.] - Le secteur *solaire agricole* est constitué par les *complexes agro-énergétiques* (filière [9](-)). Ces complexes fournissent la totalité des combustibles solides (22,1 MTEP) [case (9,4)] et des carburants liquides (14,9 MTEP) [case (9,5)] consommés par le pays ainsi que du méthane (2,8 MTEP) [case (9,6)] utilisé localement pour alimenter les tracteurs et machines agricoles mobiles. Par récupération, ils fournissent aussi un peu de chaleur utilisée localement (0,5 MTEP) [case (9,1)].

Avec une capacité moyenne par unité de 150.000 TEP/an(5), il faut 265 unités pour produire les 39,8 MTEP requis de CS et CL, c'est à dire 3 à 5 usines par département ou encore une usine pour quelques cantons ruraux(6) (100 à 150.000 ha(7)).

(1) Voir V.6.d. à ce sujet.
(2) Voir III.4.d. et e.
(3) Voir (c) ci-après.
(4) Voir III.4.
(5) Voir le tableau III.3. en III.4.b.
(6) 20 à 60 cantons par département ; 33 en moyenne nationale.
(7) Voir III.4.e.

Dans le bloc SUPERFICIES apparaissent les superficies de plantations énergétiques (SF ; 5 Mha) [case (9,14)] et de cultures énergétiques (SA ; 2,5 Mha) requises pour la production, par les complexes agro-énergétiques, des CS (22,1 MTEP) [case (9,4)] et des CL (14,9 MTEP) [case (9,5)] ainsi que la superficie totale des usines [case(9,12)] (0,01 Mha correspondent à 260 usines de 40 hectares chacune). L'apport de bio-masse de ces plantations et cultures s'ajoute à celui constitué par les déchets agricoles :

- Déchets secs des cultures (pailles, ...) ou des exploitations forestières (branchages, broussailles, ...) transformés en CS et CL.
- Déchets humides de l'élevage transformés en CG par fermentation méthanique(1).

Le tableau, ci-après, indique une répartition possible de ces divers apports entre la production de CS, CL, CG, en rappelant (sous colonnes de gauche) les productivités (en TEP/ha x an) fournies par le tableau III.3.

Tableau V.5. - Répartition des terres à finalité énergétique et des productions correspondantes.

	CS			CL			CG (méthane)			TOTAUX	
	TEP/ha x an	MTEP	Mha	TEP/ha x an	MTEP	Mha	TEP/ha x an	MTEP	Mha	MTEP	Mha
PLANT. ENERG.	4.0	11.6	2.9	3.2	6.7	2.1	—	—	—	18.3	5.0
CULT. ENERG.	6.2	7.4	1.2	4.7	6.0	1.3	—	—	—	13.4	2.5
TOTAUX ENERG.		19.0	4.1		12.7	3.4		—	—	31.7	7.5
DECHETS	0.7	3.1	4.5	0.55	2.2	4.0	0.25	2.8	11.0	8.1	19.5
TOTAUX		22.1	8.6		14.9	7.4		2.8	11.0	39.8	27.0

Les éléments de base conditionnant ce tableau sont les suivants :

- 5 Mha de *plantations énergétiques*.
- 2,5 Mha de *cultures énergétiques*.
- 8,5 Mha de terres (dont 5 Mha de cultures et 3,5 Mha de forêts) fournissant des *déchets secs* transformables en CS (4,5 Mha) ou CL (4 Mha).
- 11 Mha de prairies fournissant - via l'élevage - des *déchets humides* utilisés pour la fermentation méthanique.

Ces superficies s'inscrivent de façon cohérente dans le tableau IV.6. qui donne la répartition des terres dans la perspective envisagée(2).

1) [HYDRAUL. & EOL.] - Le *potentiel hydro-électrique* non marémoteur est équipé au niveau maximum non intensif correspondant à une productivité annuelle de 90 TWh (i.e. 20 MTEP), y compris les petites chutes (5 à 6 TWh). L'*usine marémotrice* des Iles Chausey est réalisée (productibilité de 34 TWh selon le projet Caquot). Le *potentiel éolien* est exploité au niveau d'équipement maximum des sites isolés donnant une productibilité annuelle de 30 TWh. Ce chiffre inclut 3 TWh pour les petites installations (300.000 unités de 5 kW(3)) et 27 TWh pour les grosses installations. 4.500 unités de 3 MW(3) exploitent le gisement éolien sur 40.000 hectares dont 60 % près des côtes (120 km de côtes sur 2 km de profondeur à raison de 12 unités par km² dont une partie située en mer.

(1) Voir III.4.c., d. et e.

(2) Voir IV.3.b.

(3) Durée de fonctionnement de 2 000 h/an en moyenne ; voir le tableau III.5. en III.5.a. et le tableau V.6. ci-après.

Le tableau suivant récapitule ces éléments en précisant, filière par filière, les puissances électriques installées (en GW = 10^6 KW), les durées moyennes de fonctionnement (en 10^3 h/an), les productibilités (en TEP/an) et les superficies (SI ou SM) requises.

Tableau V.6. - Potentiel hydraulique et éolien.

FILIÈRES	PRODUCT. ELECTR.			ELECTR. HYDROGÈNE DISTRIB.		SURF. (Mha)	
	GW	10^3 h/an	(MTEP/an)	(MTEP/an)	(MTEP/an)	SI	SM
marémotrices	6.0	5.7	7.5	7.5	—	ε	...
(11) fil de l'eau	11.5	4.9	12.5	12.5	—	0.01	0.04
(12) éclusées	6.0	2.8	3.7	3.7	—	0.01	0.04
(13) lacs	3.0	1.9	3.8	3.8	—		
(14) éoliennes	15.0	2.0	6.7	6.7	—	ε	0.04
TOTAUX	47.5		34.2	34.2	(1.5)	0.02	0.12

L'hydrogène distribué (1,5 MTEP) est produit par électrolyse dans le cadre du système de régulation des réseaux de distribution électrique[1].

Il faut compléter les indications données, sur les puissances hydro-électriques installées, par le potentiel de pompage évalué à 10 GW[2].

(e) [SOLAIRE ELECTR.] - L'électricité primaire que produisent les *centrales solaires électrogènes* a deux utilisations :

* Une partie alimente les réseaux de distribution électrique [case (10,8)].
* L'autre partie est directement transformée en hydrogène par électrolyse [case (10,6)].

Ces deux utilisations peuvent être conjuguées ou non dans la même centrale. La seconde, par exemple, correspond à des "*centrales à hydrogène*"[3].

Le tableau suivant indique une répartition possible entre ces deux utilisations (E : électricité directe ; H : hydrogène direct) des puissances électriques installées pour les diverses filières, les productibilités annuelles d'électricité et d'hydrogène ainsi que les superficies requises.

Tableau V.7. - Potentiel solaire électrogène.

FILIÈRES	PRODUCT-ELECTR.		UTILISATION		ELECTR. DISTRIB.	HYDROGÈNE DISTRIB.	SURF. (Mha)	
	GW	MTEP/an	E(GW)	H (GW)	(MTEP/an)	(MTEP/an)	SI	SM
(15) THEM	13.7	6.1	11.3	2.4	5.0	0.5	0.01	0.02
(16) THECK	44.5	19.8	4.9	39.6	2.2	4.3	0.02	0.09
(17) Photovolt. sans concentration	11.3	5.0	11.3	—	5.0	—	0.02	—
(18) Photovolt. avec concentration	63.9	28.4	1.8	62.1	0.8	7.4	0.06	0.22
TOTAUX	133.4	59.3	29.3	104.1	13.0	12.5	0.11	0.33

(1) Voir (g) et V.5. ci-dessous. (2) Voir aussi V.5.c. (3) Voir V.6.b. ci-après à ce sujet.

On prend pour rapport puissance installée (en GW) sur productibilité (en MTEP/an d'électricité) un chiffre de 2,25 qui correspond à une durée moyenne de fonctionnement de 2.000 heures/an (2,25 = 4.500/2.000[1]). Par ailleurs, on admet que les électrolyseurs sont assez gros (quelques MW(e) au moins) pour avoir un rendement de 70 %[2]. Ainsi :

(1) 1 MTEP d'électricité fournit 0,27 MTEP d'hydrogène.

Les unités productrices (d'électricité ou d'hydrogène) sont de tailles très variables : puissances installées de quelques centaines de kW(e), pour des surfaces unitaires allant de 1 hectare à quelques centaines d'hectares (à raison de 1 MW(e) installé pour 2 hectares[3]). Par contre, le stockage de longue durée de l'hydrogène reste nécessairement centralisé[4].

(f) [CENTR. THERM.] - Les *centrales thermiques* fournissent l'appoint nécessaire à l'équilibre des réseaux électriques[5]. Elles comportent d'une part des centrales thermiques classiques (chaudière - turbo-alternateur) alimentées avec des CS (5 MTEP) [case (14,4)], d'autre part des piles à combustible[6] alimentées avec de l'hydrogène (1,8 MTEP) [case (14,6)]. La production obtenue de 7 MTEP d'électricité [case (14,8)], plus 0,5 MTEP de chaleur BT de récupération [case (14,1)], à partir d'un apport thermique de 6,8 MTEP [case (14,7)] correspond à un rendement moyen de 33 %[7] pour les installations alimentées avec des CS et de 65 % pour les piles à combustible [0,7 = (5 x 0,33 + 1,8 x 0,60)/0,39].

(g) [IND. DU GAZ] - Comme la puissance électrique fournie aux réseaux de distribution par les diverses centrales électrogènes[8] n'est pas entièrement modulable[9], pendant les périodes de faible demande on transforme le surplus de cette puissance en hydrogène dans des unités d'électrolyse qui font partie des réseaux. Le bilan annuel de production-consommation de ces unités figure à la ligne IND.DU GAZ [cases (18,6),(18,8)]. Leur production d'hydrogène vient s'ajouter à celle des centrales solaires[10]. Les électrolyseurs sont relativement centralisés (avec un rendement de 70 % correspondant à (1)). On peut les installer sur les sites des centrales solaires ou au voisinage des sites de stockage de l'hydrogène[11].

(h) [SOLAIRE THERM.] - Le *secteur solaire thermogène* regroupe toutes les installations de conversion directe de l'énergie solaire en chaleur distribuée BT, MT, HT.

Les apports du secteur (49,1 MTEP) [cases (12,1),(12,2),(12,3),(12,9)] sont analysés dans le tableau ci-après par filières et par secteurs d'utilisation. Dans le bloc de droite, on a analysé les consommations d'électricité des installations (1,2 MTEP au total) [case (12,8)] et les superficies [cases (12,12), (12,13)].

(1) On rappelle l'équivalence (10) en II.4.
(2) Voir III.4.g.
(3) Voir le tableau III.5.
(4) Voir III.4.g.
(5) Voir (g) et V.5. ci-après.
(6) Voir III.4.h. et III.5.h.
(7) Rendement moyen actuel des centrales thermiques.
(8) Voir (d), (e) et (f).
(9) Voir V.5.
(10) Voir (e).
(11) Voir (e) ci-dessus et III.4.g.

Tableau V.8. - Chauffage solaire direct.

FILIÈRES	RÉSIDENTIEL		TERTIAIRE		AGR.	SID.+ IND.	Σ	Σ + PERTES	CONS. E	SUF. (Mha)	
	(Mlgt)	(MTEP)	(Mm^3)	(MTEP)	(MTEP)	(MTEP)	(MTEP)	(MTEP)	(MTEP)	Si	SM
[1] (BT)	2.5	7.7	140	0.8	—	0.3	8.8	9.3	—	—	—
[2] (BT)	5.0	5.0	—	—	0.1	—	5.1	5.5	0.11	ε	0.05
[3] (BT)	2.7	4.6	160	1.0	—	—	5.6	6.1	0.12	ε	0.02
[4] (BT)	9.0	15.3	1000	6.1	0.5	3.0	24.9	27.1	0.54	0.03	0.08
RÉCUP. BT	0.8	1.4	100	0.6	0.6	0.8	3.4	3.8	0.08	—	—
TOTAUX BT	20.0	34.0	1400	8.5	1.2	4.1	47.8	51.8	0.85	0.04	0.15
[6] (MT)	—	—	—	—	—	4.3	4.3	4.7	0.17	ε	0.02
[7] (MT)	—	—	—	—	—	1.4	1.4	1.6	0.05	ε	0.01
[8] (MT)	—	—	—	—	—	3.0	3.0	3.3	0.11	ε	0.02
RÉCUP. MT						0.3	0.3	0.3	0.01	—	—
TOTAUX	20.0	34.0	1400	8.5	1.2	13.1	56.8	61.7	1.13	0.05	0.20

Pour que le tableau soit complet, au moins du point de vue BT, on a fait figurer, en plus des filières solaires directes ([2], [3], [4], [6], [7], [8][1]), la filière d'appoint [I][2] et la récupération (RECUP.BT & RECUP.MT ; par contre la filière [5][1] ne figure pas)[4].

En ce qui concerne le chauffage des locaux résidentiels et tertiaires, les commentaires suivants du tableau ci-dessus complètent les indications déjà données au § V.3.b. :

- Les 5 Millions de logements chauffés par la filière [2] sont des pavillons ou maisons isolées. L'apport solaire est partiel (60 %, soit 1 TEP/log^t x an sur le total requis de 1,7 TEP/log^t x an[5]). La filière [I] fournit l'appoint nécessaire (3,5 MTEP[6]).
- Les 2,7 Millions de logements (et les 160 Mm^3 de locaux tertiaires correspondants) chauffés par la filière [3] sont situés, soit en zones rurales dans les petits villages, soit en lotissements de grande banlieue.
- Près de la moitié des logements et 70 % des locaux tertiaires sont chauffés par la filière [4]. Il s'agit des agglomérations : gros villages, petites villes, zones urbaines, gros ensembles tertiaires (plus de 1.000 logements ou 300.000 m^3 de locaux tertiaires). Dans ces agglomérations, les locaux inadaptés à la filière [4] sont chauffés par la filière [I].

(1) [CHARB.& COKE] - Dans la perspective d'un appel exclusif aux ressources renouvelables, le coke est fabriqué à partir de combustibles solides tirés de la bio-masse[7]. Sur la ligne CHARB.& COKE, on indique la circula-

(1) Voir III.2. et III.3. (2) Voir III.2.a. (3) Voir III.3.a.

(4) Le total BT de 47,8 (colonne Σ) est égal à 39,3 [case (6,1)] plus 8,5, apport de la filière [I] (voir 2.3.b. ci-dessus). Le total BT de 51,8 (colonne Σ + PERTES) est égal à 47,8 plus les pertes BT, 4,0 [case (7,1)]. Le total de 61,7 (colonne Σ + PERTES) est égal, d'une part au total BT de 51,8 ci-dessus plus les apports MT et HT [cases (8,2),(12,2),(12,3),(16,2)], d'autre part au total des apports du secteur solaire thermogène et des récupérations de chaleur (49,1 + 4,1) [cases (12,1),(12,2),(12,3) et (8,1), 9,1, 9,2, 13,1, 14,1 (16,1),(16,2)] plus celui (8,5) de la filière [I].

(5) Voir le tableau IV.1. en IV.2.a. (6) 3,5 = 5 x 0,7.

(7) Cependant, vu l'importance des réserves de charbon, on peut penser que pendant des siècles le coke pourra encore être fabriqué à partir de charbon...

tion correspondant à cette production du coke (3,8 MTEP[1]); les cokeries consomment 3,8 + 1,2 = 5,0 MTEP de CS et fournissent 3,8 MTEP de coke [la case (16,4) faisant apparaître la différence 3,8 - 5,0 = - 1,2], 0,6 MTEP de gaz de hauts fourneaux [case (16,6)] et 0,2 MTEP de chaleur de récupération [cases (16,1),(16,2)].

(j) [TOTAUX PRIMAIRES] - Le tableau suivant récapitule les divers apports d'énergies primaires :

Tableau V.9. - Répartition des apports primaires.

VECTEUR D'ÉNERGIE	MTEP	%
Chaleur tirée de déchets (BT & MT)	0.4	0.3
Chaleur solaire BT	42.5	28.2
Chaleur solaire MT	6.3	4.0
Chaleur solaire HT	3.3	2.1
CS tirés de déchets	4.0	2.6
CS tirés de bio-masses	22.1	14.1
CL tirés de bio-masses	14.9	9.6
CG tirés de bio-masses (méthane)	2.8	1.8
Hydrogène électrolytique	12.5	8.0
Electricité hydraulique & marémotr.	27.5	17.6
Electricité éolienne	6.7	4.3
Electricité solaire directe	13.0	8.3
Total énergie primaire	156.0	100.0

On souligne la diversité de l'approvisionnement ainsi réalisé par opposition à la concentration actuelle.

V.5. Régulation du système électrique.

(a) Le déphasage entre la demande d'électricité et la production des filières non-modulables (Fil de l'eau, éoliennes, centrales solaires) impose une régulation pour réaliser à chaque instant l'équilibre que reflète le bilan annuel[2]. Au niveau rudimentaire de cette étude, on tente de rendre plausible la réalisation de cet équilibre pour le système proposé en envisageant successivement ci-dessous la régulation inter-saisonnière et le passage des pointes.

(b) Le tableau suivant donne d'abord un schéma de la régulation inter-saisonnière.

(1) Voir le tableau V.2. en V.2.c.

(2) Voir le tableau V.1.

Tableau V.10. - Bilans électriques saisonniers.

SAISONS	PRODUCTION								Σ (MTEP)	CONSOMMATION		
	HYDRAUL.		EOLIEN		SOLAIRE		Σ_o (MTEP)	THERM. (MTEP)		ELECTROLYSE (MTEP)	DEMANDE	
	%	MTEP	%	MTEP	%	MTEP					%	MTEP
HIVER	26	7.1	30	2.0	18	2.3	11.5	2.2	13.7	0.5	27	13.2
PRINTEMPS	27	7.5	24	1.6	32	4.2	13.3	0.6	13.9	2.2	24	11.7
ÉTÉ	24	6.6	20	1.2	32	4.2	12.0	0.5	12.5	2.3	21	10.2
AUTOMNE	23	6.3	26	1.8	18	2.3	10.4	3.7	14.1	0.5	28	13.6
TOTAUX	100	27.5	100	6.7	100	13.0	47.2	7.0	54.2	5.5	100	48.7

Dans la colonne Σ figurent les sommes, saison par saison, d'une part des consommations, d'autre part des productions (sommes dont l'égalité exprime l'équilibre saisonnier). Dans la colonne Σ_o figurent, saison par saison, les productions des secteurs hydraulique, éolien et solaire.

La répartition de la production hydraulique (y compris marémotrices) tient compte des reports inter-saisonniers que permettent les réservoirs des lacs[1]. Les secteurs éolien et solaire ne permettent par contre aucun report saisonnier ; les répartitions indiquées pour ces secteurs résultent donc d'évaluations des apports naturels. La répartition de la demande est analogue à celle de 1975. Cela étant, on voit clairement sur le tableau le rôle modulateur du thermique et de l'électrolyse. La production directe (colonne Σ_o) excède la demande au printemps et en été ; le thermique est alors limité au minimum nécessaire à la régulation quotidienne (piles à combustible), tandis que l'excédent alimente l'électrolyse. Par contre, la demande excède la production directe en hiver et en automne ; le thermique assure alors la différence, tandis que l'électrolyse est limitée à des régulations locales.

(c) En ce qui concerne ensuite la modulation quotidienne, le tableau suivant analyse les apports de puissance permettant le passage des pointes.

Tableau V.11. - Puissances appelables et puissances installées (unité : 1 GW = 10^6 kW).

FILIÈRES	PUISSANCES (GW)	
	APPELABLE	INSTALLÉE
HYDRAULIQUE	16.4	20.0
MARÉMOTRICE	3.0	6.0
POMPAGE	10.0	10.0
THERMIQUE : PILES	5.0	5.0
THERMIQUE : CS	2.0	5.0
EOL. & SOLAIRE	2.6	44.3
TOTAUX	39.0	90.3

(1) Répartition analogue à celle des énergies appelées en 1975.

Le total de 39 GW (colonne APPELABLE) correspond à la pointe annuelle de la demande évaluée à partir de celle de 1975 (31 GW) au prorata des consommations annuelles (48,7 contre 40 MTEP). Les chiffres de la colonne APPELABLE indiquent une répartition possible de cette pointe annuelle entre les diverses filières. Ces chiffres ont en fait des significations diverses selon les filières :

- Pour l'hydraulique, le chiffre indiqué (16,4 GW) est évalué à partir de la situation en 1975 (11 GW hydrauliques appelés pour la pointe annuelle) au prorata des productibilités totales (20 contre 13,4 MTEP).
- Pour le pompage et le thermique-piles, qui ont justement pour fonction de permettre le passage des pointes, la puissance appelable coïncide avec la puissance installée.
- Pour les autres filières (marémotrices, thermique CS, éolien & solaire), il faut considérer le chiffre indiqué plutôt comme une valeur moyenne que comme une valeur maximum. En particulier, on ne considère comme appelable qu'une faible fraction (2,6 GW sur 44,3) des puissances éoliennes (15 GW) ou solaire (29,3 GW) installées pour tenir compte des aléas climatiques.

Notons aussi que le rapport puissance appelable/puissance installée est nettement supérieur au rapport actuel (90,3/39 = 2,32 au lieu de 48/32 = 1,50 en 1975). Cela tient à ce que les centrales solaires ou éoliennes ont une durée annuelle de fonctionnement inférieure à celle des centrales thermiques (2.000 heures contre 3.000 à 6.000) ainsi qu'un rythme de production non modulable.

V.6. Commentaires et variantes

(a) La puissance solaire-électrogène installée qui intervient dans la production d'hydrogène par électrolyse (104 GW[1]) est très importante. Il est clair que la disponibilité d'*un procédé direct de production d'hydrogène par photolyse de l'eau* (avec une productivité notablement supérieure aux 50 TEP/ha x an que permet la filière [10] retenue ici) entrainerait une amélioration considérable du système proposé.

Dans l'esprit techniquement conservatif de ce travail[2], il n'a pas semblé raisonnable de faire l'hypothèse d'un tel procédé. On souligne que, malgré ce caractère conservatif, les superficies consacrées à la production d'hydrogène ne sont pas rédibitoires (0,34 Mha dont les 3/4 en SM), en particulier, en comparaison des superficies (5 Mha de SF et 2,5 Mha de SA) consacrés à la production de CS et CL[3].

(b) Compte tenu de la remarque (a), une variante au régime d'auto-subsistance énergétique proposé pourrait consister à remplacer la majeure partie des CS consommés par de l'hydrogène et à importer l'hydrogène consommé.

L'hydrogène en cause pourrait être produit électrolytiquement par des centrales solaires situées en zones subtropicales (au Sahara par exemple), par des centrales utilisant le gisement hydraulique des zones polaires (au Groenland par exemple) ou par des grosses éoliennes océaniques utilisant la puissance des alisés. Ces importations pourraient être compensées par des exportations de produits agricoles (céréales) cultivés sur les terres consacrées à la production de CS dans le régime proposé. Cette variante, encore basée sur l'énergie solaire, mais non auto-subsistante, correspond davantage aux tendances actuelles à l'interdépendance planétaire.

(c) On peut aussi envisager la disponibilité d'un procédé de photolyse directe du gaz carbonique de l'air et de l'eau conjointement, procédé fournissant des combustibles ou carburants (CS, CL, CG) hydrocarbonés avec une productivité nettement supérieure à celle des complexes agro-énergétiques basés sur la photosynthèse (par exemple 50 TEP/ha x an contre moins de 5[4]). Il serait alors possible de restreindre considérablement les superficies forestières ou agricoles consacrées à la production de CS, CL ou CG. Par exemple, 2 Millions d'hectares pourraient fournir 100 MTEP par an de CL ou CG, permettant ainsi des consommations plus élevées et un moindre appel à l'hydrogène, vu que les hydrocarbures (ou autres carburants) liquides ou gazeux sont plus faciles à utiliser et surtout à stocker que l'hydrogène.

(1) Voir le tableau V.7., colonne H en V.4.e.
(2) Voir III.1. et III.6.
(3) Voir V.4.c. ci-dessus et V.6.c. et d. ci-après.
(4) Voir le tableau III.3. en III.4.b.

Outre que la disponibilité d'un tel procédé n'est pas en vue, le système énergétique qu'il permettrait donnerait lieu à un déséquilibre en faveur des CL analogue à celui du système actuel, déséquilibre auquel s'oppose la diversité du système proposé[1].

(1) Voir V.4.j.

Annexe

EBAUCHE D'UN SCENARIO DE TRANSITION

A.1. Préliminaire

(a) La crédibilité d'une vision à long terme dépend évidemment de la transition correspondante. Il paraît donc raisonnable d'indiquer un schéma quantitatif et les idées directrices du scénario de transition envisagé ; cela bien que son étude économique élaborée[1] reste à faire et soit donc susceptible de modifier profondément les chiffres présentés ci-dessous (ainsi d'ailleurs que ceux du régime à long terme).

(b) Cette esquisse d'un scénario de transition est envisagée dans le même esprit que le régime à long terme, c'est à dire comme une *anticipation* indiquant un avenir énergétique possible pour la France et non comme une *prévision* concernant ce qui se passera de fait[2]. Cependant, l'analyse technique est ici beaucoup plus succincte (et pour cause ...) que celle du régime à long terme ; cela justifie son report en annexe du texte principal.

A.2. Tableau diachronique

(a) Le tableau A.1.* présente le scénario avec deux variantes à moyen terme, l'une (SC1) avec un appel modéré à l'énergie nucléaire et l'autre (SC2) sans un tel appel. Le tableau indique, en colonnes, les bilans énergétiques globaux (toutes énergies incluses[3]) pour 4 années type [1985, 2000, 2025, 2050]. Il indique aussi :

- le bilan de démarrage [1975] et le bilan correspondant au régime à long terme [-],
- le bilan correspondant aux prévisions du VIIe plan pour 1985 [1985, VIIe Pl.] et un bilan pour l'an 2000 [2000, VIIe Pl.] correspondant à l'hypothèse basse de l'esquisse tendancielle du VIIe plan[4] afin de faciliter les comparaisons.

(b) Le bloc UTILISATION (partie supérieure) fournit ligne par ligne les consommations des divers secteurs d'utilisation, avec leur somme (*total des utilisations finales* ou *total secondaire*) sur la ligne TOT.ENERGIE DISTRIBUEE. Les produits pétroliers utilisés comme matière première non énergétique sont exclus des consommations ; par contre, le charbon utilisé sous forme de coke y est inclus.

Les blocs PRODUCTION FOSSILE et PRODUCTION RENOUVELABLE (partie inférieure) fournissent, ligne par ligne, les apports des divers secteurs d'approvisionnement (apports primaires) avec leur somme (*total primaire*) sur la ligne TOT.du bloc ENERGIE PRIMAIRE. La différence entre cette ligne et la ligne TOT.ENERGIE DISTRIBUEE mesure les pertes à la transformation et à la distribution. Pour les énergies fossiles, on distingue la production nationale (sous ligne PROD.) et les importations (sous ligne IMP.). La somme de ces dernières figure sur la ligne IMP.du bloc ENERGIE PRIMAIRE, tandis que la somme des apports renouvelables et des productions nationales d'énergies fossiles figure sur la ligne PROD. du même bloc. En ce qui concerne l'apport des centrales solaires électrogènes (ligne SOLAIRE ELECTROGENE), on distingue ce qui est distribué en électricité (sous ligne ELECT.) de ce qui est transformé en hydrogène par électrolyse (sous ligne HYDR.). Enfin, le secteur HYDRAULIQUE inclut les usines marémotrices.

(c) L'unité d'énergie utilisée est la MTEP[5], l'électricité est comptée avec l'équivalence nominale 1 MTEP = 4,5 TWh[6].

* tableau page 58.

(1) Voir I.2.f. (2) Voir aussi V.1.a.et c. et I.4.b. et c.
(3) Ce bilan correspond à celui qui figure dans la colonne I des bilans d'approvisionnement-distribution (voir II.5.).
(4) Cette esquisse est présentée dans les documents du plan plutôt comme anticipation que comme prévision, c'est à dire dans une démarche analogue à celle adoptée ici.
(5) 1 Million de tonnes d'équivalent pétrole ; voir II.4.a. (6) Voir II.4.c.

A.3. Traits principaux du scénario

(a) L'examen du tableau A.1.* fait apparaître le *"phénomène de bosse"* : les consommations passent par un maximum assez plat peu après 1985 pour décroître ensuite lentement vers celles du régime stable à long terme. La stabilisation et la mise en place du système énergétique auto-subsistant caractéristique de ce dernier ne s'achèvent qu'après 2050.

On trouvera en A.4. des arguments rudimentaires justifiant les niveaux maximum atteints(1) et la durée de la période de conversion(2). Dans les alinéas (b), ..., (i) ci-après, on essaye de décrire les traits principaux du processus envisagé, à défaut de pouvoir ici en modéliser la dynamique économique(3).

(b) La population se stabilise progressivement : elle est de 56 Mha en 1985 (croissance moyenne de 0,6 % entre 1975 et 1985), de 58,5 Mha en 2000 (croissance moyenne de 0,3 % entre 1985 et 2000) et se rapproche ensuite lentement du chiffre de 60 Mha envisagé à long terme.

(c) Dans la *première période* (1975-2000), la croissance de la production industrielle se poursuit en se ralentissant progressivement, avec un taux moyen de croissance annuelle entre 1,5 % et 2 % jusqu'à 1985 et inférieur à 1 % ensuite(4). Le potentiel industriel est employé :

- d'une part à amener en l'an 2000 le niveau moyen de consommation et d'équipement de la population à celui prévu à long terme(5) qui est considéré comme un *niveau de saturation*,
- d'autre part à réorganiser l'appareil de production et de consommation de manière à économiser l'énergie et les matières premières et fabriquer des matériels plus durables(6),
- enfin, à alimenter les exportations permettant en échange d'importer, entre autres mais en priorité, les combustibles fossiles dont la place est encore dominante dans l'approvisionnement énergétique du pays.

En effet, pendant cette période, au moins jusqu'en 1990, l'apport des techniques nouvelles se limite aux économies d'énergie et au chauffage des locaux : on entreprend un effort de recherche et de développement à grande échelle (construction de prototypes variés) de manière à mettre soigneusement au point les filières et la structure du système énergétique qui sera mis en place ensuite(7).

Parallèlement à cet effort de recherche, l'équipement hydro-électrique est poursuivi activement ainsi que l'équipement charbonnier et l'équipement gazier(8).

(d) A la fin de cette première période (vers 1995), un vaste programme de reconversion est mis en oeuvre progressivement : le potentiel industriel qui servait précédemment à assurer la croissance de la production de biens de consommation courante et du parc de biens d'équipement (croissance n'ayant plus de raison d'être pour cause de saturation au niveau prévu) est redéployé(9) pour assumer la production du matériel qui doit assurer l'approvisionnement énergétique(10) du pays à partir de l'énergie solaire.

(e) Pendant la *période suivante* (2000-····), le potentiel industriel est employé -outre l'entretien et l'amélioration du parc existant et la charge des exportations(11)- à la mise en place du nouveau système énergétique (y compris les transports). Cette mise en place progressive semble devoir durer assez longtemps (60 ans au moins) ainsi que le laisse entendre l'argument d'analyse énergétique qui est développé en A.4.f. On voit dans le tableau A.1. que cette mise en place, à peine amorcée en 2000, bat son plein en 2025 et est presque terminée en 2050 (on note que le bilan 2050 diffère peu du bilan -).

* Tableau page suivante.

(1) Voir A.4.b., c., d. (2) Voir A.4.f. (3) Voir I.2.f. et A.1.a. ci-dessus.
(4) Voir A.4.c. à ce sujet. (5) Voir I.3.b. et IV.2. (6) Voir IV.3.c. et A.4.c.
(7) Voir (d) et (e) ci-après. (8) Voir (g), (h) et (i) ci-après.
(9) Dans l'étude économique annoncée, on utilisera systématiquement la distribution entre investissements d'entretien (du parc existant) et investissements de croissance ou de redéploiement.
(10) Approvisionnement énergétique et approvisionnement en matières premières (par exemple : chimie organique à partir de la bio-masse).
(11) Voire une très faible croissance (≈ 0,1 %) parallèle à celle de la population pas encore tout à fait stabilisée.

Tableau A.1. - Bilans du scénario (unité : 1 MTEP)

			1975	1985 VII^e Pl.	2000 VII^e Pl.	1985 SC1	1985 SC2	2000	2025	2050	∞
UTILISATION	RESIDENTIEL-TERTIAIRE		53.9	79.4	113	62	62	65	61.5	61.5	61.5
	TRANSPORTS		31.4	43.0	66	33	33	30	26	23	20,5
	AGRICULTURE		5.5	7,0	9	6	6	6	6	6	6
	SIDERURGIE		12.4	16.8	22	12.5	12.5	12	11	10.5	9.5
	INDUSTRIE		42.9	61.3	90	54.5	54.5	53	50	48	44
TOT. ÉNERGIE DISTRIBUÉE			146.5	207.5	300	168	168	166	154.5	149	141.5
ÉNERGIE PRIMAIRE		TOT.	166.0	232	335	189	189	186	172	165	156
		PROD.	45.0	95	160	60	50	72	114	150	156
		IMP.	121.0	137	175	129	139	114	58	15	
PRODUCTION RENOUVELABLE	RÉCUPÉRATION		1.0	1	2	3	3	4	4.5	4.5	4.5
	SOLAIRE AGRICOLE		0.8	ε	ε	2	2	8	23	38.5	40.5
	SOLAIRE ÉLECTROGÈNE	ELECT.			6	ε	ε	1	6	12	13
		HYDR.						ε	6	12	13
	HYDRAULIQUE		13.4	14	15	14	15	24	26.5	27	27
	ÉOLIEN						8	1	4	7	7
	SOLAIRE THERMIQUE			0.5	5	1	1	8	28	46	51
PRODUCTION FOSSILE	GÉOTHERMIE			2.5	4	3	3	6	4	3	
	CHARBON	PROD.	17.3	16	10	20	20	20	10		
		IMP.	3.9	9	15	14	20	20	20	10	
	PÉTROLE	PROD.	1.4								
		IMP.	100.4	98	125	90	94	69	23	5	
	GAZ	PROD.	6.6	6		6	6				
		IMP	10.7	30	35	25	25	25	15		
	URANIUM	PROD.	3.9	55	124	11					
		IMP.									

(f) L'appel aux *énergies fossiles*, principalement importées, diminue progressivement, après un maximum peu après 1985, au fur et à mesure que sont mises en oeuvre la réorganisation à l'économie (déjà bien avancée en 2000[1]) et les techniques de production renouvelables.

Une question cruciale est évidemment celle du *niveau des importations* à moyen terme : on note qu'en 1985, elles dépassent à peine le total (et cela ni en pétrole ni en gaz) de celles prévues par le VIIe plan[2], même dans la variante sans appel au nucléaire [1985, SC2]. En l'an 2000, la dépendance qui apparaît dans l'esquisse du VIIe plan [2000, VIIe Pl.] est considérable (1,45 fois en valeur énergétique celle de 1975) malgré l'apport nucléaire avec intervention des surrégénérateurs[3], alors que dans le bilan 2000 proposé, elle a déjà nettement commencé à décroître.

(g) Les deux variantes (SC1 et SC2) diffèrent par le mode de production électrique, pour une même capacité de production (environ 215 TWh).

Dans la variante SC1, la capacité de production du thermique classique reste en 1985 ce qu'elle était en 1975 (100 TWh) ; l'augmentation de la capacité totale est essentiellement le fait de la capacité nucléaire (de 18 à 45 TWh). Cette capacité nucléaire en 1985 (45 TWh = 11 MTEP[4]) correspond à une dizaine de

(1) Voir A.4.c.
(2) Dans l'esquisse du VIIe plan [bilans 1985 et 2000, VIIe Pl.], les productions énergétiques indiquées à partir de l'Uranium (55 MTEP en 1985 et 124 MTEP en 2000) correspondent à des parcs de 45 tranches PWR de 1 000 MW(e) en 1985 et de 100 tranches en 2000 dont 40 surrégénérateurs (chargés après 1995 avec le plutonium produit par les PWR). Les réserves territoriales en Uranium (100.000 tonnes d'Uranium naturel, c'est à dire l'équivalent d'un peu moins de 1 000 MTEP en utilisation par des réacteurs PWR) ne suffisent à alimenter un tel parc que jusque peu après 2000. Ensuite, il faut envisager des importations d'Uranium. En effet, le temps de doublement dans les surrégénérateurs est trop long pour leur permettre de remplacer rapidement tous les PWR. La variante consistant à faire débuter ces importations dès 1985 permettrait de mieux utiliser les réserves territoriales comme tampon face aux aléas du marché mondial.
(3) Voir la note (2).
(4) Voir le tableau.

tranches PWR de 900 MW[1]. Ces tranches ne sont pas renouvelées à la fin de leur durée de vie (15 à 20 ans), mais remplacées par des tranches au charbon avant l'an 2000.

Dans la variante SC2, sur les 11 MTEP apportées en 1985 par le nucléaire dans SC1, 10 le sont par des centrales au charbon construites après 1978[2] et 1 par un renforcement de l'hydraulique (15 au lieu de 14). Ainsi les deux variantes coïncident après l'an 2000. La différence entre elles du point de vue équipement réside essentiellement en ce que ces centrales au charbon sont construites après 1990 dans SC1 et avant 1985 dans SC2[3].

Après 1985, la consommation d'électricité reste pratiquement stable (un peu inférieure à 200 TWh) jusqu'au régime à long terme. Le remplacement du thermique classique par le potentiel renouvelable se fait progressivement : avant l'an 2000, la productibilité hydro-électrique est portée à 75 TWh et l'usine marémotrice des Iles Chausey (34 TWh) est réalisée. L'équipement éolien et les centrales solaires se développent ensuite (i.e après l'an 2000) lentement[4]. En particulier, l'apport à grande échelle de ces dernières n'intervient que vers 2015.

(h) L'appel au charbon est important à moyen terme et même jusqu'au delà de 2025. En particulier, il remplace en grande partie le fuel dans les centrales thermiques. Les procédés modernes de combustion peu polluante (lits fluidisés) sont systématiquement développés. Cependant, le niveau maximum de consommation primaire (40 MTEP dont 20 importées) reste nettement au dessous du niveau atteint au début des années 60 (49 MTEP en 1964). Le dosage entre pétrole et charbon est à faire en fonction des coûts d'importation. Les installations mixtes sont développées pour faciliter ce dosage. Le scénario proposé correspond à un coût de la thermie charbon inférieur à celui de la thermie fuel, mais pas très inférieur (hypothèse du plan).

A partir de l'an 2000, le charbon est progressivement remplacé par l'apport solaire direct et par les combustibles solides tirés de la bio-masse[5]. La production du secteur solaire agricole est principalement constituée de tels combustibles jusque vers 2020.

(i) L'appel au *gaz naturel* est également important, au moins jusqu'en 2000. Il est ensuite progressivement remplacé par l'apport solaire direct et, à partir de 2025, par l'hydrogène électrolytique[6]. Cependant, le caractère coûteux de ce dernier, qui en limite la production à long terme[7], entraine aussi une limitation du recours au gaz naturel à moyen terme (31 MTEP en 1985 contre 37 prévus au VIIe plan), cela afin d'éviter des problèmes de reconversion lors de l'épuisement de ce dernier (un peu après 2025).

En ce qui concerne les *produits pétroliers liquides*, la démarche consiste à en limiter progressivement la consommation énergétique aux transports[8] et aux engins[9]. Dans leurs usages thermiques, ils sont remplacés par l'apport solaire direct, par le charbon ou par les combustibles solides tirés de la bio-masse. Dans le bilan 2025, cette réorganisation achevée, 27 MTEP de carburants liquides sont consommés (23 par les transports sur le total de 26 et 4 par les engins). Pour assumer cette consommation, il faut ajouter aux importations (21 MTEP, compte tenu des pertes) la production du secteur agricole en carburants liquides (6 MTEP). Dans le bilan 2050, voisin du bilan =, la consommation de carburants liquides n'est plus que de 18 MTEP, car une partie des véhicules est alimentée à l'hydrogène. Cette consommation est assumée en majeure partie (13 MTEP) par la production du secteur agricole.

Dans le scénario proposé, l'usage de *carburants synthétiques* (gazeux ou liquides) fabriqués en usine à partir de charbon préalablement extrait n'est pas envisagé : pour les usages thermiques, le charbon lui même est utilisé (avec les procédés modernes de combustion[10]; le carburant liquide est limité à ses usages spécifiques. Cependant, il n'est pas exclu qu'après l'an 2000 une partie du gaz importé soit produit par gazéification in-situ dans certains gisements étrangers favorables.

(1) Sensiblement les tranches terminées avant 1980.
(2) De telles centrales ont été engagées par EDF à l'automne 1977 pour pallier le retard du programme nucléaire.
(3) Ces deux variantes sont introduites pour illuster le caractère contingent de l'appel au nucléaire dans la perspective d'une stabilisation des consommations. L'influence sur l'économie du pays d'un arrêt du développement de l'industrie nucléaire, puis sa contraction sera analysée dans l'étude détaillée : la place de cette industrie est encore marginale et la reconversion de son potentiel vers l'energie solaire est possible.
(4) Voir A.4.f.
(5) Voir III.4.d. En ce qui concerne la gazéification ou la liquéfaction du charbon, voir (i) ci-dessous.
(6) La production de méthane par fermentation de bio-masse n'est pas à négliger, mais elle ne semble pas pouvoir dépasser quelques MTEP (2,8 dans le bilan à long terme ; voir V.4.c.).
(7) Voir V.6.b.
(8) Sauf les chemins de fer et une partie des transports urbains qui sont électriques, ainsi que certains véhicules qui sont alimentés à l'hydrogène.
(9) Agricoles et industriels.
(10) Voir (h) ci-dessus.

A.4. Quelques évaluations

(a) Dans les alinéas ci-dessous, on donne des arguments rudimentaires justifiant les valeurs de quelques paramètres déterminant du scénario proposé : niveaux de consommation, du secteur résidentiel-tertiaire en (b), de l'industrie en (c), des transports en (d) ; durée de la période de mise en place du nouveau système énergétique en (f).

(b) Conformément à A.3.c., ci-dessus, entre 1975 et 2000, le niveau de vie de la population est amené à celui prévu à long terme. Dans le secteur *résidentiel-tertiaire*, cela signifie que le volume des locaux est amené à 5,2 Gm^3[1] pour le résidentiel et à 1,4 Gm^3 pour le tertiaire[2].

Pour analyser les modalités d'une telle transformation et évaluer les consommations énergétiques du secteur en cours de transformation, on distingue les *locaux anciens*, les *locaux rénovés* (du point de vue isolation thermique, régulation, etc ...) et les *locaux nouveaux*, les locaux incluant tout leur équipement (équipement ménager pour les locaux résidentiels, équipements de service pour les locaux tertiaires). On caractérise chacun des types de locaux du point de vue énergétique par le coefficient technique "*consommation unitaire*" constitué par la consommation globale d'énergie, toutes énergies incluses (chauffage et équipement), par unité de volume et par an ; ce coefficient est mesuré en MTEP/Gm^3 x an.

Le tableau A.2., ci-après, fournit l'évolution possible des parcs résidentiels et tertiaires et leurs consommations énergétiques correspondant aux années types 1975[3], 1985, 2000, 2025, ∞.

Tableau A.2. - Evolution du secteur résidentiel-tertiaire.

		Cons.Unit.	1975 (1)		1985 (2)		2000 (2)		2025		∞	
		MTEP/Gm^3	Gm^3	MTEP	Gm^3	MTEP	Gm^3	MTEP	Gm^3	MTEP	Gm^3	MTEP
RÉSIDENTIEL	LOGEMENTS ANCIENS	10.11	3.80	38.4	3.66	37.0	2.26	22.9	—	—	—	—
	LOGEMENTS RENOVÉS	8.85	—	—	0.42	3.7	1.82	16.1	—	—	—	—
	LOGEMENTS NOUVEAUX	8.85	—	—	0.42	3.7	1.12	9.9	5.20	46.0	5.20	46.0
	TOTAUX RÉSIDENTIEL		3.80	38.4	4.50	44.4	5.20	48.9	5.20	46.0	5.20	46.0
TERTIAIRE	TERTIAIRE ANCIEN	14.62	1.06	15.5	0.94	13.7	0.14	2.1	—	—	—	—
	TERTIAIRE RÉNOVÉ	11.07	—	—	0.24	2.7	1.04	11.5	—	—	—	—
	TERTIAIRE NOUVEAU	11.07	—	—	0.12	1.3	0.22	2.5	1.40	15.5	1.40	15.5
	TOTAUX TERTIAIRE		1.06	15.5	1.30	17.7	1.40	16.1	1.40	15.5	1.40	15.5
TOTAUX RÉSID-TERTIAIRE			4.86	53.9	5.80	62.1	6.60	65.0	6.60	61.5	6.60	61.5

Ce tableau est basé sur les hypothèses suivantes :

- La consommation unitaire des locaux anciens est celle de 1975, la consommation des locaux rénovés comme des locaux nouveaux est celle résultant de l'analyse faite pour le régime à long terme en IV.2.a et b. Les chiffres correspondants figurent dans la colonne CONS.UNIT. du tableau A.2.

(1) 1 Gm^3 = 1 Milliard de mètres cube.
(2) Voir IV.2.a et b. à ce sujet : 5,2 Gm^3 correspondent à 20 millions de logements de 260 m^3. Il faut raisonner ici en volume de locaux et non en nombre de logements puisque la transformation prévue comporte une augmentation du volume unitaire des logements, ce volume passant de 195 m^3 (75 m^2) en 1975 à 260 m^3 (100 m^2).
(3) Les constructions réalisées entre 1975 et 1978 sont considérées comme locaux anciens : la construction et la rénovation "à l'économie" ne commencent qu'en 1979, ce qui est sans doute pessimiste. Le volume des locaux résidentiels en 1975 correspond à 19,5 MLogts de 195 m^3 en moyenne (les logements vacants sont exclus).
(4) Au début de 1979 (i.e au moment où commencent constructions de locaux nouveaux et rénovation) le volume de locaux résidentiels est de 3,80 + 4 x 0,07 = 4,08 Gm^3 et celui des locaux tertiaires de 1,06 + 4 x 0,03 = 1,18 Gm^3, tous ces locaux sont considérés comme anciens.
(5) Une partie du potentiel de construction de locaux tertiaires nouveaux est utilisée pour la rénovation entre 1985 et 2000.

- Le potentiel de construction de locaux nouveaux (déduction faite de l'entretien et du renouvellement des locaux anciens) est de 0,07 Gm^3/an pour le résidentiel[1] et de 0,03 Gm^3/an pour le tertiaire[2].
- L'effort national en faveur des économies d'énergies à partir de 1979 permet la rénovation annuelle des mêmes volumes, avec transfert possible de la construction vers la rénovation (mais pas l'inverse).

On note que le volume total des locaux, tant résidentiels que tertiaires, atteint en 2000 le volume de saturation prévu à long terme, mais que la rénovation complète n'est pas alors terminée (elle l'est par contre en 2025). Cette saturation sous entend, bien sûr, que la population n'a pas dépassé le niveau à long terme de 60 Millions d'habitants, ce qui fait partie de la perspective proposée en A.3.b.

(c) On cherche à évaluer maintenant les consommations énergétiques du secteur *industrie + sidérurgie* en 1985 et en 2000 qui correspondent au processus de stabilisation et d'économie énoncé en A.3.c. Pour cela, s'écartant résolument des extrapolations courantes en la matière, on va utiliser une démarche analogue à celle introduite en IV.3.c. On représente, comme dans cet alinéa, chaque état de l'appareil de production par un couple (α,β) de consommations énergétiques unitaires (par habitant et par an ; consommations mesurées en TEP/hab x an) respectivement pour la production des biens de consommation courante (coefficient α) et pour celle des biens d'équipement ou des biens intermédiaires (coefficient β).

Partant comme en IV.3.c. du couple (α_0,β_0) qui représente l'état en 1973, avec :

(1) $$\alpha_0 = 0{,}42 \text{ TEP/hab x an} \quad \text{et} \quad \beta_0 = 0{,}70 \text{ TEP/hab x an}^{(3)},$$

pour chaque année n, on propose de calculer le couple (α_n,β_n) correspondant au moyen des formules :

(2) $$\alpha_n = \alpha_0 \times (1 + u'_n) \times W'_n \times (1 - e'_n)$$

(3) $$\beta_n = \beta_0 \times (1 + u''_n) \times V_n \times W''_n \times (1 - e''_n)$$

Ces formules prennent en compte l'augmentation des besoins de la population $(1 + u_n)$, celle de la durée de vie des produits (V_n), celle des charges à l'exportation (W_n) et les économies d'énergie (e_n).

Plus précisément, les coefficients u'_n, u''_n, V_n, W'_n, W''_n, e'_n, e''_n, ont les significations suivantes :

- e'_n et e''_n représentent les taux d'économies d'énergie réalisées, l'année n par rapport à l'année de référence 1973, à production constante. Par exemple, 5 % d'économie dans la production des biens de consommation courante donne : $e'_n = 0{,}05$; etc ...
- u'_n et u''_n représentent respectivement les taux d'accroissement (à l'année n par rapport à l'année 1973 et par habitant x an) de la consommation de biens courants et du parc de biens d'équipement. Par exemple, un accroissement de 54 % du parc de biens d'équipement donne : $u''_n = 0{,}54$; etc ...
- W'_n et W''_n constituent des coefficients de sécurité (donc > 1) destinés à prendre en compte des facteurs supplémentaires de consommation. Par exemple une charge accrue des exportations.
- V_n est destiné à prendre en compte l'influence de la durée de vie des biens d'équipement en même temps que celle du taux de croissance du parc l'année n. On propose l'expression :

(4) $$V_n = \left(\frac{1}{d_n} + \gamma_n\right)\Big/\left(\frac{1}{d_0} + \gamma_0\right),$$

où d_n, d_0 sont les durées de vie moyennes (en années)[4] et γ_n, γ_0 sont les taux de croissance annuelles du parc, respectivement l'année n et l'année de référence. Par exemple, une croissance de 5,8 % l'an en 1973 donne $\gamma_0 = 0{,}058$[5] ; etc ...

(1) Ce chiffre correspond à 320.000 logements de 220 m (85 m) par an ; c'est à dire les deux tiers de l'investissement annuel total (500.000 logements de 1973 à 1975) ; le troisième tiers étant supposé servir au renouvellement de logements anciens.
(2) Ce chiffre correspond à la moitié de l'investissement annuel en locaux tertiaires en 1973 et 1974, l'autre moitié étant supposée servir au renouvellement des locaux anciens (équipement compris).
(3) Voir IV.3.c. : relation (2).
(4) Les taux de dépréciation annuels $1/d_n$, $1/d_0$ sont sans doute des concepts moins vagues que les durées de vie "moyennes" d_n, d_0.
(5) Voir la relation (12) ci-après et la note s'y afférant.

La relation (4) peut être justifiée en remarquant que, si x_n et z_n sont respectivement le volume du parc et celui de la production l'année n, d'une part, on a :

(5) $$z_n = \frac{x_n}{d_n} + \gamma_n x_n = \left(\frac{1}{d_n} + \gamma_n\right) x_n$$ (1) ;

d'autre part, à technique constante, la consommation d'énergie est proportionnelle à la production z_n.

Dans les termes précédents, le taux d'accroissement de la production industrielle entre l'année de référence et l'année n vaut, pour les biens de consommation courante :

(6) $$\rho'_n = \left[\frac{P_n}{P_0} \times (1 + u'_n) \times W'_n\right] - 1$$

et pour les biens d'équipement et les biens intermédiaires :

(7) $$\rho''_n = \left[\frac{P_n}{P_0} \times (1 + u''_n) \times V_n \times W''_n\right] - 1$$

où P_n et P_0 sont les populations. Des relations (6), (7) on passe à (2), (3) en passant des productions aux consommations d'énergie correspondantes. On voit que, mis à part les coefficients de sécurité W'_n et W''_n ; la croissance de la production, donc des consommations d'énergie qu'elle requiert est, dans le modèle rudimentaire proposé ici, strictement gouvernée par les facteurs $(1 + u'_n)$ et $(1 + u''_n) \times V_n$, c'est à dire par celle des besoins de la population et de la durée de vie de son équipement(2).

Cela étant, pour obtenir les évaluations cherchées, il reste à donner des valeurs aux divers coefficients figurant dans les expressions (2) et (3).

Pour ce qui est des *économies d'énergie* : on prend 5 % en 1985 et 15 % en 2000 ; c'est à dire :

(8) $$e'_n = e''_n = 0{,}05 \text{ en } 1985$$

(9) $$e'_n = e''_n = 0{,}15 \text{ en } 2000.$$

Pour ce qui est des *besoins de la population*, la saturation en 2000 au niveau prévu à lont terme(3) donne :

(10) $$u'_n = 0{,}33 \quad \text{et} \quad u''_n = 0{,}54 \text{ en } 2000 ;$$

on prend en outre :

(11) $$u'_n = 0{,}18 \quad \text{et} \quad u''_n = 0{,}25 \text{ en } 1985,$$

ce qui correspond à une croissance plus forte avant 1985 qu'après, cela davantage pour les biens de consommation courante que pour les biens d'équipement(4).

En ce qui concerne V_n, on prend :

(12) $$d_0 = 8 \text{ ans} \quad \text{et} \quad \gamma_0 = 0{,}058/\text{an}$$ (5),

(13) $$d_n = 10 \text{ ans} \quad \text{et} \quad \gamma_n = 0{,}023/\text{an en } 1985$$ (6),

(14) $$d_n = 12 \text{ ans} \quad \text{et} \quad \gamma_n = 0{,}014/\text{an en } 2000$$ (7) ;

ce qui donne :

(15) $$V_n = 0{,}67 \text{ en } 1985 \quad \text{et} \quad V_n = 0{,}53 \text{ en } 2000.$$

(1) La production z_n sert à remplacer le matériel usé (terme x_n/d_n) et à assurer la croissance du parc (terme $\gamma_n x_n$). Un modèle plus élaboré devrait ajouter un terme pour les exportations ; leur charge sera ici grossièrement prise en compte par le facteur W''_n.

(2) On souligne l'écart méthodologique entre cette démarche en termes de besoins et celle procédant par extrapolation des consommations des années 60 (même avec amendement par des économies d'énergie) voir aussi IV.1. à ce sujet.

(3) Voir A.3.c. et l'hypothèse 1 en IV.3.c.

(4) Autant saturer les besoins durables; or l'augmentation de la durée de vie demande un délai.

(5) Le taux de croissance de la production a été de 5,8 % en 1973. Toutefois, le taux de croissance du parc et le taux de croissance de la production (de biens d'équipements) ne coïncident que si $(1/d_n) + \gamma_n$ ne varie pas avec n [relation (5)] ; ce qui est le cas en régime de croissance équilibrée. On admet qu'il en a été ainsi en 1973. de toutes façons, seules comptent, en ce qui concerne V_n, les valeurs de $(1/d_0) + \gamma_0$ et $(1/d_n) + \gamma_n$.

(6) $u''_{1985} = (1 + \gamma_{1985})^{10} : 1{,}25 = (1{,}023)^{10}$.

(7) $u''_{2000} / u''_{1985} = (1 + \gamma_{2000}) : 1{,}54/1{,}25 = (1{,}014)^{15}$.

Enfin, on prend :

(16) $\mu'_n = 1$ et $\mu''_n = 1,3$ en 1985 et en 2000,

pour tenir compte de la charge accrue des *exportations*, spécialement en biens d'équipement.

Dans ces conditions, on obtient, en 1985 :

(17) $\alpha_n = 0,42 \times 1,18 \times 0,95 = 0,47$ TEP/hab x an,

(18) $\beta_n = 0,70 \times 1,25 \times 0,67 \times 1,3 \times 0,95 = 0,72$ TEP/hab x an,

et en 2000 :

(19) $\alpha_n = 0,42 \times 1,33 \times 0,85 = 0,48$ TEP/hab x an,

(20) $\beta_n = 0,70 \times 1,54 \times 0,53 \times 1,3 \times 0,85 = 0,63$ TEP/hab x an.

Pour des populations de 56 Mhab en 1985 et 58,5 Mhab en 2000, cela donne comme consommations totales (industrie + sidérurgie) :

(21) $(0,47 + 0,73) \times 56 = 67,2$ MTEP en 1985,

(22) $(0,48 + 0,63) \times 58,5 = 64,9$ MTEP en 2000.

Sur ces totaux, il est raisonnable que la consommation de la sidérurgie ne dépasse pas, en 1985, celle de 1975 et ait commencé à décroître en 2000.

D'où les chiffres du tableau A.1. pour ce qui est de l'industrie et de la sidérurgie.

Les taux de croissance annuels moyens de la production totale [calculés à partir des formules (6) et (7), ci-dessus, en identifiant grossièrement l'année de référence à 1975] sont, pour les biens de consommation courante, de 2,2 % pour 1975-1985 et de 1,1 % pour 1985-2000 ; pour les biens d'équipement, de 1,4 % pour 1975-1985 et pratiquement de zéro pour 1985-2000. Ce taux de croissance nul est compatible avec le taux de croissance annuel moyen du parc de 1,7 %[1] au voisinage de 2000 à cause de la variation de la durée de vie (et du taux de croissance du parc) pendant cette période[2] : le potentiel industriel qui assure, avant l'an 2000, la croissance du parc est redéployé, après 2000, pour construire le nouveau système énergétique[3].

(d) En ce qui concerne les *transports*, la consommation retenue pour 1985 (33 MTEP) résulte de l'argument suivant : partant de la consommation de 1975 (31,4 MTEP), on distingue les transports de personnes (16,4 MTEP[4]) et les transports de marchandises (15 MTEP). Pour les premières, on admet, en 1985, un accroissement du parc par habitant de 15 %[5] et 10 % d'économies ; soit une consommation de 17,9 MTEP[6]. On admet d'autre part un accroissement du volume des marchandises transportées au prorata de l'accroissement de la production et 15 % d'économies par un transfert de la route au rail pour ce qui est des transports intérieurs ; ce qui donne 15,2 MTEP[7]. Au total 17,9 + 15,2 = 33,1 MTEP.

Après 1985, la restructuration du système des transports mise en oeuvre pour conduire au régime à long terme (20,5 MTEP) entraine une baisse progressive de la consommation du secteur.

En ce qui concerne l'agriculture, les transformations envisagées influent peu sur les consommations énergétiques[8].

(1) 1,7 = 1,4 x 58,5/56 ($\gamma_n = 0,014$ en 2000).
(2) Voir la note (5) page précédente.
(3) Voir A.3.d. et e.
(4) Voir IV.2.c. alinéa suivant le tableau IV.4.
(5) Un peu moins que l'accroissement moyen du parc de l'ensemble des équipements qui est de 25 % : relation (11) en A.4.c.
(6) 17,9 = 16,4 x (56/53) x 1,15 x 0,90.
(7) Les relations (6) et (7) en A.4.c. donnent : $\rho'_n = 0,25$ et $\rho''_n = 0,15$; donc en admettant que la production de biens courants représente 43 %, la production en 1985 est multipliée par 1,19 = 0,43 x 1,25 + 0,57 x 0,15. Cela étant, on a 15,2 = 15 x 1,19 x 0,85.
(8) On rappelle que la consommation des cultures et plantations énergétiques n'est pas comptée comme consommation du secteur AGRICULTURE mais comme auto-consommation du secteur SOLAIRE AGRICOLE (voir IV.3.b.).

(e) Les évaluations de consommations faites en (b), (c), (d), ci-dessus fournissent les totaux de consommations secondaires. Les totaux primaires correspondants ne leur sont pas exactement proportionnels : le rapport total primaire/total secondaire décroît au fur et à mesure que la part de l'approvisionnement non fossile ou nucléaire croît[1].

Les rapports énergie primaire/énergie secondaire correspondant aux chiffres du tableau A.1. sont les suivants :

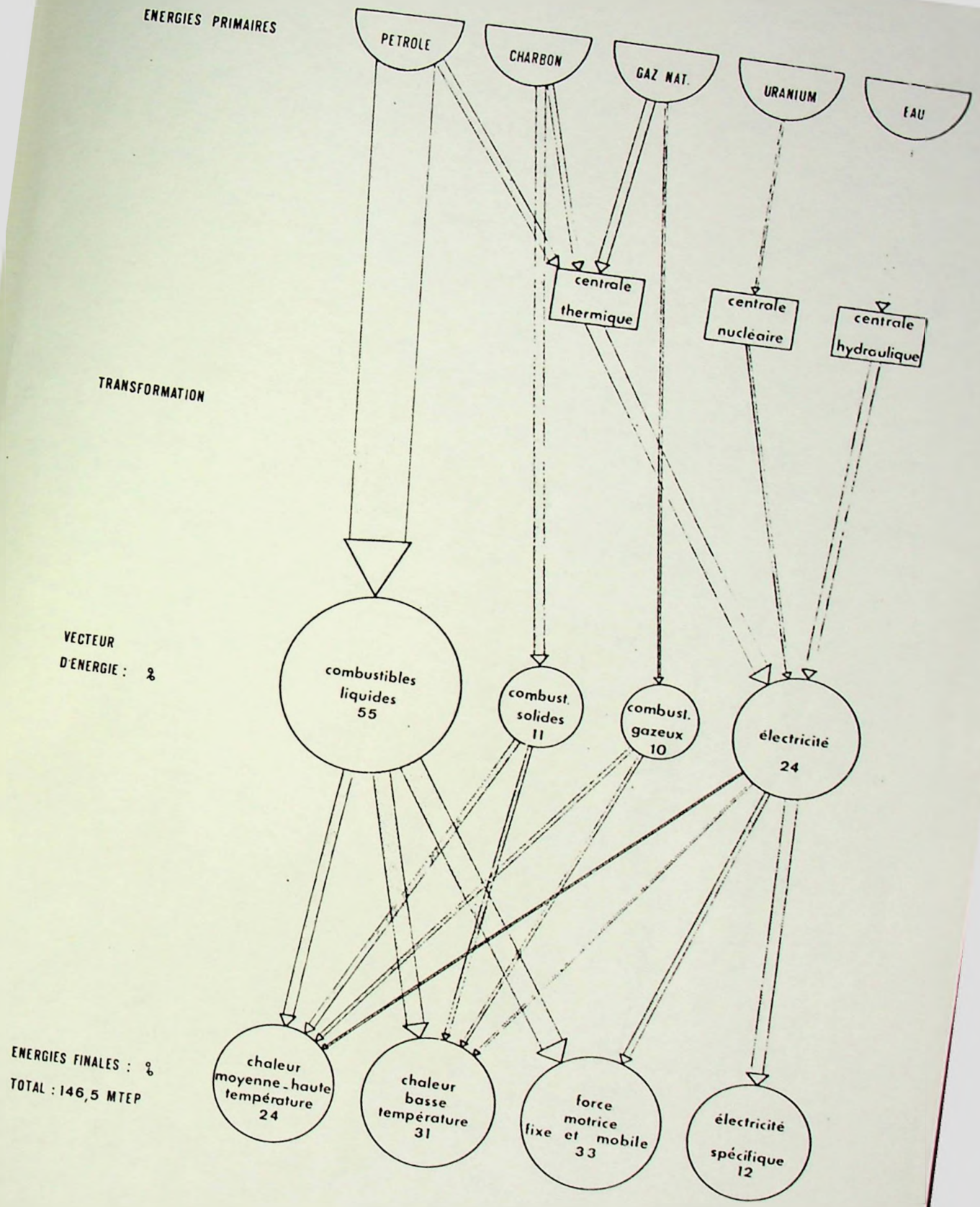
1975	1,133
1985, VIIe plan	1,118
2000, VIIe plan	1,117
1985, SC1 & SC2	1,125
2000	1,120
2025	1,113
2050	1,107
∞	1,102

En 1985 et 2000 les rapports prévus sont plus élevés que ceux du VIIe plan, car la part de l'approvisionnement fossile est plus grande.

(f) Pour évaluer la durée de mise en place du nouveau système énergétique après 2000, on s'est appuyé sur l'argument d'analyse énergétique suivant : il s'agit de mettre en place un système énergétique fournissant 110 MTEP d'énergie primaire par an[2]. Or l'appareillage solaire étant coûteux en énergie, on admet qu'une installation ayant une capacité de 1 MTEP/an (capacité nette de l'entretien permettant de la perpétuer) réclame pour sa construction une dépense totale de 4 MTEP. On va donc devoir investir 4 x 110 = 440 MTEP. En 60 ans, cela fait 440/60 = 7,3 MTEP/an qu'il faut investir dans le nouveau système énergétique. Cette consommation fait partie de celle de l'industrie + sidérurgie et en représente, en 2025 par exemple, 12 % (0,12 = 7,3/61). On peut comparer cette fraction à celle de la production industrielle consacrée aux investissements de croissance qui a été de l'ordre de 15 % en 1973. Ainsi, l'effort industriel à faire ne semble pas disproportionné si on l'étale sur plus de 50 ans. Cet argument sera évidemment à reprendre dans l'étude détaillée en termes de volumes d'activités industrielles et pas seulement en termes énergétiques.

Appliqué entre 1985 et 2000, le même argument permet de vérifier que l'effort d'investissement nécessaire pour passer d'une capacité renouvelable de 21 MTEP/an en 1985 à une capacité de 46 MTEP/an en 2000 n'est pas exagérée (moins de 10 % de la consommation énergétique des secteurs industrie + sidérurgie) et comparable à celui actuellement fait pour la mise en place du système nucléaire[3].

(1) Cela tient en partie à la définition du total primaire dans les cas non fossile ou nucléaire. Par exemple, pour le secteur SOLAIRE AGRICOLE, le total primaire est compté en énergie distribuée (combustibles ou carburants) et non en contenu énergétique de la bio-masse.
(2) 110 vaut le total 156, à long terme, moins le total 46 de la production renouvelable en 2000.
(3) L'appareillage nucléaire, plus concentré, est moins coûteux en énergie au départ (1 MTEP par MTEP/an à installer) mais réclame démantellement et reconstruction après 20 ans.



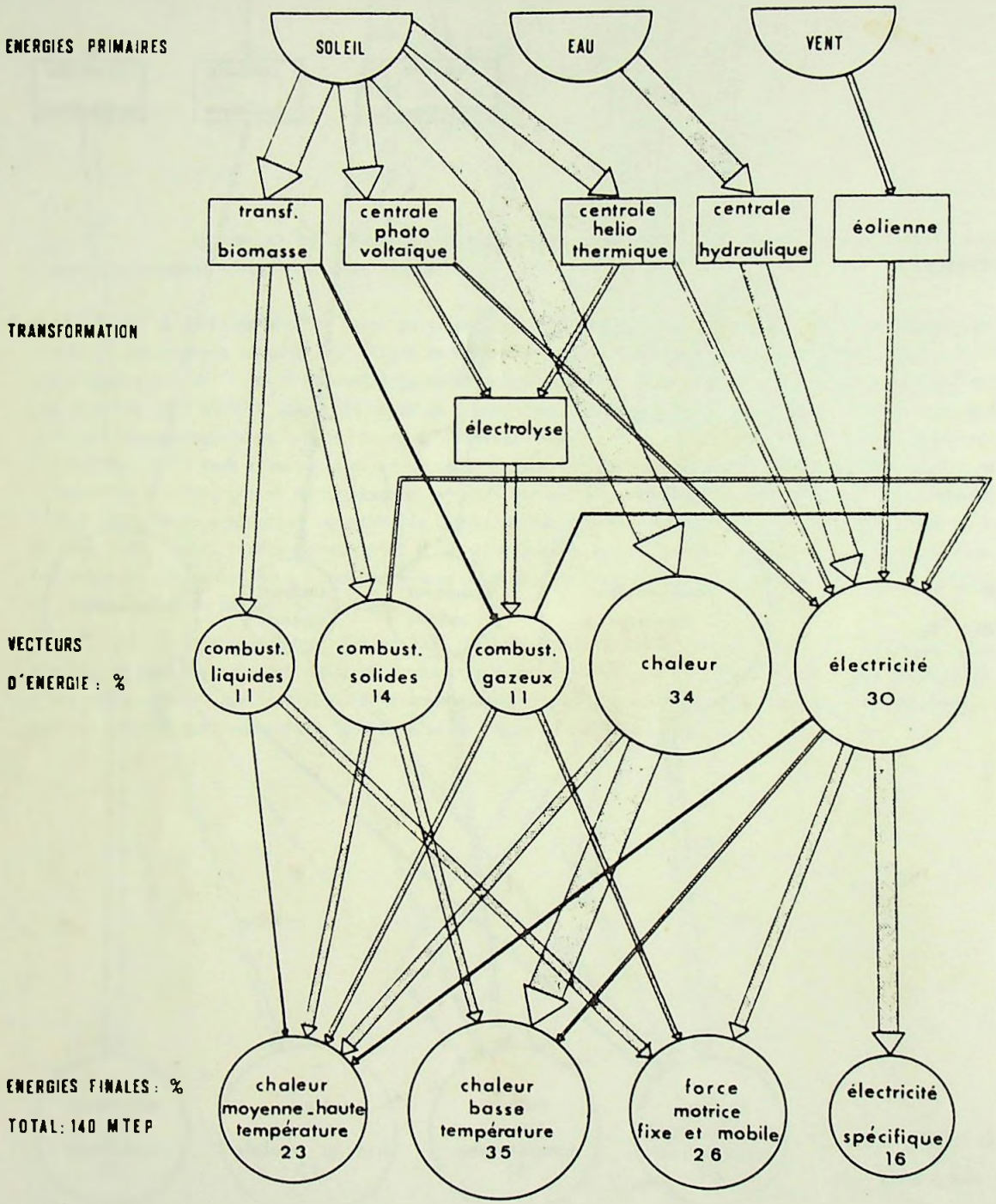
SCHEMA ENERGETIQUE 1975

PROJET ALTER

ETUDE D UN AVENIR ENERGETIQUE POUR LA FRANCE AXE SUR LE POTENTIEL RENOUVELABLE

ESQUISSE D'UN REGIME A LONG TERME TOUT SOLAIRE

PAR LE GROUPE DE BELLEVUE



SCHEMA ENERGETIQUE A LONG TERME

15 frs

Editions Syros
9, rue Borromée, 75015 Paris