



Siège de l'UNESCO
Paris, 5 - 9 juillet 1993

UNESCO Headquarters
Paris, 5 - 9 July 1993

World Solar Summit Sommet solaire mondial

High-level Expert Meeting
Réunion d'experts de haut niveau

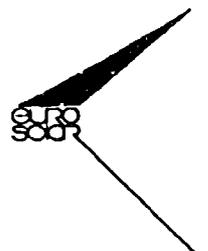
SC.93/Conf.003/10
Paris, 30 June 1993
Original : Français

Rentabilité financière et rentabilité
économique des principales applications
de l'énergie solaire

*Financial and economic profitability of
the principal applications of solar energy*



Ademe



Rentabilité financière et rentabilité économique des principales applications de l'énergie solaire

Financial and economic profitability of the principal applications of solar energy

Co-ordinator : **Percebois**
Jacques
Professeur, Université de Montpellier I
France

The authors are responsible for the choice and the presentation of the facts of this discussion paper submitted to the High-level Expert Meeting of the World Solar Summit, as well as for the opinions which are expressed therein. These do not bind the Organisers of the World Solar Summit. Les auteurs de ce document de discussion soumis à la réunion d'experts de haut niveau du Sommet solaire mondial sont responsables du choix et de la présentation des faits figurant dans leurs contributions, ainsi que des opinions qui y sont exprimées, lesquelles n'engagent pas les organisateurs du Sommet solaire mondial.

© WSS 1993

SOMMAIRE

	page
I. Le potentiel des énergies renouvelables : l'état du marché	p.4
II. Vers un développement à bas profil énergétique ?	p.7
III. les contraintes macroéconomiques du photovoltaïque	p.21
I. Les besoins	p.25
II. La compétitivité	p.28
III. Les contraintes	p.36

La future demande mondiale d'énergie sera sans aucun doute satisfaite par une diversité de sources et de technologies énergétiques. Après l'ère du charbon et l'ère du pétrole, où chacune de ces deux énergies a atteint voire dépassé 50% du marché, le monde s'achemine vers un "scénario polyénergétique" (cf. le document ALTENER de la Commission des Communautés Européennes, juin 1992). Face à une pluralité de préoccupations (assurer un approvisionnement énergétique au moindre coût qui soit satisfaisant à la fois du point de vue de la sécurité et de la protection de l'environnement), les énergies renouvelables auront un rôle à jouer. Mais la confiance dans les seuls mécanismes du marché ne saurait suffire à en assurer le développement. Il faut d'abord vérifier que ces mécanismes du marché ne sont pas faussés par des interventions arbitraires de la puissance publique. Or force est de constater que dans de nombreux pays les énergies fossiles sont encore subventionnées et cela pénalise les énergies alternatives (se reporter par exemple à la récente étude de LARSEN et SHAH in Finances et Développement décembre 1992). On est souvent loin de la vérité des prix en matière énergétique, surtout si l'on comptabilise les externalités induites par l'utilisation de l'énergie (atteintes à l'environnement par exemple) et que l'on tient compte des coûts d'opportunité (coût d'usage lié à l'épuisement des ressources). Il faut ensuite que la puissance publique mène une politique volontariste de promotion de certaines technologies, au moins dans une phase transitoire. L'intérêt collectif exige que, pour rétablir une certaine "égalité des chances" entre formes concurrentes d'énergie, des actions publiques de promotion, de subvention, de détaxation soient menées. D'autant que c'est souvent le seul moyen de prendre en considération, dans le calcul économique, des coûts et des avantages qui n'ont pas de valeur marchande et n'ont de sens qu'au niveau de la collectivité, globalement appréhendée. Il existe de ce fait dans certaines circonstances une déconnexion entre rentabilité financière (souvent qualifiée de rentabilité micro économique) et rentabilité économique (qualifiée implicitement de rentabilité macroéconomique). Il ne faut certes pas opposer les deux approches systématiquement. Ce qui n'est plus ou pas encore rentable sur le plan microéconomique n'est pas nécessairement rentable du point

de vue macroéconomique. Mais il arrive que certains coûts ou certains avantages ne puissent pas être intégrés dans les choix des agents économiques soit parce qu'il n'existe pas de marché pour ces coûts et ces avantages (on dit alors que les "marchés sont incomplets") soit parce que ces éléments ne prennent de signification qu'au niveau de l'ensemble de la collectivité (nationale voire mondiale). Dans le cadre d'une planification à long terme il faut tenir compte des deux approches simultanément.

Le potentiel utilisable des énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, géothermique, biomasse) est important et le marché annuel relatif aux équipements de production a été estimé au niveau mondial, à environ 40 milliards d'ECU (chiffres 1990 cités par ALTENER), ce qui représente à peu près 48 milliards d'US \$. Nous rappellerons rapidement dans une première partie ce qu'est ce potentiel et quel niveau de compétitivité économique est aujourd'hui le sien. Nous verrons ensuite, ce qui est le coeur du problème, que le développement de sources renouvelables d'énergie n'est envisageable à grande échelle que si deux conditions sont préalablement réunies :

1. Un développement économique à bas profil énergétique (pour les pays en développement, les ex-pays de l'Est en transition vers l'économie de marché et les pays de l'OCDE). Il faut rompre avec le schéma traditionnel selon lequel le bien être social serait proportionnel au nombre de tep consommées. Dans la perspective d'un "développement durable" les énergies renouvelables ont un rôle à jouer car elles participent à cette préoccupation d'une meilleure adéquation entre les besoins à satisfaire et le potentiel de ressources à préserver. Cela ne signifie pas que ces énergies sont potentiellement capables de satisfaire tous les besoins. La préoccupation polyénergétique est à l'opposé de tout impérialisme solaire. Là où elles sont "rentables" (tant pour l'utilisateur que pour la collectivité) ces énergies doivent être utilisées. Encore faut-il que l'information sur ce degré de rentabilité soit bonne et que certains obstacles (liés aux stratégies d'acteurs) soient levés.

2. Une prise en considération des coûts et avantages non-marchands dans le calcul économique. Encore une fois il ne faut pas opposer nécessairement rentabilité financière et rentabilité économique. Les deux coïncident souvent. Mais lorsque l'Etat subventionne l'emploi d'énergies fossiles polluantes (quel qu'en soit le motif légitime) ou lorsqu'il renonce à pénaliser certaines "externalités négatives" (refus d'une taxe sur le CO2 par exemple) il fausse plus ou moins consciemment le calcul économique et retarde de facto le recours à certaines énergies alternatives. Il faut donc compléter l'approche microéconomique par une approche globale qui s'efforce de mesurer les impacts de chaque technologie énergétique sur l'ensemble de l'activité économique pour aujourd'hui comme pour demain. Il existe des méthodes qui permettent de comptabiliser, avec plus ou moins de bonheur il est vrai, les coûts et avantages "sociaux". La montée des préoccupations environnementales, le souci de sauvegarder l'emploi, la sécurité d'approvisionnement ou d'économiser des devises conduisent à rechercher des méthodes d'analyse qui permettent d'évaluer, dans leur globalité et pour la longue période, tous ces effets. C'est alors souvent une chance pour les énergies renouvelables, coûteuses financièrement à court terme mais rentables économiquement à long terme. Cela permet de comprendre pourquoi ces énergies qui jouent encore un rôle limité à l'échelle mondiale (quelques pourcents du bilan énergétique) pourraient demain voir leur contribution s'accroître de façon appréciable. Notons toutefois que ce qui est vrai à l'échelle mondiale ne l'est pas nécessairement pour chaque pays isolément considéré. Dans certains pays en développement les énergies renouvelables (la biomasse en particulier) couvrent la presque totalité des besoins. Pour ces pays le développement économique s'accompagnera inévitablement d'une régression relative de ces énergies, au bénéfice des énergies fossiles traditionnelles.

I. LE POTENTIEL DES ENERGIES RENOUVELABLES : L'ETAT DU MARCHÉ

Nous nous inspirerons, dans cette partie, des conclusions de l'étude ALTENER conduite par la Commission de Bruxelles. Rappelons que le marché des énergies renouvelables représente 48 milliards de dollars dans le monde pour les seuls équipements de production.

1. Hydraulique. Le potentiel hydroélectrique techniquement exploitable des cours d'eau dans le monde est estimé à 10 000 TWh/an. le taux d'exploitation de ce potentiel ne dépasse guère 25% aujourd'hui. La contribution de la production hydraulique à la production mondiale d'électricité est en baisse permanente : 36% en 1950, 23% en 1974 et 17% en 1990. Ce pourcentage ne devrait pas dépasser 15% en 2010. Cela s'explique par le fait que la demande d'électricité croît fortement et que le recours au charbon, au nucléaire et aux hydrocarbures (fuel et gaz naturel) est inévitable. On estime toutefois que le potentiel hydraulique inutilisé pourrait être mieux valorisé, dans la petite voire micro hydraulique, si les études de faisabilité étaient menées avec des préoccupations macro-économiques plus affirmées (prise en compte des atteintes à l'environnement notamment).

2. Energie solaire. Il existe au monde environ 30 millions de m² de panneaux solaires "thermiques" installés, dont 4,5 millions aux Etats-Unis, 5 au Japon, 2,3 en Turquie, 1,5 en Australie... et 490 000 m² en France. La production annuelle de ces installations est estimée à 200 000 tep, ce qui n'est plus totalement négligeable. La production mondiale annuelle de ces capteurs solaires (vitrés et non-vitrés) est estimée à 3 millions de m². Cette production a baissé depuis le contre-choc pétrolier du fait de l'arrêt des incitations fiscales un peu partout dans les pays industrialisés et de la chute des prix du pétrole. Actuellement une part importante de la production mondiale est assurée par des pays du pourtour méditerranéen (Grèce, Turquie, Chypre, Israël, Jordanie).

Le développement des systèmes photovoltaïques est en revanche beaucoup plus soutenu. Le coût des cellules et des modules a fortement diminué au cours des dernières années puisque depuis 1973 on estime que ce coût a été divisé par 15 en monnaies constantes. Le marché mondial du photovoltaïque est estimé à 56MW en 1991. Les prévisions optimistes tablent sur une croissance annuelle de l'ordre de 20 à 30% grâce à des applications en sites isolés (télécommunications, électrification rurale) mais aussi grâce à un début de développement commercial des applications interconnectées au réseau. Le marché photovoltaïque mondial devrait atteindre 300 MW/an à compter de l'an 2000 selon de telles prévisions.

3. Biomasse

Dans les pays industrialisés l'utilisation du bois, le traitement des résidus organiques et la fabrication de nouveaux produits énergétiques (éthanol, méthanol, esters d'huiles végétales) représentent des marchés porteurs. Ainsi la Communauté Européenne consomme 20 millions de tep/an de bois-énergie, dont 9 millions de tep en France. Cette consommation pourrait tripler si une politique d'utilisation intensive était mise en oeuvre (taillis à courte rotation notamment). L'extraction de biogaz des décharges contrôlées est elle aussi très prometteuse (400 000 tep/an déjà produites en Europe ce qui ne représente que 9% du potentiel de la CEE). La combustion du méthane produit par les décharges contribue, rappelons-le, à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'emploi de produits agricoles comme carburants pour véhicules à moteur a commencé à se diffuser dans le monde (après avoir connu un certain succès aux Etats-Unis et au Brésil).

Dans les pays en développement la biomasse reste souvent la principale source d'énergie, dans le secteur domestique du moins. Dans certains cas une mauvaise gestion du potentiel conduit à un épuisement prématuré. La prise en considération des externalités que cette gestion entraîne devrait conduire à faire payer un prix plus "juste" (donc plus élevé) et cela devrait à terme favoriser la

pénétration de solutions alternatives mieux adaptées (photovoltaïque décentralisé par exemple).

Pour certains usages (en sites isolés notamment) le recours à l'énergie solaire (au sens large) est déjà compétitif alors même que les prix du pétrole sont au plus bas. Cette compétitivité ne peut que s'accroître dès lors que l'on anticipe une augmentation du prix directeur de l'énergie dans un contexte où les coûts sociaux liés à la production, au transport et à l'utilisation des diverses formes d'énergie seraient eux mêmes comptabilisés. L'idée d'un "développement durable", c'est-à-dire d'un développement économique qui préserverait le potentiel des ressources naturelles pour les générations futures, fait actuellement son chemin et conduit la plupart des prévisionnistes à opter pour un développement économe en énergie. Un tel schéma de croissance est plutôt favorable aux énergies renouvelables puisqu'il conduit à prendre en compte dans le calcul économique les coûts d'opportunité liés à l'épuisement de certaines ressources. Pendant longtemps ces coûts d'opportunité ont été ignorés et les préoccupations inter-générationnelles sous-estimées. Prélever sur un stock en terre épuisable c'est accroître les contraintes des générations futures et cela a un coût pour l'économiste.

II VERS UN DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE A BAS PROFIL ENERGETIQUE ?

1.1. Le concept d'économie d'énergie est apparu assez récemment (le choc pétrolier) dans les préoccupations des politiques énergétiques. Il conserve encore pour certains une connotation péjorative puisqu'il est synonyme de pénurie. En fait il faut admettre qu'il est aujourd'hui une composante essentielle de toute politique énergétique cohérente, dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés, que l'on parle "d'économie" d'énergie, de "maîtrise" de l'énergie ou "d'utilisation rationnelle" de l'énergie.

Tous les Etats, même les plus libéraux, se préoccupent de mettre en oeuvre une politique de l'approvisionnement en énergie en raison du poids élevé que représente l'énergie dans les grands équilibres économiques (que ce soit en proportion des investissements ou en proportion des importations) et en raison du caractère "stratégique" des produits énergétiques. Le tableau des échanges interindustriels (tableau input-output de LEONTIEF) montre que l'énergie est une consommation intermédiaire de toutes les branches. Il en va de même au niveau de la consommation finale, que ce soit dans le domaine des transports, du chauffage ou de la cuisson. Traditionnellement l'intervention de la puissance publique se limitait à une politique de l'offre d'énergie : éviter les ruptures d'approvisionnement, limiter le coût de la mise à disposition des diverses formes d'énergie, définir la place de chaque énergie au sein du bilan énergétique national, constituer des stocks ou réglementer la distribution des divers produits énergétiques. Cette politique de l'offre était d'ailleurs souvent le fait des entreprises publiques de production ou d'importation-distribution ou d'entreprises privées concessionnaires de service public (logique du "monopole d'Etat délégué"). Tel est le cas dans le secteur de l'électricité et celui des produits pétroliers.

La prise de conscience que l'offre d'énergie n'est pas illimitée et qu'il n'y a pas une relation stricte entre consommation d'énergie et croissance économique a conduit à s'intéresser de plus en plus à la demande d'énergie et à analyser la façon dont elle pourrait être satisfaite dans les meilleures conditions. Les mesures prises un peu partout dans le monde depuis 1973 (et pas seulement au sein de l'OCDE) ont montré qu'il existe des degrés de liberté (des marges de manoeuvre) dans l'intensité énergétique du produit intérieur brut. L'intensité énergétique du PIB mesure la quantité d'énergie primaire, commercialisée ou non, évaluée en tonnes-d'équivalent-pétrole (tep) nécessaire pour produire une certaine quantité de biens et de services évaluée en unités monétaires (généralement US \$). Cette intensité a fortement varié dans le temps et dans l'espace, que ce soit dans les pays industrialisés ou dans les pays en développement. On sait aujourd'hui que l'on peut économiser l'énergie sans compromettre la croissance économique. Ce fut le cas au sein de l'O.C.D.E. puisque le PIB de cette zone s'est accru de plus de 30% en 1973 et 1986 alors que la consommation d'énergie primaire n'a augmenté que de 4%. La montée des préoccupations environnementales n'a fait qu'accroître cette volonté de déconnecter croissance économique et consommation d'énergie.

Cette nouvelle vision des relations "énergie-croissance économique" n'est pas un luxe pour pays développés. Dans un contexte où la contrainte financière est de plus en plus forte et où les contraintes environnementales sont de plus en plus sévères, c'est devenu aussi une priorité des pays en développement. D'autant qu'il est souvent moins coûteux d'économiser une tep que de la produire ou de l'importer...

Comme le soulignent très bien J. GOLDEMBERG et alli dans "Energie pour un monde vivable" (World Resources Institute, Washington 1987) "... pour la première fois, les décideurs du monde énergétique se sont détournés de leur souci historique de fournir toujours plus d'énergie pour examiner comment on pouvait utiliser plus efficacement cette énergie à fournir des services comme l'éclairage, la cuisson des aliments,

le chauffage et le conditionnement de l'air, la réfrigération et la force motrice. Les décideurs ont découvert que les services énergétiques pouvaient être apportés au meilleur prix avec beaucoup moins d'énergie qu'on ne l'avait cru... Ce développement révolutionnaire n'a pas fait l'objet d'articles spectaculaires dans la presse... C'est au contraire une révolution tranquille au cours de laquelle non pas une mais des multitudes de solutions au problème énergétique ont été trouvées" (p. 25 de l'édition française).

Les pays riches peuvent certes économiser beaucoup plus d'énergie que les pays pauvres en adoptant des techniques plus performantes ou en modifiant leurs comportements. Le potentiel d'économies n'est toutefois pas négligeable dans les pays en développement, contrairement à une idée souvent répandue. Les élites de ces pays (industriels, commerçants, professions libérales, fonctionnaires), qui représentent 10 à 20% de la population mais disposent de 30 à 50% du revenu national, consomment l'essentiel de la "consommation finale d'énergie commerciale". Ces élites ont acquis les habitudes de consommation d'énergie des pays riches et utilisent d'ailleurs les technologies de ces pays. Comme les équipements importés ne sont pas toujours les plus performants (cf. automobiles d'occasion ou machines obsolètes), le gaspillage d'énergie est souvent plus grand que celui qu'on observe dans les pays du Nord, à service énergétique rendu identique. Dans les pays en développement «même les ménages pauvres, qui dépendent surtout des combustibles non commerciaux provenant de la biomasse et qui disposent de peu -- sinon d'aucun -- confort moderne, ont tendance à utiliser l'énergie de façon très peu rationnelle. Les pauvres qui utilisent le bois pour la cuisson des aliments consomment de trois à dix fois plus d'énergie par habitant que les consommateurs des pays industrialisés qui ont accès aux produits énergétiques modernes. En fait ils utilisent par habitant autant de combustible pour la cuisson que les Européens de l'Ouest pour les voitures» (J. GOLDEMBERG et alii op. cit. p. 33 de l'édition française).

*

* * *

1.2. Maitriser l'énergie c'est satisfaire la demande de services liés à l'énergie dans les conditions les meilleures de coût économique pour la collectivité. L'objectif de la politique énergétique n'est donc pas de fournir le maximum de tep par habitant mais doit être d'assurer dans les meilleures conditions possibles l'obtention des services requérant de l'énergie. Il faut sélectionner les filières énergétiques qui optimisent la satisfaction des besoins en minimisant les coûts privés et sociaux liés à la production, la transformation, le transport et la distribution des différentes formes d'énergie. Le service rendu par l'énergie est la résultante d'une combinaison de trois variables : un usage U, un appareil utilisateur A et une quantité d'énergie E. La fonction de la politique énergétique c'est d'agir simultanément sur les trois variables pour obtenir le meilleur service S avec $S = U.A.E$.

Il convient de bien distinguer l'énergie primaire (saisie à l'entrée du système énergétique, sous forme d'énergie produite ou importée), de l'énergie finale (vendue sur un marché ou acquise hors marché, après ou sans transformation de l'énergie primaire) et de l'énergie utile (énergie saisie à la sortie des équipements utilisateurs d'énergie, au niveau du service rendu sous forme de force motrice, de chaleur, de vapeur etc... Se reporter au schéma ci-après). Le choix de l'énergie est souvent conditionné par celui de l'équipement. Certains équipements utilisateurs peuvent fonctionner alternativement avec plusieurs formes d'énergie ; d'autres équipements en revanche ne marchent qu'avec une seule forme d'énergie de sorte que le choix de l'équipement conditionnera celui de l'énergie. On conçoit dès lors que la quantité d'énergie primaire nécessaire à la satisfaction d'une masse donnée de besoins puisse varier sensiblement selon la nature des équipements utilisés, la façon de s'en servir et l'âge des équipements. Améliorer le rendement des équipements disponibles, remplacer des équipements obsolètes par des équipements plus performants, modifier le comportement des agents économiques qui utilisent ces équipements, tout cela est de nature à accroître l'efficacité du couple "énergie-equipement" donc à économiser l'énergie.

1.3. L'intensité énergétique du PIB varie fortement d'un pays à l'autre, y compris au sein d'un groupe de pays ayant atteint des niveaux comparables de développement économique. Plusieurs facteurs sont à l'origine de ces disparités spatiales de contenu énergétique : la situation géographique du pays, la nature du climat qui y règne, l'étendue du territoire concerné ; la structure de la production, celle de la production industrielle en particulier (l'intensité énergétique du PIB sera très sensible au poids des industries lourdes) ; les choix technologiques faits au niveau des équipements producteurs, transformateurs et utilisateurs d'énergie. A structure productive identique, de fortes divergences existent au niveau du coefficient E/Y selon les techniques mises en oeuvre (E étant la quantité d'énergie primaire évaluée en tep nécessaire au cours de l'année pour obtenir un PIB Y évalué en unités monétaires, tel le dollar). On pourra à titre d'exemple se reporter au tableau ci-apès donnant l'intensité énergétique du PIB pour quelques pays en développement d'Afrique Centrale et Orientale. Plusieurs technologies sont, à un moment donné, disponibles pour fabriquer un même produit ou rendre un même service, et toutes n'ont pas la même efficacité énergétique. Le choix d'une technologie dépendra largement du prix relatif de cette technologie. En période de bas prix (absolu et relatif) de l'énergie les choix technologiques se feront sans considération pour le rendement énergétique des appareils. En période de hausse des prix de l'énergie en revanche le décideur s'efforcera de choisir une technologie plus efficace, pour autant bien sûr qu'il puisse y avoir accès et que le coût d'accès à cette nouvelle technologie ne soit pas supérieur aux économies d'énergie qu'il pourra réaliser. Il est rare que l'on choisisse une technologie en fonction des seules préoccupations énergétiques. Il n'est pas rare, à l'inverse, que des considérations d'économies d'énergie interfèrent dans le processus de sélection d'une technologie. En ce sens l'intensité énergétique du PIB sera tributaire du prix de l'énergie. Encore

faut-il que les agents économiques soient rationnels, parfaitement informés du coût d'accès à chaque source d'énergie et paient le "juste prix"...

Il importe de distinguer dans l'évolution de l'intensité énergétique du PIB, au cours du temps, ce qui est dû à la déformation structurelle de la production de ce qui est imputable aux changements techniques et aux modifications de comportements. On peut ainsi mettre en évidence des "effets de consommation spécifique" et des "effets de structure". Les premiers permettent de voir comment évolue au cours du temps la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication d'une unité monétaire du PIB (évalué en monnaie constante), la structure de ce PIB étant supposée constante. Les seconds permettent de calculer les variations de consommation d'énergie, par unité de PIB, induites par une modification de la structure de ce PIB, la consommation spécifique d'énergie de chaque branche d'activité demeurant inchangée (sur ce point se reporter au chapitre II "énergie et croissance économique" de l'ouvrage de J. PERCEBOIS "Economie de l'Energie" Editions Economica, Paris, 1989, 689 pages). En pratique il est souvent difficile d'isoler les variations de "consommation spécifique" des produits de celles de la "structure de la production". Ainsi la quantité d'énergie finale EF_i achetée une année donnée par un secteur i quelconque (secteur domestique, industrie, transport) est le produit de trois éléments :

$$EF_i = (EF_i/VA_i)(VA_i/Y)Y$$

où VA_i représente la valeur ajoutée du secteur i et Y le PIB. La variation d'énergie finale $d(EF_i)$ peut donc être décomposée, de façon approximative, en trois éléments constitutifs :

$$\begin{aligned} d(EF_i) &= d(EF_i/VA_i) [(VA_i/Y)Y] \text{ effet de contenu stricto sensu} \\ &+ d(VA_i/Y) [(EF_i/VA_i)Y] \text{ effet de structure} \\ &+ dY[(EF_i/VA_i)(VA_i/Y)] \text{ effet d'activité} \\ &+ \varepsilon \qquad \qquad \qquad \text{effets de second ordre.} \end{aligned}$$

En pratique seul l'effet de contenu stricto sensu (effet de consommation spécifique) constitue un indicateur de mesure des "économies d'énergie" réalisées au cours de la période. Une diminution de la consommation d'énergie finale d'un secteur peut être en effet imputable à une déformation structurelle de l'activité de ce secteur (cf. tertiarisation de la production, déclin des branches grosses consommatrices d'énergie par exemple). De même une stabilisation du contenu énergétique du PIB peut masquer deux effets contradictoires qui se compensent : une augmentation de la consommation spécifique d'énergie des produits, d'une part, une diminution du poids des branches grosses consommatrices d'énergie, d'autre part. Pour être significative une étude de l'évolution du contenu énergétique du PIB d'un pays doit donc être menée à un niveau relativement désagrégé.

L'effet de contenu stricto sensu est lui-même influencé par deux facteurs : une composante technologique et une composante comportementale. Au sens large l'économie d'énergie mesure les gains d'efficacité énergétique induits par les évolutions de contenu et les évolutions structurelles. Au sens strict (le seul véritablement correct) l'économie d'énergie mesure les gains d'efficacité énergétique induits par les seules évolutions de contenu, lesquelles résultent à la fois des modifications dans la technologie et dans la façon de s'en servir (évolutions comportementales).

Quelle est la durabilité de ces économies ? Les économies de type "comportemental" sont souvent spontanées en cas de hausses des prix de l'énergie (et/ou d'une meilleure information des agents) mais elles ont l'inconvénient d'être aisément réversibles (en cas de baisse du prix de l'énergie ou d'une information imparfaite sur le coût de l'énergie). Il faut donc les soutenir en permanence par une pratique efficace de vérité des prix, d'information et de formation des divers agents concernés. Les économies de type "technologique" sont beaucoup plus durables car elles sont "inscrites dans les équipements". Elles sont donc largement irréversibles mais elles sont plus longues à mettre en oeuvre car elles requièrent généralement un renouvellement des équipements

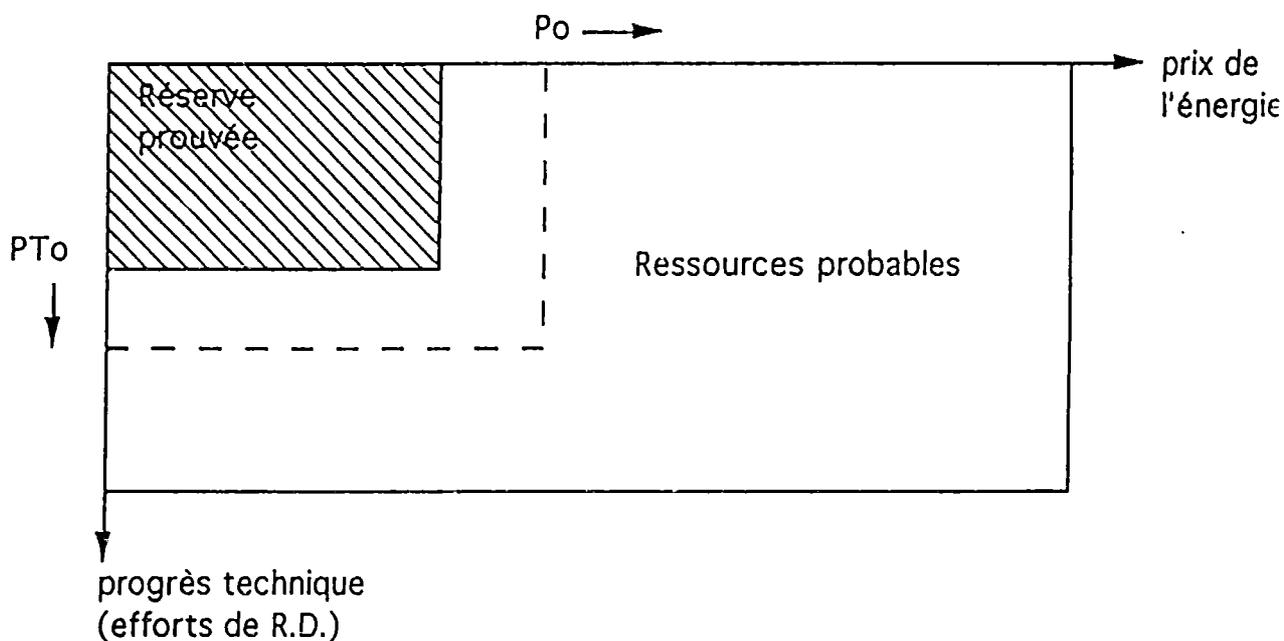
utilisateurs. A titre d'exemple la baisse du prix du pétrole a souvent réduit les économies comportementales (on se déplace davantage avec des voitures plus grosses et en faisant moins attention à la consommation d'essence) sans remettre en cause les économies technologiques (consommation aux 100 km pour une cylindrée donnée), lesquelles sont d'ailleurs souvent "entérinées" par les nouvelles normes en vigueur (les préoccupations environnementales interférant à ce niveau avec les préoccupations strictement énergétiques, dont elles prennent d'ailleurs souvent le relais).

*
* *
*

1.4. Le potentiel d'économies d'énergie (technologiques et comportementales) est variable selon les secteurs. Certains auteurs (cf. B. DESSUS) n'hésitent pas à parler de "gisement" ou de "réserve" d'économies d'énergie. «La réserve d'économie d'énergie associée à une mesure d'amélioration de l'efficacité énergétique d'un stock d'équipements est égale au produit du flux annuel d'économie observé ou attendu par la durée de vie de cette mesure» (définition empruntée à B. DESSUS, in Revue de l'Energie, n°431, juin 1991, p. 389). On peut dès lors envisager d'utiliser le diagramme de Mc. KELVEY pour rendre compte d'un tel phénomène. Si l'on appelle E le flux annuel d'économie d'énergie économiquement accessible dans un secteur donné (l'industrie, le secteur domestique, les transports etc...) et T la durée de vie des équipements économisant l'énergie auxquels on a recours, le montant de la réserve prouvée d'économie d'énergie E.T correspondra à la partie hachurée du schéma. Il est à un moment donné fonction tout à la fois du prix directeur de l'énergie et de l'état de la technologie disponible. Ce volume de "réserve prouvée" d'économie variera avec 1) le prix de l'énergie 2) le progrès technique. Ceteris paribus, plus le prix de l'énergie s'accroît et plus le potentiel d'économies réalisables et rentables

économiquement s'élève. Plus le progrès technique est important et plus ce potentiel pourra s'accroître, pour un prix de l'énergie donné. Notons d'ailleurs que le rythme du progrès technique est pour partie influencé par l'évolution du prix de l'énergie (mais pour partie indépendant : cas du "progrès technique autonome"). Il existe donc à côté du volume des réserves prouvées un potentiel exploitable de "ressources probables".

La non-exploitation de cette "réserve prouvée" d'économies imposera la découverte d'une réserve nouvelle de pétrole, de charbon, de gaz ou de biomasse... Il existe toutefois une différence de nature entre une "réserve d'économies" et une "réserve de pétrole", comme le rappelle d'ailleurs B. DESSUS : l'économie d'énergie ne doit son existence qu'à la présence préalable d'une consommation. A la limite, plus on gaspille au départ et plus le potentiel est élevé.



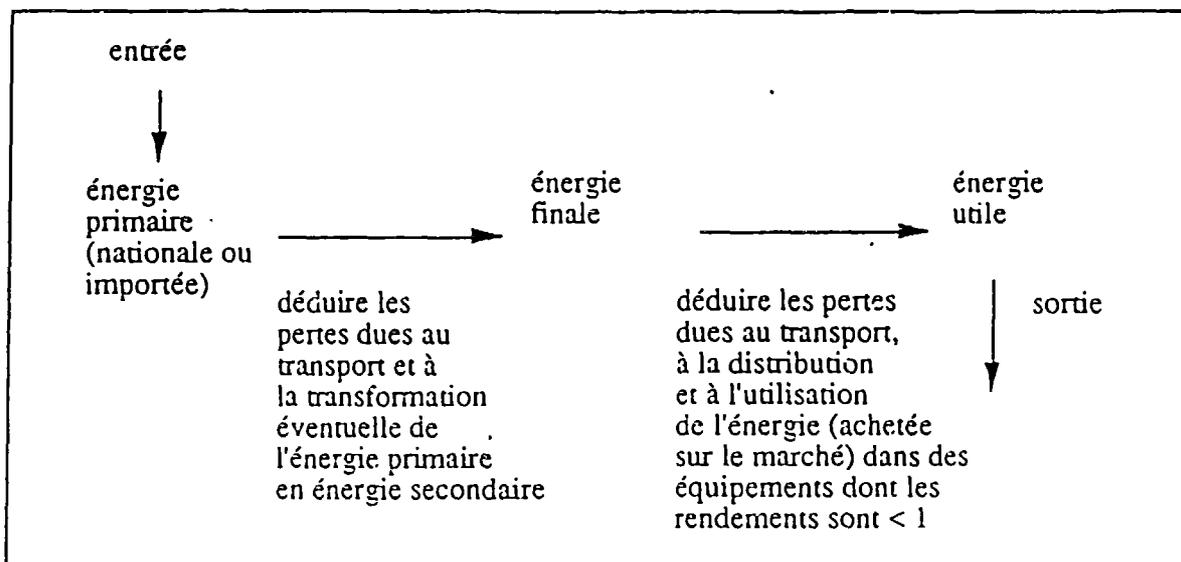
1.5. Le rôle de l'Etat (et d'une façon générale des administrations publiques) consiste donc à évaluer ce potentiel d'économies et à le valoriser au mieux. Il faut comparer ce que coûte pour la collectivité l'exploitation de cette réserve prouvée d'économies, d'une part, l'importation ou la production d'une quantité supplémentaire d'énergie d'autre part. Et bien souvent la tep économisée revient bien moins chère que la tep importée ou produite, surtout si l'on tient compte du coût d'opportunité de la devise et de celui de l'emprunt. La mission de la politique énergétique ce n'est pas seulement de produire plus d'énergie c'est aussi d'économiser l'énergie consommée afin de ne produire et d'importer que l'énergie qui est strictement nécessaire. Il faut pour cela identifier les acteurs économiques qui font les choix énergétiques dans les divers secteurs et chercher :

- à les convaincre grâce à une bonne information et à une bonne formation ;

- à les inciter à valoriser ce potentiel, grâce à des mesures fiscales et financières appropriées (déductions fiscales, prêts bonifiés, amortissement dégressif...)

- à les contraindre via le respect de normes imposées au niveau des équipements.

Tout cela ne se conçoit que dans le cadre d'une politique de "vérité des prix" de l'énergie (faire payer à chacun les conséquences de son choix). L'économie d'énergie s'opère parfois à l'occasion des substitutions interénergétique ou des substitutions d'équipements utilisateurs. Elle est souvent possible et rentable en l'absence de telles substitutions, au prix d'un effort de rationalisation des comportements et d'un minimum d'investissements (d'isolation par exemple) rapidement rentabilisés.



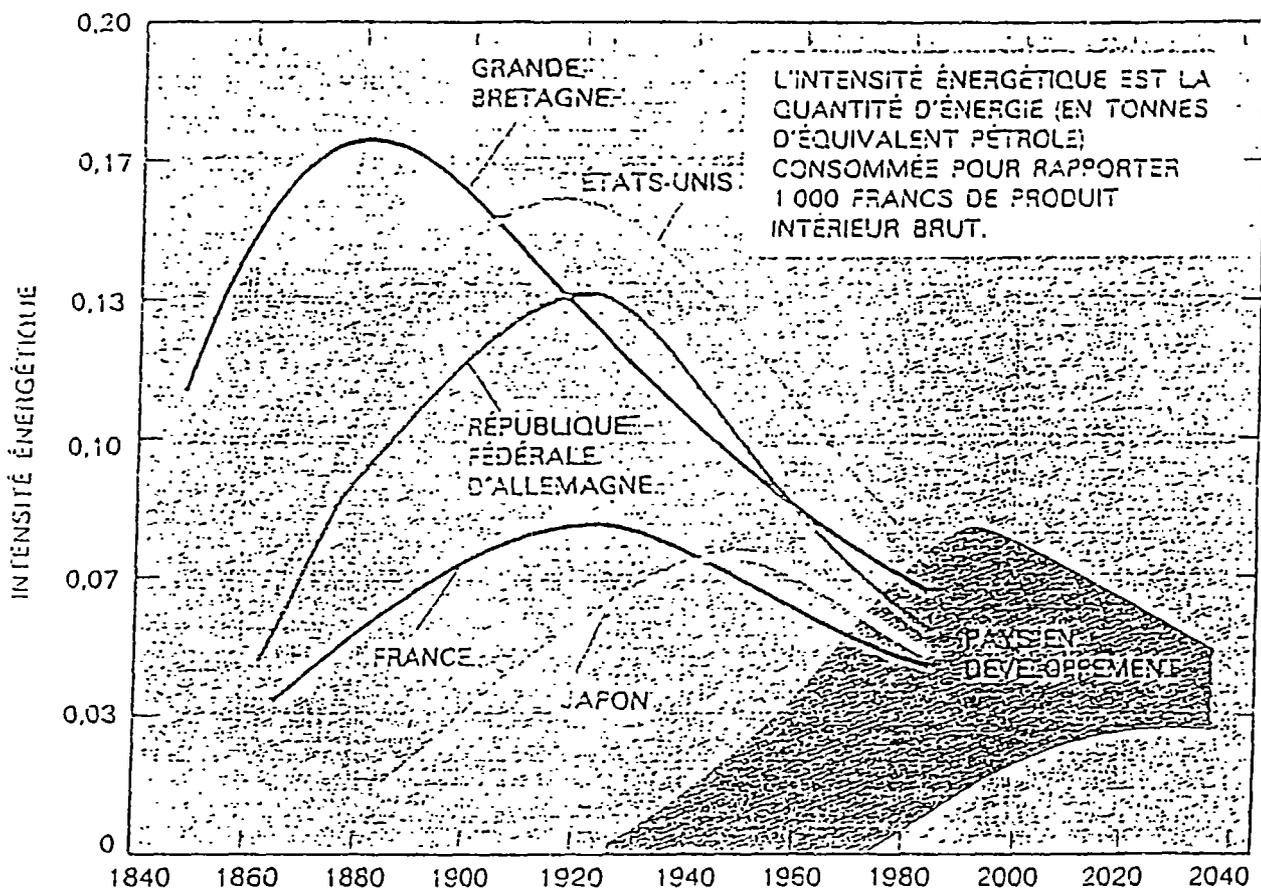
SCHEMA I: LE SYSTEME ENERGETIQUE

Pays	Population 10 ⁶	PIB per capita (US \$)	Consommation d'énergie per capita * en kgep	intensité énergétique du PIB en kgep/US\$
BURUNDI	5,2	240	11	0,05
RWANDA	6,6	285	16	0,06
TCHAD	5,4	160	18	0,11
R.C.A.	2,7	380	35	0,09
NIGER	6,8	300	35	0,12
TOGO	3,2	370	36	0,10
SOMALIE	5,7	170	51	0,30
ZAMBIE	7,2	290	182	0,63

* Seule l'énergie commerciale est comptabilisée
(kgep = kilo - équivalent - pétrole)

Source : Banque Mondiale - Rapport ESMAP "Burundi. Problèmes et choix énergétiques", n°9215 BU, janvier 1992, p. 116

Consommation d'énergie commerciale et disparités d'intensité énergétique (en 1987)

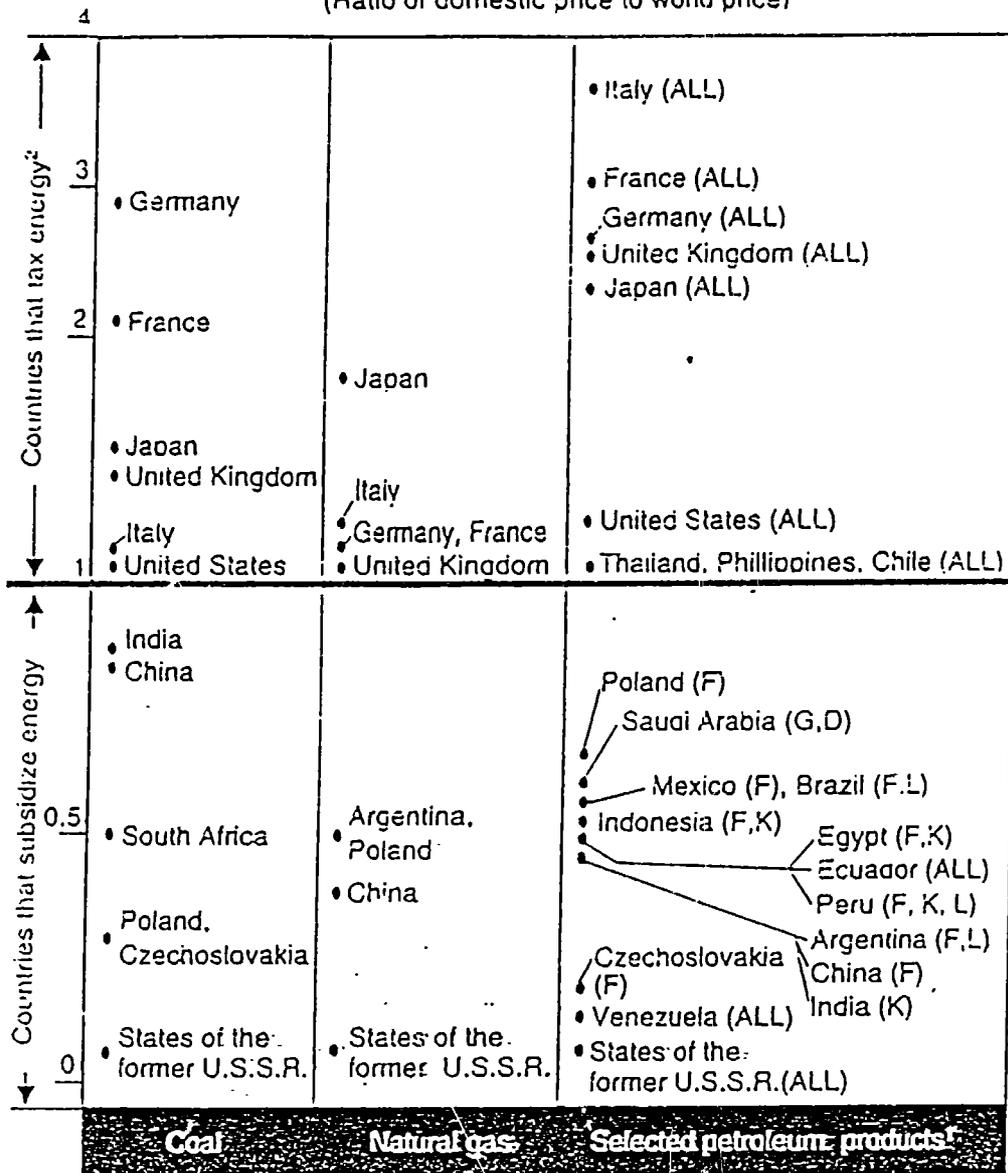


2. DANS LES PAYS INDUSTRIALISÉS, l'intensité énergétique (le quotient de l'énergie consommée par le produit intérieur brut) a d'abord augmenté, juste après la Révolution industrielle, puis diminué en raison des progrès réalisés en science des matériaux et de l'accroissement du rendement énergétique. Les pays en développement peuvent éviter la phase de croissance de l'intensité énergétique en économisant d'emblée l'énergie.

source Scientific American (éd. française)
novembre 1990 n° 157 p 80.

How large are energy subsidies?

(Ratio of domestic price to world price)



¹ For developing countries, selected petroleum products are mainly fuel oils (gasoline is often taxed and in those cases not included). For industrial countries, however, all petroleum products are included. Petroleum products: ALL-weighted average of all petroleum products; F-fuel oils; K-kerosene; L-liquified petroleum gas; G-gasoline; D-automotive diesel.

² Difference between domestic and world prices is due to both taxes and other distortions.

Source: LARSEN and SHAH
Finance and Development
December 1992

III LES CONTRAINTES MACROECONOMIQUES DU PHOTOVOLTAIQUE

Les problèmes énergétiques des pays en voie de développement (P.V.D.), ceux de leurs réseaux électriques, en particulier, ne peuvent pas être déconnectés du contexte économique et social dans lequel ils se posent. Le sous-développement ne se traduit pas seulement par un bas niveau de P.I.B. per capita (produit intérieur brut par habitant). Il se manifeste également par de profonds déséquilibres structurels:

- la dépendance ; C'est un trait commun à la plupart des P.V.D. Elle s'observe au niveau du commerce extérieur (et c'est vrai pour les exportateurs nets comme pour les importateurs nets d'énergie) mais aussi dans les relations politiques, économiques, technologiques et culturelles avec l'étranger...

- la désarticulation du système productif ; Ce système comporte des enclaves juxtaposées les unes aux autres (le secteur traditionnel a peu de liens avec le secteur moderne fortement extraverti)...

- la faiblesse de l'agriculture ; Dans la plupart des P.V.D. on constate un déficit alimentaire croissant, particulièrement en Afrique. Dans beaucoup de ces pays, la dépendance alimentaire a été accrue par l'introduction d'habitudes alimentaires qui ne peuvent pas être satisfaites en totalité grâce aux ressources locales.

- les inégalités sociales et géographiques ; L'urbanisation désordonnée ne résulte pas de la seule croissance de l'industrie et des services. Elle est aussi la résultante d'un exode rural provoqué par les difficultés de l'agriculture et la dégradation des conditions de vie dans les campagnes.

- l'endettement à l'égard des institutions financières étrangères qui s'explique à la fois par la montée inexorable de l'endettement public (les dépenses publiques sont structurellement supérieures aux recettes fiscales) et par la faible couverture des importations par les exportations (surtout dans un contexte de baisse du prix réel de certains produits de base). Toute politique "d'ajustement" (visant à réduire la demande globale pour améliorer le solde budgétaire et le solde extérieur) se traduit inévitablement par une détérioration des conditions de vie.

La situation énergétique de ces pays est à l'image de leur situation économique . Elle se caractérise par les traits suivants :

- le faible niveau de la consommation d'énergie par habitant, moins d'une t.e.p. (tonne-équivalent-pétrole) par an en moyenne à comparer avec les 8 t.e.p. en Amérique du Nord et les 3 à 4 t.e.p. en Europe. Les P.V.D., qui représentent près de 75 % de la population mondiale, ne consomment que 30 % de l'énergie conventionnelle produite à l'échelle mondiale (pétrole, gaz, charbon, électricité...) (cf. tableau I).

- l'importance des énergies traditionnelles (bois, charbon de bois, déchets animaux et végétaux) au sein du bilan énergétique. Une grande partie de ces énergies traditionnelles échappe d'ailleurs aux circuits commerciaux, d'où une difficulté pour les comptabiliser. Les besoins croissants d'énergie dans les campagnes ou à la périphérie des villes ont conduit à une véritable "crise du bois de feu". La déforestation est devenue l'un des grands problèmes de la plupart de ces pays...

- le poids relatif élevé des hydrocarbures au sein des énergies conventionnelles : à l'exception de la Chine et de l'Inde, qui consomment beaucoup de charbon (abondant localement), les pays en développement sont fortement tributaires des produits pétroliers importés ou produits localement et, de ce fait, ils sont très sensibles aux fluctuations du prix du pétrole. Cela tient avant tout à la grande flexibilité d'usage du pétrole, facile à transporter et à stocker, bien adapté à la plupart des besoins locaux de force motrice ou de production de chaleur et de froid...

- l'importance de la contrainte financière : parce qu'il est un secteur capitaliste (forte intensité en capital) et un secteur gros consommateur de devises (et dans certains cas, gros producteur de devises), le secteur énergétique est l'un des plus touchés par la contrainte financière. Toute variation des prix du pétrole, du cours du dollar ou des taux d'intérêt a un impact immédiat et sensible sur les capacités de financement de ces pays. Une baisse du prix du brut, pour un exportateur, ce sont des devises en moins, donc des investissements plus faibles. Une hausse du prix du brut, du cours du dollar ou des taux réels d'intérêt, c'est pour un pays importateur net une détérioration de son équilibre commercial, des difficultés à s'endetter, donc la nécessité de sacrifier certains investissements.

Pour toutes ces raisons, l'électrification rurale est souvent sacrifiée sur l'autel de la rigueur financière. Or, cette électrification doit demeurer une priorité du développement. La politique d'industrialisation ne doit pas sous-estimer l'importance qu'il convient d'accorder à l'agriculture dans le processus de développement. On semble souvent oublier le rôle primordial qu'a joué, au moment de la Révolution Industrielle, l'agriculture dans le développement des pays aujourd'hui industrialisés. L'agriculture a joué un rôle dynamique à la fois comme :

- demandeur de biens produits par l'industrie ; C'est un débouché pour la production de biens d'équipement (mécanisation agricole) comme pour celle des biens de consommation (au fur et à mesure que le pouvoir d'achat des agriculteurs s'améliore)

- fournisseur de main-d'oeuvre à l'industrie

- fournisseur de denrées agricoles à une population urbaine en augmentation

- fournisseur de capitaux : une partie importante du financement de l'industrialisation a été réalisée grâce à l'apparition et à la mobilisation d'un surplus agricole. On peut définir le surplus agricole comme la différence entre le prix de valorisation des produits agricoles et l'ensemble des coûts engendrés par leur production. La faiblesse de l'épargne des campagnes et les difficultés de sa mobilisation par les intermédiaires financiers constituent des obstacles importants sur le chemin du développement dans la plupart des P.V.D. aujourd'hui...

On comprend que des progrès considérables peuvent être obtenus dans le secteur agricole, grâce à une meilleure organisation et à l'introduction de techniques relativement simples mais susceptibles de conduire rapidement, et moyennant un coût relativement faible, à une amélioration sensible du niveau de vie des populations locales et des rendements agricoles. De tels progrès nécessitent, cependant, la disponibilité d'une source d'énergie relativement bon marché et facile à utiliser, afin de satisfaire des usages courants de faible puissance.

Si l'on ajoute à cela que les applications nécessitant de l'énergie se trouvent, la plupart du temps, dispersées sur le plan géographique, on conçoit que les conditions d'une utilisation de l'énergie solaire puissent être remplies: il s'agit souvent d'assurer un approvisionnement minimum en eau et des conditions meilleures d'hygiène, de promouvoir l'implantation de moyens d'information et de communication, de permettre le recours à des appareils électro-ménagers ou à des équipements industriels de faible puissance.

L'électricité est un vecteur énergétique très pratique à l'emploi : facile à utiliser, propre, fiable... C'est dans certains cas un point de passage obligé (usages captifs ou quasi-captifs). L'électricité présente, toutefois, des inconvénients : Elle n'est pas stockable, du moins en quantités importantes et à des prix accessibles. Cela signifie que l'offre doit, à tout instant, suivre la demande (éviter la "défaillance"). Le système électrique est très capitalistique : c'est vrai pour l'électrification par réseaux, puisqu'il faut tout à la fois prévoir et programmer les moyens de production, de transport et de distribution de cette électricité. C'est vrai également pour l'électrification "décentralisée" (mini-hydraulique, moteurs diesel ou photovoltaïque) : Le coût d'accès à ces équipements est souvent élevé eu égard aux possibilités locales de financement.

C'est pourquoi, lorsqu'on aborde le rôle que peut jouer le solaire photovoltaïque dans les P.V.D., il faut le faire en se plaçant à trois niveaux successivement :

- examiner les besoins que le solaire photovoltaïque peut satisfaire en priorité,

- apprécier la rentabilité économique du photovoltaïque par rapport aux solutions alternatives (solutions locales ou non),

- examiner les contraintes auxquelles se heurte le développement du solaire photovoltaïque, qui tiennent autant à des considérations macroéconomiques (effets d'entraînement, effets pervers, politiques tarifaires...) qu'aux stratégies des divers acteurs de la scène énergétique (compagnies pétrolières, institutions financières, etc...)

I - LES BESOINS

Les énergies renouvelables ont généralement en commun les traits suivants (cf. la typologie de l'O.C.D.E. (8)):

- Elles sont virtuellement inépuisables, à l'échelle humaine du moins. C'est le cas du rayonnement solaire, des vents atmosphériques, de l'énergie thermique et cinétique des mers, de l'énergie géothermique, de l'énergie thermique et chimique tirée de la biomasse et de l'énergie mécanique produite par la chute d'eau.

- Elles sont dispersées et leur mise en valeur doit se faire, en priorité, là où elles sont disponibles.

- Elles ont, en général, une faible densité électrique et énergétique et, de ce fait, les techniques utilisatrices requièrent beaucoup d'espace.

- Les techniques associées aux énergies renouvelables présentent souvent des coûts initiaux élevés, tandis que les frais d'exploitation sont faibles et relativement peu sensibles aux fluctuations des prix des énergies conventionnelles (prix du brut notamment).

- Les techniques des énergies renouvelables sont souvent modulaires et peuvent donc être installées rapidement pour répondre à une demande variable.

- Les techniques des énergies renouvelables sont généralement peu nocives pour l'environnement. Pour la plupart d'entre elles, il n'y a donc pas de problème "d'acceptabilité sociale"...

Le gros avantage de la conversion photovoltaïque (conversion directe de l'énergie solaire en électricité) c'est que l'on dispose d'une forme d'énergie très polyvalente, capable de répondre à une pluralité de besoins de base. C'est aujourd'hui une technique fiable et dont le coût de production est en constante diminution du fait des économies d'échelle que l'on peut réaliser au niveau de la fabrication des cellules. Le coût de fonctionnement de la partie spécifiquement photovoltaïque est réduit au coût de maintenance, lui-même limité du fait de l'absence de pièces mécaniques. La grande autonomie et modularité des générateurs solaires les rend particulièrement aptes à satisfaire de nombreux besoins dans les P.V.D., spécialement en zone rurale puisque les systèmes peuvent aller du micro-watt à la centrale multimégawatts...

Dans l'état actuel des choses, 1 m² de photopiles permet d'obtenir 100 watts-crête si l'ensoleillement dépasse 1300 kwh/m²/an. Or, il suffit de disposer d'une puissance de 300 à 400 watts-crête pour satisfaire les besoins d'un ménage rural disposant d'un confort minimum, sur la base des hypothèses suivantes (empruntées à Benjamin DESSUS (3)) :

- réfrigérateur de 150 litres (4 Wh/l/jour)	soit 600 Wh/j
- télévision (50 W, 3h/j)	soit 150 Wh/j
- éclairage (4 points lumineux fluocompacts 18 W, 3h/j)	soit 220 Wh/j
- ventilateur (50 W, 8h/j)	soit 400 Wh/j
	<hr/>
TOTAL	1 370 Wh/j

soit 500 kwh/an. Le progrès technique a permis ces dernières années d'abaisser sensiblement la consommation unitaire des appareils. Tel est le cas, en particulier, pour l'éclairage, puisque la lampe à filament de carbone, à 2 lumens par watt du début du siècle, est aujourd'hui remplacée par des lampes fluorescentes à 60 lumens par watt voire par des lampes à vapeur de sodium qui dépassent 200 lumens par watt...

Le tableau II montre que l'électricité est un point de passage quasi obligé pour la satisfaction des principaux usages énergétiques d'un ménage modeste en zone rurale isolée.

Eclairage : C'est à la fois l'usage le plus désiré et le moins onéreux. C'est pourquoi, c'est la priorité des P.V.D. Au niveau social et culturel, il est porteur de nombreuses améliorations. Malheureusement, il est en grande partie responsable de la pointe de puissance appelée le soir et oblige les producteurs à prévoir une capacité de production élevée. Le recours à de petits équipements solaires avec stockage est dès lors une solution possible surtout lorsque le raccordement au réseau est coûteux du fait de l'éloignement.

Télévision : C'est également un usage très recherché et les ménages modestes acceptent souvent de consentir un effort financier important pour l'acquisition d'un téléviseur. Là encore, c'est un usage du soir qui contribue à la pointe de puissance...

Réfrigérateur : C'est pratiquement le seul usage plat des ménages. C'est un usage susceptible d'améliorer sensiblement les conditions de vie et l'organisation du travail...

Climatisation : C'est un usage très "électro-intensif" réservé aux ménages aisés, aux administrations et aux commerces. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'usage climatisation se place lui aussi très souvent le soir, au moment de la pointe.

Eau chaude sanitaire (E.C.S.) : C'est là encore un usage électro-intensif réservé aux ménages aisés. Cet usage peut être assez facilement placé de nuit grâce à l'adoption d'un comptage "tarif heures creuses" mais en pratique ce système tarifaire n'est pas très courant dans les P.V.D.

Quant au chauffage, c'est un usage qui n'est pas courant dans la zone tropicale des P.V.D. Il est en revanche nécessaire dans les autres régions et le solaire peut, là encore, y être utilisé, du moins sous forme d'énergie d'appoint.

Le tableau III montre que le potentiel du solaire photovoltaïque n'est pas négligeable à l'échelle mondiale, que ce soit pour produire de l'électricité en zone rurale isolée ou pour satisfaire certains besoins (climatisation, notamment) d'usagers raccordés au réseau en zone tropicale... Ce potentiel est particulièrement important pour les pays en développement surtout si l'on tient compte de la population concernée (2,5 milliards d'individus).

II - LA COMPETITIVITE

Il existe de nombreux critères pour apprécier le degré de compétitivité du solaire photovoltaïque. Nous présenterons les principaux d'entre eux avant de voir leur application (et les problèmes que cela soulève) à certains cas de figure.

A - LES PRINCIPAUX CRITERES DE CHOIX (cf. J. PERCEBOIS (11))

Le plus courant est certainement le "délai de récupération des fonds investis" (DRFI). On classe les projets d'investissement en fonction du nombre d'années croissant nécessaire pour récupérer, sous forme de recettes, le montant des dépenses effectuées. On choisira le projet dont le délai est le plus court. Un critère encore plus simple, et qui est couramment utilisé dans le domaine des économies d'énergie, est celui de "l'investissement par t.e.p économisée". Il est calculé en divisant l'investissement total (ou le surcoût total supporté par rapport à une situation de référence) par l'économie annuelle d'énergie réalisée.

Ces critères ont le mérite de la simplicité. Ils "parlent d'eux-mêmes". Ils présentent, toutefois, un inconvénient majeur du point de vue d'un calcul économique rationnel: Ils ne tiennent pas compte de l'actualisation. Or, pour un économiste, un franc disponible en $(t+1)$ n'a pas la même valeur qu'un franc disponible en t mais une valeur plus faible. Cela n'est pas dû, contrairement à ce que croient beaucoup de gens, au phénomène quasi-inéluctable de la dépréciation de la monnaie (perte de pouvoir d'achat liée à l'inflation). On raisonne en monnaie constante, c'est-à-dire en l'absence de tout phénomène inflationniste. Cela tient à l'existence de la loi dite "de préférence pour le présent" qui traduit la dépréciation du futur dans la conscience de tout agent économique rationnel. Le temps a donc un prix et celui-ci, dans un marché parfait, est égal au taux d'intérêt (taux d'intérêt réel puisque l'on raisonne en monnaie constante). Le taux d'intérêt réel, prix de la renonciation au présent, traduit le rythme auquel le futur doit être déprécié.

La technique de l'actualisation consiste à rendre équivalentes des sommes d'argent disponibles à des moments différents du temps. Si l'on appelle a ce taux d'actualisation et que l'on raisonne en monnaie constante, la valeur dans n années d'une somme A disponible aujourd'hui est égale à $A_n = A_0 (1+a)^n$. Ou, ce qui revient au même, la valeur actuelle (année de base 0) d'une somme A disponible dans n années seulement est donnée par $A_0 = A_n / (1+a)^n$. Cette

actualisation "discrète" $(1+a)^{-n}$ est en fait une approximation commode de l'actualisation continue, exponentielle, e^{-bn} . On a en effet : $A_0 = A_n e^{-bn}$ soit $\ln A_0 = \ln A_n - bn$. Comme, par ailleurs, $A_0 = A_n (1+a)^{-n}$ donne $\ln A_0 = \ln A_n - n \ln (1+a)$ on en déduit $b = \ln (1+a)$. Ce taux d'actualisation a étant connu (fixé par le marché, choisi par le décideur lui-même ou imposé par l'Etat ou le banquier), plusieurs critères sont disponibles suivant les préoccupations du décideur.

Le "taux de retour sur l'investissement" (TRSI): C'est le temps nécessaire, en nombre de mois ou d'années, pour récupérer, sous forme de recettes actualisées, le montant des dépenses actualisées supportées. C'est un critère utile lorsque l'on procède à des investissements visant à économiser l'énergie.

Le "coût global actualisé" (CGA) : Parmi les différents projets disponibles, et qui tous sont censés fournir le même service à l'utilisateur, il s'agit cette fois de sélectionner celui pour lequel le coût global actualisé est minimum (dépenses d'investissement et coûts de fonctionnement). C'est un critère très utile lorsqu'il s'agit de comparer plusieurs solutions alternatives qui toutes sont susceptibles de satisfaire les mêmes besoins (mini-hydraulique, moteur diesel et photovoltaïque pour un village isolé par exemple).

La "valeur actualisée nette" (V.A.N.) : On évalue, pour chacun des projets en compétition, l'ensemble des recettes actualisées (ou avantages actualisés) et l'ensemble des coûts actualisés qui lui sont associés et l'on choisit le projet pour lequel la différence entre les deux est maximisée. C'est un critère utile lorsque le service rendu par les divers projets n'est pas équivalent...

Le "taux de rendement interne" (TRI ou TIR) : Il existe une valeur particulière du taux d'actualisation (appelons r cette valeur) pour laquelle la valeur actualisée nette est nulle. L'opération est alors "blanche", c'est-à-dire que les recettes totales actualisées compensent exactement les coûts totaux actualisés. On classe les divers projets par ordre décroissant de taux de rendement interne et l'on sélectionne celui dont le taux est le plus élevé. Il existe, en général, une relation de sens inverse entre le TRI d'un investissement et son temps de retour : les projets qui ont le taux interne le plus élevé sont aussi ceux pour lesquels le temps de retour est le plus faible.

Le test de sélection des investissements peut s'effectuer aussi bien en vérifiant que la valeur actualisée nette (VAN) est positive pour un taux d'actualisation a donné ou en vérifiant que le taux de rendement interne (TRI) de l'opération est supérieur à ce taux d'actualisation a . En pratique, le classement des projets en fonction de ces deux critères peut, dans certains cas, ne pas coïncider.

Tous ces critères utilisant l'actualisation ont une même ambition : rationaliser le comportement du décideur. Le choix de l'un ou l'autre de ces critères dépendra de la façon dont le problème est posé : doit-on raisonner par référence à un coût, un profit monétaire, un taux de profit ou un délai ? Reste un problème délicat : celui du choix du taux d'actualisation. Ce choix n'est pas technique. C'est largement un choix politique qui exprime le taux de rendement minimum que la collectivité souhaite obtenir pour ses investissements. En France, il est de l'ordre de 8 % ; dans certains pays développés (USA, par exemple) il est souvent plus faible (5 à 6 %). Dans les pays en développement, il est généralement nettement plus élevé (de l'ordre de 12 %). La rareté de l'épargne et les risques encourus conduisent les prêteurs internationaux (banques, entreprises) à exiger une rentabilité minimale plus élevée puisque la sélectivité doit être plus forte.

B - ETUDE DE CAS N° 1 : Investissement par t.e.p économisée et délai de récupération des fonds investis dans une exploitation agricole "solarisée" (exemple inspiré de F. VALETTE (13))

Considérons une exploitation agricole dont les besoins énergétiques sont estimés à q^* t.e.p par an. Ces besoins pourraient être satisfaits par du fuel acheté au prix p la tonne. Soucieux d'acquérir son autonomie énergétique, l'exploitant va chercher à satisfaire ses besoins en utilisant :

1 - des capteurs solaires (photovoltaïques) qui, moyennant un investissement de départ (réalisé en une fois) I lui permettent d'économiser la quantité $q^* - q$ chaque année,

2 - des cultures énergétiques (biomasse) qui, moyennant une dépense supplémentaire estimée à D/ha (surcoût supporté une fois pour toutes) lui permettent de produire k t.e.p par an et par ha (on néglige les frais de fonctionnement).

On peut, dès lors, calculer trois ratios significatifs:

1 - $d = I/p (q^*-q)$ qui donne le nombre d'années nécessaire pour récupérer, sous forme d'économies d'énergie, le surcoût supporté au niveau des capteurs solaires (en l'absence de cultures énergétiques)

2 - $x_1 = I/ (q^*-q)$ qui exprime le coût par t.e.p économisée (dans l'option "sans cultures énergétiques")

3 - $x_2 = (I + Dq/k)/q^*$ qui exprime le prix de revient de la t.e.p économisée lorsque l'exploitation acquiert son autonomie énergétique (l'économie réalisée égale la consommation de fuel théoriquement nécessaire mais l'investissement est maintenant majoré des dépenses nécessaires au développement des cultures énergétiques). La minimisation de x_2 , pour toutes les combinaisons possibles de capteurs solaires et de cultures énergétiques, correspondra à la solution assurant l'autonomie du système pour un coût minimal.

La différence $(x_2 - x_1) = [(D/k-x_1)] (q/q^*)$ est bien sûr proportionnelle au degré de dépendance énergétique de l'installation en l'absence de cultures énergétiques et à l'écart qui existe entre les dépenses nécessaires pour produire 1 t.e.p. par an (grâce à des cultures énergétiques) et les dépenses nécessaires pour économiser 1 t.e.p. par an (grâce à des capteurs solaires). L'égalité entre x_1 et x_2 indique, dès lors, soit que l'autonomie du système est entièrement assurée grâce aux capteurs solaires ($q = 0$) soit que le coûts spécifiques des deux solutions sont égaux ($D/k = x_1$. Le prix de revient de la t.e.p produite est égal au prix de revient de la t.e.p économisée).

Une telle approche permet, par simulation, de déterminer le système énergétique qui assure l'autonomie partielle ou totale de l'exploitation agricole au moindre coût. On peut, au demeurant, prendre en considération de nouvelles contraintes comme, par exemple, le manque à gagner subi du fait de l'affectation d'une partie des surfaces exploitables à la production de cultures à forte teneur énergétique.

C - ETUDE DE CAS N° 2 : Coût global actualisé d'une installation de chauffage solaire avec appoint fuel (ou d'une climatisation solaire avec appoint fuel).

On suppose que le décideur a le choix entre deux solutions qui sont censées rendre un service identique à l'usage: un chauffage traditionnel au fuel (ou au bois) et un chauffa-

ge solaire avec appoint fuel. Le coût d'acquisition de l'équipement au fuel est estimé à I (supporté une fois pour toutes l'année de base) et l'évolution du prix du fuel est supposée parfaitement connue sur l'ensemble de la période (1, n). Le prix de départ p se modifie au rythme du taux annuel h. L'utilisation d'un chauffage solaire (capteurs - plans ou pourquoi pas photovoltaïques) avec appoint fuel entraîne un surcoût estimé l'année de base à ΔI (coût des capteurs) et permet d'économiser chaque année une quantité Q_S d'énergie "utile" sur les Q_T thermies nécessaires. Le rendement de l'installation au fuel est égal à u, ce qui signifie que l'utilisateur doit acheter Q_T/r thermies "apparentes" de fuel s'il souhaite pouvoir disposer de Q_T thermies "utiles" pour satisfaire ses besoins de chauffage (dans l'option "sans chauffage solaire"). Le taux d'actualisation retenu est supposé égal à a. Pour se déterminer, le décideur va comparer le coût global actualisé des deux options et opter pour celle qui sera la moins coûteuse. Avec le chauffage au fuel, on a :

$$CGA_1 = I + \sum_{t=1}^n ((1+h)^t / (1+a)^t) p Q_T / r$$

Avec le chauffage solaire et appoint fuel, on a :

$$CGA_2 = (I + \Delta I) + \sum_{t=1}^n ((1+h)^t / (1+a)^t) p (Q_T - Q_S) / r$$

La compétitivité économique de l'installation solaire est atteinte si :

$$CGA_2 \leq CGA_1 \text{ soit :}$$

$$\Delta I \leq \sum_{t=1}^n ((1+h)^t / (1+a)^t) p Q_S / r$$

La valeur actualisée des économies d'énergie réalisées grâce au solaire doit être supérieure, ou au moins égale, au surcoût consenti au départ lors de l'acquisition de l'équipement solaire. On peut ainsi faire apparaître un taux minimum d'économies d'énergie à atteindre par rapport aux besoins pour rentabiliser une telle installation. Ce taux est donné par :

$$Q_S / Q_T \geq \Delta I / \sum_{t=1}^n ((1+h)^t / (1+a)^t) p Q_T / r$$

On peut, dès lors, découper le territoire national en tenant compte simultanément de deux critères : 1) - Le degré d'ensoleillement - 2) - Les besoins de chauffage (ou de climatisation en fonction de la nature du climat. La combinaison de ces deux critères nous donne, zone par zone, la proportion des besoins de chauffage qui pourra être couverte gratuitement par le soleil (Q_S/Q_T). En comparant ce pourcentage à la part que représente l'achat d'un équipement solaire par rapport aux dépenses actualisées qu'il faudrait supporter avec un chauffage fonctionnant exclusivement au fuel, on peut par simple lecture d'un tableau déterminer les régions où le chauffage solaire est compétitif. Dans certains cas, le moindre ensoleillement est partiellement, voire totalement, compensé par l'accroissement de la période de chauffage. On constate ainsi que la longueur de la période de chauffage constitue un paramètre stratégique dans la détermination du degré de compétitivité d'un équipement solaire... Une approche de même type peut être retenue si l'on cherche à tester la compétitivité d'une installation de climatisation...

D - ETUDE DE CAS N° 3 : Choix entre l'interconnexion au réseau ou la production locale d'électricité pour une région rurale isolée (cas inspiré d'un exemple identique proposé par V.FREMAUX (6))

Considérons un village isolé d'une région rurale tropicale. Soit N_1 le nombre de ménages, N_2 le nombre de clients professionnels (artisans, commerçants, administrations) et N_3 le nombre de foyers lumineux pour l'éclairage public. Soit C_1, C_2, C_3 la consommation unitaire moyenne respective en kwh/an pour chacune de ces catégories d'utilisateurs. La demande totale en énergie annuelle à satisfaire est égale à :

$$E = N_1 C_1 + N_2 C_2 + N_3 C_3$$

L'évaluation de la demande en puissance de pointe P pour l'ensemble du village à électrifier se calcule en tenant compte de la durée d'utilisation de cette puissance de pointe exprimée en heure U . Compte tenu des pertes L (en %) cette puissance est donnée par :

$$P = E(1+L)/U \text{ ou } P = E(1+L) / 8760 U$$

Pour $N_1 = 400, N_2 = 20, N_3 = 100, C_1 = 500$ kwh/an, $C_2 = 2500, C_3 = 200$ on trouve $E_1 = 200$ MWh, $E_2 = 50$ MWh et $E_3 = 20$ MWh, soit un total $E = 270$ MWh. Avec un taux de pertes L de l'ordre de 8,5 %, on trouve que la production totale à mettre en oeuvre doit être de l'ordre de 290 MWh. Si $U = 3000$ soit $F = U/8760$ (facteur de charge de la puissance de pointe) on a $P \simeq 96$ kw (rappelons qu'un MWh vaut 1000 kwh)

Le choix entre une production locale et l'interconnexion se fera de la façon suivante, par étapes :

1 - On commencera par examiner les diverses possibilités de production isolée : une solution photovoltaïque A_1 , une centrale diesel A_2 et une mini-centrale hydraulique A_3 . On calcule le coût global actualisé pour chacune de ces solutions, en tenant compte des dépenses d'investissement, des frais de maintenance et des coûts de combustible lorsqu'il y en a (cas du diesel). On trace pour chaque solution la courbe de coût du kwh actualisé en fonction de divers paramètres (la durée d'utilisation ou le prix du fuel par exemple). La sensibilité du coût du kwh actualisé à la durée d'utilisation annuelle de la puissance sera, bien sûr, beaucoup plus forte avec le photovoltaïque ou la mini-hydraulique qu'avec le diesel, c'est-à-dire avec les options qui n'ont pas ou ont peu de frais proportionnels (cf. combustible). On choisira la solution locale la moins coûteuse compte tenu de ce que sera l'allure de la demande dans le temps (repérée par le "facteur de charge"). Soit CGA_1 le coût global de cette solution.

2 - On calculera, dans un second temps, le coût global actualisé CGA_2 du kwh rendu au village après interconnexion au réseau national. Ce coût est la somme de deux éléments: le coût global actualisé du kwh desservi sur le réseau (supposons qu'il soit égal à 0,40 F) d'une part, le coût global actualisé lié au transport depuis le réseau national jusqu'au village, d'autre part. Le coût d'investissement unitaire du réseau d'interconnexion est estimé à 130 kF/km. Si la distance à parcourir est $d = 30$ km, la durée de vie des lignes de 30 ans, le taux d'actualisation de 10 %, ce coût global actualisé est, pour une consommation annuelle de 290 MWh (pertes incluses) de :

$$(130 \times 30) / (290 \times 9,43) = 1,43 \text{ F/kwh}$$

On trouve, en effet, un facteur d'actualisation égal à 9,43

(soit $\sum_{t=1}^{30} (1+a)^{-t}$ pour $a = 10\%$). Le coût global actualisé

du kwh rendu utilisateur final sera donc, au total, égal à : $1,43 + 0,40 = 1,83$ F.

3 - On compare le prix de revient du kwh fourni par le réseau (CGA_2) au prix de revient du kwh produit localement par la meilleure des trois options disponibles (CGA_1) et l'on choisit bien sûr la solution la moins coûteuse. On

peut ainsi calculer la "distance d'équilibre" d^* , celle qui rend équivalente l'interconnexion et la production locale. C'est le nombre de kilomètres entre le réseau interconnecté existant et le village à électrifier qui, pour une demande donnée, permet d'avoir $CGA_1 = CGA_2$. Ainsi, pour $CGA_1 = 1,20 \text{ F/Kwh}$ (prix de revient du kwh photovoltaïque, dans l'hypothèse où cette solution serait meilleur marché qu'une centrale mini-hydraulique ou un générateur diesel) on trouve $d^* = 16,8 \text{ km}$. On a en effet $0,40 + (130 d^*) / (290 \times 9,43) = 1,20$ soit $d^* \approx 16,8$.

Dès lors, tous les villages situés à une distance du réseau existant supérieure à 16,8 km doivent être électrifiés avec une solution photovoltaïque. Tous les villages qui sont situés à une distance inférieure à 16,8 km de ce réseau doivent être interconnectés au réseau existant.

Deux remarques méritent d'être faites à ce niveau:

- il faut dans ce genre de comparaison tenir compte du phénomène de "foisonnement des charges". Le foisonnement est une particularité de l'électricité, un des avantages des réseaux, même des réseaux de dimension modeste. Il s'agit du phénomène qui fait que la pointe maximale d'un ensemble de demandes de pointe isolées est généralement inférieure à la somme de chacune de ces pointes isolées.

- il faut, pour éviter une défaillance, que la puissance installée d'un système local de production d'électricité soit supérieure à la puissance de pointe à satisfaire augmentée de la puissance du plus gros groupe de production ("règle dite du plus gros groupe"). Cela afin que le système ne soit pas défaillant si le plus gros groupe est à l'arrêt pour une raison quelconque (cas d'une production locale obtenue à partir de plusieurs sous-systèmes interconnectés).

III - LES CONTRAINTES

La pénétration de l'énergie solaire (le photovoltaïque notamment) dans le bilan énergétique d'un pays ne dépend pas de la seule compétitivité économique appréciée isolément par référence à des solutions alternatives. Elle peut être accélérée ou freinée par divers facteurs, parmi lesquels les politiques étatiques et les stratégies des producteurs jouent un rôle déterminant. La fonction de l'Etat c'est, en particulier, d'apprécier l'intérêt de ces énergies en tenant compte d'autres considérations que la seule rentabilité financière. Il faut donc introduire dans le calcul économique une dimension qui n'a de sens qu'à un niveau national, celle de l'intérêt général. Il faut ensuite étudier dans quelle mesure les politiques tarifaires actuellement mises en oeuvre, les modalités de financement en vigueur et le fonctionnement du marché de l'énergie constituent des contraintes ou au contraire des stimulants pour la promotion de cette source d'énergie.

A - LA NECESSITE D'UNE VISION PLURI-DIMENSIONNELLE DES CHOIX

L'analyse coûts-avantages telle qu'elle s'exprime à travers les critères présentés ci-dessus (VAN, CGA, TRI) est souvent une évaluation fragmentaire des choses, d'abord parce qu'elle laisse dans l'ombre certains effets d'essence qualitative qu'il est difficile de mesurer en termes monétaires, ensuite parce qu'elle privilégie un seul point de vue: celui du décideur. Il est légitime qu'un particulier choisisse l'investissement pour lequel la différence entre les recettes actualisées et les dépenses actualisées est la plus grande. Mais du point de vue collectif, d'autres considérations doivent interférer: les impacts sur l'emploi, sur l'équilibre extérieur, sur l'environnement, etc... A un niveau macroéconomique, les dépenses de certains agents constituent des recettes pour d'autres et il faut donc avoir une vision d'ensemble des conséquences de chaque programme.

Rien ne garantit en effet qu'une séquence de choix individuels successifs conduira nécessairement à un résultat cohérent au niveau national. L'Etat, garant de l'intérêt général, a le droit d'afficher un certain nombre de priorités pour tenir compte des contraintes qui n'ont de sens qu'à un niveau collectif:

- priorité aux ressources locales sur les ressources importées; C'est un moyen d'éviter la détérioration de l'équilibre extérieur, ce qui revient à accorder un "prix

fictif" (shadow price) à la devise. Tout dollar économisé aura, de ce fait, un prix bien supérieur à son cours observé sur le marché des changes.

- priorité à l'emploi, ce qui revient à favoriser les investissements qui diminueront le plus le chômage grâce aux "effets d'entraînement" sur le tissu industriel local.

- priorité à la sauvegarde de l'environnement ce qui implique de pénaliser les solutions génératrices d'effets externes négatifs (principe du pollueur-payeur) et de favoriser les solutions "propres" grâce à des subventions ou des crédits à taux bonifiés.

- priorité aux solutions qui minimisent les risques "d'éviction" sur le marché financier. La faiblesse de l'épargne dans des pays où les marchés financiers sont étroits conduit à favoriser les investissements qui évitent les fortes ponctions sur le marché obligataire. L'Etat est généralement lui-même fortement endetté et le financement du déficit public tend à engendrer des "effets d'éviction" (les investisseurs privés sont évincés du marché par l'emprunteur public). Le recours à de grands projets énergétiques fortement capitalistiques (hydraulique, centrales thermiques, développement des réseaux et infrastructures) risque d'accroître le phénomène en épongeant le peu de liquidités disponibles...

Des programmes d'investissement plus modestes et plus facilement modulables constituent une réponse à ce risque d'assèchement. Mais, à l'inverse, il est souvent plus difficile de trouver des fonds sur un marché ou des crédits bancaires pour financer un programme modeste que pour se lancer dans des programmes très ambitieux. Les banques ou organismes financiers internationaux sont très sensibles à "l'effet de seuil". Il est souvent plus facile d'emprunter des millions de dollars que quelques milliers de francs...

- priorité à une politique rationnelle d'équipement des usagers. Deux phénomènes différents concourent à l'électrification d'un pays :

1) - L'électrification "en surface" qui consiste à étendre le réseau électrique dans une zone jusqu'alors dépourvue. On calcule ainsi un "taux de couverture géographique" $TC = N_1/N$ qui reflète la part des ménages qui vit en zone électrifiée (N_1 représente le nombre de ménages vivant dans une région alimentée en électricité et N le nombre de ménages du pays.)

2) - L'électrification "en profondeur" qui consiste à permettre l'accès à l'électricité de ménages vivant en zone déjà alimentée en électricité mais qui jusqu'alors n'en bénéficiaient pas. On calcule ainsi un "taux de desserte" en zone électrifiée $TD = N_2/N_1$ (où N_2 représente le nombre de ménages électrifiés).

Par définition, le taux d'électrification $TE = N_2/N$ est obtenu en multipliant TC par TD. Or, l'accès à l'électricité est souvent difficile en raison de la difficulté qu'ont les ménages à se procurer les équipements utilisateurs d'énergie. Une politique d'électrification qui ne se soucierait pas du coût d'accès aux équipements consommateurs d'électricité risquerait d'aller au devant de nombreux déboires. Il ne suffit pas de produire et de transporter de l'électricité, il faut encore qu'il y ait un usager susceptible de l'acheter en bout de ligne. L'avantage des solutions décentralisées c'est que le lien entre l'usager et le moyen de production est plus facile à faire. Certains pays, pauvres en énergie, se retrouvent paradoxalement en sur-capacité électrique pour n'avoir pas ajusté politique d'électrification et politique d'équipement des usagers...

La "méthode des effets" développée par CHERVEL (2) permet d'apprécier un programme d'investissements énergétiques sous un éclairage différent de celui du calcul économique traditionnel. L'idée de base est que tout investissement énergétique peut être décomposé en plusieurs éléments constitutifs: des salaires versés, des profits distribués, des impôts nets de subventions, des importations et des consommations intermédiaires, elles-mêmes décomposables en salaires, profits, impôts et importations... On peut ainsi comparer les "effets induits" d'un programme d'investissement aux conséquences qu'il faudrait supporter dans la situation de référence où cet investissement ne serait pas réalisé ou aux conséquences d'un programme alternatif (plus "coûteux" en importations mais moins "cher" pour l'utilisateur final par exemple). C'est à l'Etat de dire ensuite quelle est la structure de flux de dépenses qui coïncide le mieux avec l'intérêt général.

Une telle approche ne prétend pas se substituer telle quelle à la méthode "classique" de la valeur actualisée nette. Elle la complète en fournissant un éclairage supplémentaire que l'Etat ne peut pas ignorer totalement. Nous avons appliqué cette méthode à un exemple pédagogique simple.

Considérons un programme national de promotion de l'énergie solaire (photopiles et capteurs - plans) permettant d'économiser 6 millions de tonnes de pétrole importé par an. Sur la base d'un baril de pétrole à 20\$ et d'un dollar

à 5,7FF cela réduira les importations de brut de 5000 millions de francs par an. Ces équipements solaires correspondent à un "surcroît" estimé à 1250 FF par t.e.p et par an soit, au total, un programme de 7500.10^6 FF chaque année (taxes comprises). Ce programme d'investissements exercera des effets induits sur le reste de l'économie nationale et l'on peut estimer que les dépenses supportées par les usagers se décomposent de la façon suivante :

- 50 % sous forme de salaires bruts versés (soit 3750.10^6 F)

- 25 % sous forme de consommations intermédiaires, c'est-à-dire d'achats à d'autres firmes, dont les 2/3 (soit 1250.10^6 F) à des entreprises françaises, le solde (625.10^6 F) étant constitué par des importations. Les produits utilisés dans la fabrication des équipements solaires sont essentiellement d'origine nationale et une forte proportion des firmes qui les mettent sur le marché sont de dimension moyenne (PMI). Ces 1250.10^6 F vont, à leur tour, se décomposer en produits importés (315.10^6 F), salaires distribués (625.10^6 F), profits accumulés (125.10^6 F) et impôts prélevés (185.10^6 F)

- 15 % sous forme d'impôts sur le revenu et de TVA (soit 1125.10^6 F)

- 10 % sous forme de profits (soit 750.10^6 F).

Les revenus distribués vont à leur tour se traduire par de nouvelles vagues de dépenses mais nous négligerons ici ces effets secondaires dignes d'un multiplicateur keynésien...

Ainsi, les usagers qui vont opter pour un équipement solaire vont, globalement, dépenser 7500.10^6 F alors qu'ils auraient pu, pour se chauffer ou s'éclairer, recourir à du pétrole importé et ne dépenser que 5000.10^6 F. Ils subissent, de ce fait, une "perte de surplus" de l'ordre de 2500.10^6 F, ce qui se traduira par une moindre consommation dans d'autres domaines (alimentation, vêtements, services, etc... Conséquences que nous négligeons ici). On fait l'hypothèse que le budget de l'Etat prend à sa charge une partie de ce surcoût grâce à un système de subventions ou de dégrèvements fiscaux (800.10^6 F). La "perte nette de surplus" des consommateurs est ainsi ramenée à 1700.10^6 F.

Les impacts macroéconomiques du programme solaire sont synthétisés dans le tableau IV (colonne 3). La colonne 4 regroupe les conséquences macroéconomiques de la solution alternative, l'importation de 6 millions de tonnes de pétrole. Cette solution se traduirait non seulement par des importations de l'ordre de 5000.10^6 F mais également par l'obligation faite à l'Etat d'indemniser directement ou

indirectement les chômeurs des entreprises fabriquant les équipements solaires (coût estimé ici à 500.10^6 F). Il faut également tenir compte des conséquences sociales induites par la solution solaire sur l'activité des importateurs - distributeurs de produits pétroliers. C'est un "coût induit" pour la solution solaire ; par simplification, nous n'en tiendrons pas compte ici...

La colonne 5 permet d'apprécier les avantages et inconvénients du programme solaire à un niveau macroéconomique, par rapport à la solution alternative (l'importation de pétrole). Notons que les effets macroéconomiques liés à l'achat des équipements au fuel n'ont pas à être comptabilisés puisqu'ils interviennent dans les deux solutions (le solaire n'est ici perçu que comme un appoint). Choisir la solution solaire revient à accepter un surcoût au niveau des équipements et à bénéficier d'une économie au niveau du combustible.

En première analyse, le choix solaire n'est pas "économique", puisque le surcoût s'élève à 7500 millions de francs par an, alors que l'économie de combustible atteint 5000 millions de francs seulement. A un niveau macroéconomique, le problème peut être vu sous un angle différent. La solution solaire permet une création nette de valeur ajoutée de 4060.10^6 F par an. Ce supplément de richesse nationale est bien évidemment égal aux économies de devises qui ont pu être faites et qui constituent d'ailleurs autant de valeur ajoutée "perdue" pour les entreprises étrangères. L'opération semble donc "positive" si l'on se place sous l'angle de la création d'emplois ou de l'économie de devises. Il faut, toutefois, avoir conscience que les gains obtenus par les salariés, les entreprises ou les contribuables (sous forme de salaires, profits et impôts distribués) le sont pour partie au détriment des consommateurs...

La méthode des effets n'a pas pour ambition de se substituer au calcul économique auquel doit se livrer tout agent économique rationnel. Elle jette simplement un éclairage nouveau sur les conséquences d'un choix et montre qu'à un niveau collectif, les problèmes se posent parfois en termes différents... Maintenir systématiquement en activité des mines de charbon non rentables d'un point de vue microéconomique (mais génératrices de "retombées macroéconomiques" sur le tissu local), aider à-tout-va les "canards boiteux" au nom de l'emploi ou de l'équilibre extérieur n'est pas une solution optimale. La méthode des effets ne prétend pas rendre "compétitifs", à un niveau macroéconomique, tous les projets qui ne le sont plus ou ne le sont pas encore

à un niveau microéconomique. Elle montre simplement que l'intérêt général ne se réduit pas à une sommation d'intérêts individuels. C'est à l'Etat de choisir les grandes orientations et d'en payer le prix.

B - LA NECESSITE D'UNE POLITIQUE TARIFAIRE COHERENTE

La "rentabilité" du solaire photovoltaïque dépend non seulement de considérations intrinsèques liées au coût des matériaux mais elle dépend aussi des systèmes tarifaires en vigueur sur les réseaux interconnectés. Dans les pays en voie de développement, les marchés du solaire existent mais ils sont souvent "rétrécis" voire annihilés en raison des subventions accordées aux énergies concurrentes (diesel, fuel, essence, GPL...) (cf. J. PERCEBOIS (10)).

De ce point de vue, l'impact des chocs pétroliers sur le système électrique des PVD n'est pas négligeable. A l'exception des quelques pays qui bénéficient d'un vaste potentiel hydraulique, les pays ont été contraints de subventionner fortement la production d'électricité thermique suite à la hausse brutale du prix du brut. L'impossibilité d'ajuster les tarifs aux nouvelles conditions de coût, la difficulté qu'ont les compagnies d'électricité à obtenir le paiement des factures (l'administration étant, d'ailleurs, le plus mauvais payeur !) ont mis les producteurs d'électricité dans une situation de quasi-faillite ; d'où un ralentissement voire un arrêt des programmes d'électrification. A un moment où il est difficile de dégager les ressources financières indispensables à la réalisation de grands projets d'interconnexion, le recours à des solutions décentralisées du type photopiles peut s'avérer judicieux. Encore faut-il que les choix ne soient pas biaisés par des politiques tarifaires incohérentes. La péréquation des tarifs électriques sur l'ensemble d'une zone voire d'un pays peut se justifier pour des raisons sociales, voire économiques. Cela consiste notamment à faire supporter aux usagers urbains une partie des coûts de l'électrification rurale, puisque la tarification se fait au coût moyen et non pas au coût marginal. Cela risque paradoxalement de compromettre la compétitivité de solutions décentralisées (du type solaire) donc de conduire à des situations infra-optimales.

Si l'on faisait payer à chaque usager le coût réel supporté par la collectivité, du fait de sa présence sur le réseau, cela aboutirait inéluctablement à pénaliser les usagers isolés, ce qui, socialement, peut sembler injuste. Mais cela pourrait accélérer le recours à des programmes décentralisés qui, en définitive, pourraient être justifiés d'un point de vue collectif. Il appartient à l'Etat d'avoir conscience des effets induits par des politiques tarifaires

inadaptées. Ne pas faire payer un usager, c'est en faire payer un autre ou...à défaut, faire payer un contribuable. Les politiques visant à subventionner l'utilisation du GPL (pour lutter contre la déforestation notamment) ont un effet identique. Des aides au photovoltaïque peuvent, dès lors, rétablir une "égalité des chances" que la politique budgétaire avait rompue.

C - LE POIDS DES STRATEGIES D'ACTEURS

Il existe plusieurs segments sur le marché mondial des photopiles (cf. A. NICOLON et J.C. HOURCADE (7)):

- un marché de micro et mini-puissances pour des applications grand public (montres, calculettes, lampe-torche)

- un marché d'équipements de faible puissance (< 1 kw) pour les télécommunications, le radio-guidage aérien, etc... situés en sites isolés et pour lesquels les sources classiques (raccordement au réseau, groupe diesel, batterie) sont jugées trop coûteuses et moins fiables que le photovoltaïque

- un marché du résidentiel dans les pays industrialisés. Pour l'instant, il s'agit surtout d'équiper des habitations éloignées du réseau interconnecté, mais certains considèrent qu'il y a là un marché potentiel considérable (moyen facile pour accéder au confort électrique sans recourir à un groupe électrogène diesel bruyant, polluant et à maintenance contraignante). Ajoutons que les usagers sont dans ce cas disposés à payer un surcroît en contrepartie de cet avantage qualitatif...

- un marché de l'électrification rurale dans les PVD. La compétitivité du photovoltaïque est déjà atteinte dans certaines zones (cf. D.O.M.-T.O.M.). C'est indiscutablement un marché considérable mais plusieurs préalables doivent être remplis si l'on veut qu'il se développe :

- * l'aide publique à la recherche/développement doit s'intensifier,

- * des mécanismes originaux de financement doivent être mis en oeuvre (problème dit de la "masse critique" dans la mesure où il s'agit souvent de plusieurs projets dispersés)

- * la stratégie des compagnies pétrolières et/ou électriques qui dominent le marché ne doit pas pénaliser le photovoltaïque là où il est en compétition avec le fuel ou l'électricité "centralisée".

Il semble qu'il y ait deux stratégies assez différentes en ce domaine de la part des sociétés qui fabriquent de tels équipements : certaines misent sur le "haut de gamme", cherchant à mettre au point des systèmes performants mais coûteux, d'autres misent au contraire plutôt sur le "bas de gamme", en recherchant des systèmes à moins bon rendement mais meilleur marché. Il ne faut pas que le photovoltaïque soit réservé aux gadgets ou aux seules applications spatiales. Sa contribution à l'électrification des PVD est indispensable. Le tableau V, qui reprend une étude menée par B. DESSUS, montre qu'en 1988 le chiffre d'affaires du photovoltaïque n'était pas négligeable (2 milliards de francs contre 5 pour les capteurs - plans, 1,2 pour le diesel en sites isolés, 150 pour la petite hydraulique...et 35 seulement pour le nucléaire).

L'électrification photovoltaïque a, d'ores et déjà, un marché dans certaines régions isolées. Elle a, en outre, un avenir dans les zones rurales de nombreux P.V.D. Mais son développement n'est ni garanti, ni inéluctable. Cela suppose que l'Etat ait conscience que cette source d'énergie est particulièrement bien adaptée à certains besoins et qu'il faut donc en programmer l'emploi dans le cadre de plans énergétiques cohérents. Deux facteurs risquent, dans les prochaines années, d'accélérer le recours à cette forme d'énergie :

1 - une remontée des tensions sur le marché international du pétrole (qui rentabiliserait plus rapidement les systèmes photovoltaïques par rapport aux solutions diesel),

2 - une montée des préoccupations environnementales (lutte contre la déforestation, la pollution chimique, l'effet de serre qui donnerait un avantage comparatif aux photopiles sur d'autres systèmes).

Cela ne signifie pas que l'interconnexion par grands réseaux doit être abandonnée. Il est préférable, toutefois, d'opter, parfois, pour des solutions "décentralisées". Et ne l'oublions pas : les pays européens dans lesquels l'interconnexion est aujourd'hui quasi-totale, ont eux aussi connu

une électrification largement fondée, au début tout au moins, sur des centres isolés. C'est ensuite, parallèlement à l'extension de l'électrification rurale, que ces centres ont été reliés entre eux. Une bonne partie de l'électrification rurale en France a été réalisée avec des mini-centrales hydrauliques. Les leçons du passé peuvent, là encore, nous être utiles...

Les perspectives de l'énergie solaire sont résolument optimistes, surtout dans les pays en développement, dès lors que l'ensemble des coûts et avantages marchands et non-marchands des diverses filières énergétiques sont pris en compte dans le calcul économique. Il faut toutefois être réaliste et ne pas oublier que les substitutions entre formes d'énergie sont lentes et requièrent un renouvellement des équipements. Pour cette raison la pénétration du solaire ne saurait dépasser un certain seuil à l'horizon 2000 ou 2010, d'autant que le solaire n'a pas vocation à satisfaire tous les besoins, dans un contexte où les réserves d'hydrocarbures et de charbon sont importantes et où la technologie nucléaire demeure, elle aussi, prometteuse. Une bonne analyse économique doit conduire à favoriser l'énergie solaire lorsque c'est la forme d'énergie la mieux adaptée. Mais il ne faut pas confondre logique économique et prosélytisme.

x x x

Régions	En tep/an et par habitant	population concernée en 10 ⁶
Amérique du Nord	8,1	268
U.R.S.S.	4,9	282
Europe de l'Est	4,5	116
Japon	3,3	122
Europe de l'Ouest	3,2	390
Amérique Latine	1,0	410
Chine	0,8	1080
Asie/Océanie	0,4	1800
Afrique	0,4	560
Monde	moyenne 1,6	5128

Source AFME

Tableau I : Consommation d'énergie par capita en 1988

Besoins	Electricité	Autres énergies
éclairage domestique	--	pétrole lampant, bougies
éclairage public	usage captif	--
télévision	usage quasi-captif	batterie automobile
réfrigération/congélation	usage captif	--
climatisation	usage captif	--
eaux chaudes sanitaires	--	pétrole, charbon, gaz, bois
lave linge, lave vaisselle	usage captif	
cuisson	--	bois, charbon, pétrole, gaz
force motrice	--	fuel (diesel)
appareils électroménagers	usage captif	--
télécommunications	usage quasi-captif	--

Tableau II : Les usages captifs de l'électricité

en 10^6 FF par an

Répartition des coûts	(1) programme solaire (coût annuel)	(2) structure des consommations intermédiaires	(3) effets macroéconomiques directs et indirects du programme solaire	(4) effets macroéconomiques de la solution alternative (chauffage au fuel)	(5) avantages de la solution solaire par rapport à la solution alternative (au fuel)
salaires bruts (y compris cotisations sociales et indemnités de chômage)	3 750	625	4 375	500	+ 3 875
consommations intermédiaires nationales	1 250	-	-	-	-
importations	625	315	940	5 000	+ 4 060
impôts (IRPP, IS et TVA)	1 125	185	1 310	-	+ 1 310
profits	750	125	875	-	+ 875
TOTAL	7 500	1 250	7 500	5 500	2 000
variation du surplus des consommateurs	- 1 700	-	- 1 700	-	- 1 700
variation du budget de l'Etat	- 800	-	- 800	- 500	- 300
TOTAL	5 000	-	5 000	5 000	0

Source : estimations de l'auteur

Tableau IV Impacts macroéconomiques d'un programme solaire ($6 \cdot 10^6$ lcp/an)

Références bibliographiques

- 1 - BANQUE MONDIALE - "Rapport sur le développement dans le monde 1988" - Editions Economica, 1988.
- 2 - CHERVEL. M. - "Calculs économiques publics et planification" Editions Publi Sud, Paris, 1987, 347 pages.
- 3 - DESSUS. B. - "Stratégies énergétiques et effet de serre" Session de formation IEPE Grenoble 29 Mai/2Juin 1989
- 4 - DESSUS. B. - "Les promesses des énergies renouvelables" in La Recherche n° 214 - Octobre 1989 p. 1282-1289.
- 5 - DESSUS. B. - "Energie-développement-environnement, un enjeu planétaire au XXIème siècle". in Revue de l'Energie n° 415, Novembre 1989 pp. 978-992.
- 6 - FREMAUX. V. - "La planification du secteur électrique dans les P.V.D." Document interne IEPE, Août 1989.
- 7 - NICOLON.A. et HOURCADE. J.C. - "La course d'obstacle des nouvelles énergies renouvelables : biogaz, photovoltaïque, éoliennes". in Energie Internationale, 1987-1988, Ed. Economica, p. 179-197.
- 8 - O.C.D.E. (AIE) - "Sources d'énergie renouvelables", Paris, Novembre 1987, 393 pages.
- 9 - PERCEBOIS. J. - "L'énergie solaire ; perspectives économiques". Ed. du CNRS, 1975.
- 10 - PERCEBOIS. J. - "Les prix de l'énergie dans les pays en développement". In Revue de l'Energie n° 408, 1989.
- 11 - PERCEBOIS. J. - "Economie de l'Energie". Editions Economica Paris, 1989, 689 pages
- 12 - SHUNKER. A. et MENENTEAU.P. - "Le secteur électrique africain dans un contexte de crise financière aigüe". In Energie Internationale 1989-1990, Ed. Economica, p. 203-218
- 13 - VALETTE. F. - "Simulation et optimisation de systèmes micro-énergétiques". Thèse de docteur ingénieur. Université de Toulouse, Juin 1986. (CNRS ; Centre d'Ecotechniques de Montpellier)