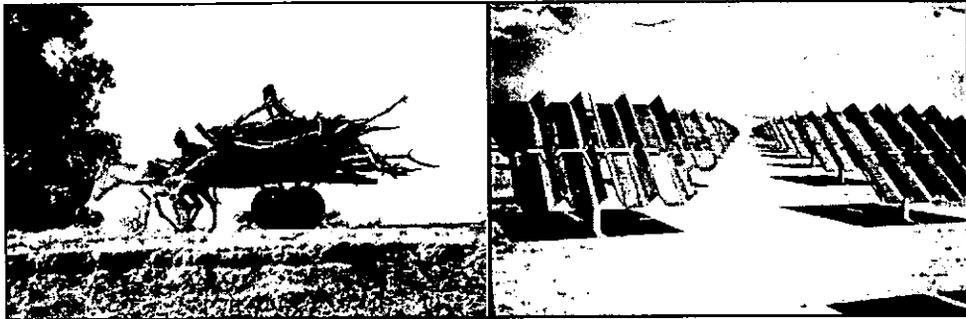


*Centre universitaire d'étude
des problèmes de l'énergie*

QUELLE PLACE POUR LES ENERGIES RENOUVELABLES AU SIECLE PROCHAIN ?



**Actes
de la Journée du Cuepe 1997 et
du 1^{er} colloque du cycle de formation du Cuepe 97-99**

édités par
Pierre HOLLMULLER et Bernard LACHAL
octobre 1997



UNI-GE



1070671607

CWEB 354

R 221351760

0878 - 46960

Actes de la Journée du Cuepe 1997 et
du 1^{er} colloque du cycle de formation du Cuepe 97-99

Elimine!

**QUELLE PLACE POUR
LES ENERGIES RENOUVELABLES
AU SIECLE PROCHAIN ?**

édités par

Pierre HOLLMULLER et Bernard LACHAL

Octobre 1997

620.921

QUE

Adresse : Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (Cuepe),
19 avenue de la Jonction, CH - 1205 Genève

BIBLIOTHEQUE
Centre universitaire d'étude
des problèmes de l'énergie
CUEPE
19, avenue de la Jonction
CH-1205 GENEVE

d/97/2392

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS	1
CONFERENCES	
(<i>Spécificité des énergies renouvelables</i> Bernard Lachal, Cuepe, Genève	5
(x <i>La contribution potentielle des énergies renouvelables au développement durable</i> Bernard Chabot, ADEME, France	21
(<i>L'agriculture, joker énergétique ?</i> Antoine Reist, Station fédérale de recherche agronomique de Changins, Conthey	37
<i>L'évolution de l'utilisation des énergies renouvelables : exemple de l'habitat</i> Willi Weber, Cuepe, Genève	43
x <i>Les applications du photovoltaïque, aujourd'hui et demain</i> André Mermoud, GAP et Cuepe, Genève	57
<i>Les modules photovoltaïques : Evolution et perspective</i> Alain Ricaud, CYTHELIA, France	75
<i>Le programme photovoltaïque de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN)</i> Stefan Nowak, NET SA, St. Ursen	91
x <i>L'électrification rurale avec des systèmes photovoltaïques en Bolivie</i> Javier Gil, P.A., Bolivie	95
CONTRIBUTION SPONTANNEE	
x <i>Eaux usées et déchets organiques : matières premières pour la production de biogaz</i> Yves Membrez, EREP SA, Aclens	117
POINT DE VUE	
<i>Une vision futuriste de l'approvisionnement en énergie au 21^{ème} siècle</i> Kim Gyr, Vevey	125
PROGRAMME DE LA JOURNEE	129
LISTE DES PARTICIPANTS	131

AVANT PROPOS

Depuis la nuit des temps jusqu'à la révolution industrielle, les énergies renouvelables ont permis à l'homme de satisfaire tant bien que mal ses besoins. Avec l'invention de la machine à vapeur, tout se renverse et l'homme devient dépendant des énergies non renouvelables (d'abord le charbon puis le pétrole et le gaz). Dans de nombreux pays du Sud, en revanche, le bois et la biomasse constituent encore les principales sources d'approvisionnement. L'exploitation des ressources énergétiques se heurte à des seuils : flux limité pour les énergies renouvelables et épuisement du stock pour les non renouvelables. De plus, l'utilisation de l'énergie a des effets très importants sur l'environnement.

Aujourd'hui l'énergie peut être perçue comme une contrainte ou comme un défi. Une « contrainte », car dans une époque où l'on assiste à l'émergence des grands pays du Sud, la disponibilité des ressources énergétiques et les problèmes environnementaux peuvent court-circuiter le développement socio-économique à l'échelle planétaire, avec des conséquences sociales difficilement calculables. Un « défi », car la question énergétique et environnementale est en train de nous obliger à réfléchir sur les choix fondamentaux de société, comme le débat sur le « développement durable » le montre.

Le colloque se propose d'approfondir la question du rôle que les énergies renouvelables pourraient ou devraient jouer au siècle prochain. Il le fait en examinant un certain nombre d'éléments qui caractérisent ces énergies, notamment:

- leur marginalisation progressive à partir de la révolution industrielle dans les pays du Nord,
- leur prédominance dans plusieurs pays du Sud,
- les attentes concernant leur contribution à la couverture des besoins énergétiques du XXI^e siècle.

Une attention particulière est consacrée au potentiel des énergies renouvelables, à l'impact environnemental et aux facteurs socio-économiques qui peuvent accélérer ou freiner leur diffusion. Ces problèmes sont abordés dans une optique interdisciplinaire intégrant les sciences de l'ingénieur, l'architecture et les sciences humaines.

Le programme prévoit, tout d'abord, de définir les spécificités et les potentialités des énergies renouvelables pour un développement durable; ensuite, d'examiner dans une perspective historique leur contribution à la satisfaction de deux besoins fondamentaux de l'homme : la nourriture et l'habitat; enfin, de donner la parole à différents acteurs d'une filière solaire (le photovoltaïque) qui, même si elle a été quelquefois source de déceptions, suscite toujours beaucoup d'espairs. La journée se termine par une table ronde, lors de laquelle nos invités et le public débattent sur la place des énergies renouvelables au siècle prochain.

Cette manifestation constitue à la fois le premier colloque du cycle de formation 97-99 « Quels systèmes énergétiques pour le XXI^e siècle » et la septième journée du Cuepe.

CONFÉRENCES

Spécificité des énergies renouvelables

Bernard Lachal

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)

19, avenue de la Jonction, CH - 1205 Genève

e-mail : bernard.lachal@cuepe.unige.ch

1 Introduction

L'homme n'a pas attendu la fin de ce siècle pour se chauffer, se mouvoir, produire grâce à l'énergie solaire. Elle a longtemps constitué l'unique ressource énergétique de l'humanité, mais la civilisation industrielle n'a pu s'accommoder d'une source d'énergie abondante mais capricieuse, naturelle mais fugitive. Face aux problèmes que posent l'utilisation des énergies non renouvelables (raréfaction des ressources, effets négatifs sur l'environnement, risques de tensions internationales), les énergies renouvelables, flux permanents¹ d'énergie qui finissent de toute façon dégradés dans l'environnement, sont redécouvertes et font l'objet de nombreuses études techniques visant à les domestiquer.

Cet article fait le point sur les filières utilisant les énergies renouvelables et souligne leur spécificité.

2 L'utilisation des énergies renouvelables : une marginalisation récente.

Au niveau biologique, les besoins énergétiques de l'homme sont couverts exclusivement par de l'énergie solaire - 2500 kcal par jour, soit 10.5 MJ ce qui correspond à une puissance moyenne de 120 W environ. Le rendement de conversion de la "machine" humaine, pourtant l'un des plus élevés du règne animal, ne dépasse pas 20% : l'homme dispose donc biologiquement de relativement peu d'énergie et recherche de façon permanente une quantité additionnelle.

Pour satisfaire ses besoins thermiques (cuisine, chauffage, travail des métaux et du verre,...), il a puisé abondamment dans la biomasse, créant tout au long de son histoire de nombreuses crises du bois (dès l'antiquité, en Chine dès le XII^{ème} siècle, en Europe pré industrielle ou de façon critique dans les pays du sud aujourd'hui). Leurs causes se situent autant dans la raréfaction des ressources locales que dans la difficulté à développer un transport terrestre efficace.

Pour satisfaire ses besoins en énergie mécanique (transport, travail agricole, construction, artisanat, industrie,...), il a tout d'abord fait appel à l'énergie d'autres êtres humains et à la force des animaux. L'exploitation directe du travail humain est petit à petit abandonnée. Pour mémoire, rappelons les tentatives d'élevage intensif d'esclaves au Brésil et en Amérique du Nord, heureusement sans succès, ou l'utilisation des enfants pour transporter le charbon dans les mines en Europe au siècle passé. L'utilisation de l'animal, elle, a posé des problèmes aigus dès qu'elle a atteint un certain seuil. Au début du siècle, l'agriculture américaine consacrait 25% de sa surface cultivée pour nourrir ses 25 millions de chevaux. Les transports urbains

¹ Au niveau de l'homme, puisque si le soleil va disparaître un jour, il continuera à briller encore quelques milliards d'années.

étaient alors quasi exclusivement réalisés par des chevaux. On estime qu'en 1900, 10 millions de tonnes de crottins étaient déversés annuellement dans les rue des villes anglaises et que chaque année, la ville de New York devaient se débarrasser de 15 000 chevaux morts abandonnés sur les 700 000 qui l'animaient. L'arrivée de systèmes de transport mus en grande partie par de l'énergie fossile - train, métro et voiture - soulagea la ville, au moins dans un premier temps. Dans beaucoup de pays du sud, l'agriculture et les transports en zone rurale restent essentiellement à base de traction animale .

Deux autres ressources renouvelables ont été également utilisées depuis l'antiquité : le vent et la force hydraulique. En Europe, le moulin à eau s'est beaucoup développé à partir du XI^{ème} siècle, ce qui a conduit à la saturation des sites dès le milieu du XIII^{ème} siècle. L'exploitation des moulins à vent et surtout l'amélioration des techniques ont permis d'augmenter alors la puissance disponible. C'est ainsi qu'à la fin du XVIII^{ème}, on dénombrait 500 000 moulins en Europe, totalisant une puissance estimée à 1500 MW (Cf. table suivante). A ces chiffres, il conviendrait d'ajouter la puissance des bateaux à voile, qui totalisaient à cette date quelques 1 000 MW [1].

	Nombre de moulins	Nombre de roues	Puissance moyenne, kW	Puissance totale, MW	Population millions
fin XVI ^{ème}	300 000	300 000	1.5	450	75
fin XVIII ^{ème}	500 000	750 000	2	1500	187

Table 1 : puissance installée des moulins à eau en Europe, d'après ref.[1]

Le charbon a pris la relève au cours du XIX^{ème} siècle, d'abord en Angleterre puis dans les autres pays. Par exemple, en France, si on recensait environ 110 MW d'hydraulique contre 50 MW de machines à vapeur en 1848; la proportion était inverse en 1900 (500MW contre 1900 MW). L'homme quittait alors l'ère des énergies limitées en flux mais renouvelables pour entrer dans celle des énergies fossiles, sans limite de flux mais épuisables dans le temps (figure 1).

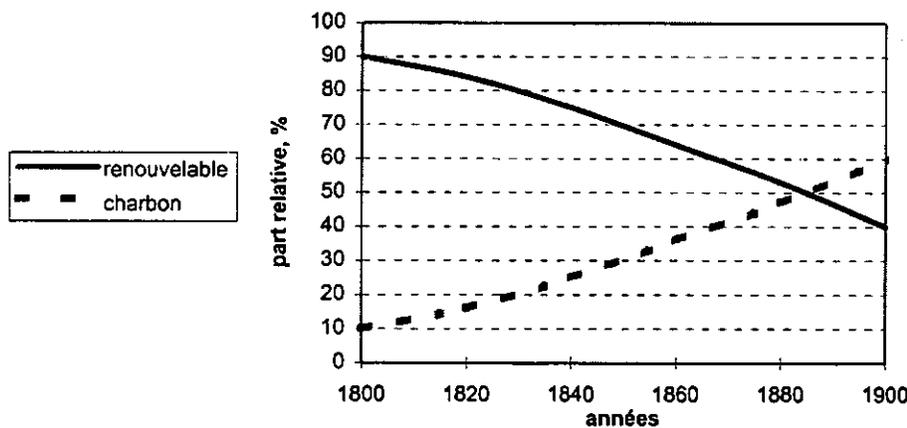


Figure 1 : Evolution des différentes ressources énergétiques mondiales entre 1800 et 1900 (d'après [2])

Parmi les moteurs de cette révolution (voir références [1] et [2] par exemple), on peut citer:

- l'augmentation du prix du bois, due à sa raréfaction,
- la lente amélioration des transports terrestres,

- l'accumulation du capital qui a permis les lourds investissements nécessaires à l'exploitation de mines de plus en plus profondes,
- l'accès à de nouvelles techniques et le développement des connaissances comme la thermodynamique, qui ont abouti à la mise au point des machines à vapeur puis des génératrices. Cette nouvelle filière énergétique a permis de s'affranchir de la saturation des sites propres à l'exploitation de la force hydraulique.

3 Les énergies renouvelables aujourd'hui : des filières anciennes rajeunies.

3.1 Tableau général

En cette fin de siècle, les énergies renouvelables constituent une part non négligeable de la consommation énergétique mondiale, équivalente à 13% du total, supérieure à ce que aurait pu laisser penser l'évolution de la production du XIX^{ème} siècle. Les agents énergétiques se répartissent de la façon suivante (table 2) :

Agents	électricité	autre	total	
Fossiles	19%	63%	82%	
			28%	charbon
			36%	pétrole
			18%	gaz
Nucléaire*	5%	-	5%	
Hydroélectrique*	7%	-	7%	
Biomasse**	-	6%	6%	
TOTAL	31%	69%	100%	

* la part de l'électricité a été "valorisée", c'est à dire ramenée à l'énergie thermique qu'il aurait fallu pour la produire dans une centrale classique. Le facteur multiplicatif est 2.5, ce qui correspond à un rendement de conversion de 40%.

** la part de la biomasse, essentielle dans de nombreux pays du sud, est souvent écartée des statistiques officielles car celles ci ne prennent en compte que les énergies liées à des flux financiers, aisément comptabilisés.

Table 2 : répartition des ressources énergétiques mondiales, d'après [3].

Ces chiffres amènent quelques remarques générales:

- les énergies fossiles fournissent plus de 80% de l'énergie,
- le nucléaire joue un rôle plus faible qu'on ne le pense généralement dans l'approvisionnement énergétique mondial,
- l'hydroélectrique et la biomasse (à condition d'en tenir compte...) sont les seules ressources renouvelables qui contribuent de façon significative aux besoins humains.

L'utilisation intensive des énergies non renouvelables ont plusieurs conséquences fâcheuses:

- la raréfaction progressive programmée de ces ressources, en particulier du pétrole et du gaz. On estime qu'avant le milieu du siècle prochain, les derniers gisements importants de pétrole conventionnel seront concentrés au Moyen Orient, ceux du gaz en Russie et au Moyen Orient. On imagine sans peine les tensions internationales que cela risque de provoquer. D'autres ressources pourront être mobilisées (offshore profond, Arctique, sables asphaltique, schistes bitumineux), mais à quel coût économique et écologique? Le charbon est plus abondant et mieux distribué géographiquement, mais, en tant que solide, il est moins pratique d'emploi (extraction et transport). Quant aux réserves d'uranium, elles sont mal connues mais sans doute limitées si on les utilise dans les réacteurs actuels.
- des risques environnementaux majeurs : amplification de l'effet de serre due à l'utilisation des combustibles fossiles et réchauffement du globe qui pourrait suivre, risque de pollution radioactive locale ou même globale si on veut faire jouer à l'énergie nucléaire un rôle beaucoup plus important avec les technologies et la gestion des déchets actuelle, pollution de l'air en zones urbaines mettant en cause la santé, pollution des mers par les hydrocarbures,...

La disponibilité en énergie facile à utiliser et bon marché qui prévaut actuellement ne durera pas éternellement. Il faudra donc se tourner tôt ou tard vers des énergies plus difficiles à mettre en œuvre et donc plus chères. Dans cette situation, beaucoup s'accordent pour considérer les énergies renouvelables comme la solution idéale. Regardons de plus près leur situation.

3.2 Les filières transformant les énergies renouvelables en énergie utile

Elles couvrent environ 13% des besoins énergétiques mondiaux, le taux étant très variable d'un pays à l'autre. En Europe², la couverture n'est que de 5.4% : elle se situe entre 24% pour l'Autriche ou la Suède et 0.6% pour le Royaume Uni. La Suisse est dans le peloton de tête avec 16%. Point important à souligner : cette part n'était que de 5% en 1990, ce qui représente une augmentation relative de 8% en 4 années. Il semble donc qu'on assiste à une inversion de tendance : après avoir déclinée depuis le début du XIX^{ème} siècle, l'importance relative des énergies renouvelables augmente.

Sur la dizaine de filières recensées (ref. [4] par exemple), ce sont les deux plus anciennes qui constituent la quasi totalité de la production renouvelable:

- hydraulique : les moulins ont totalement disparu et la force de l'eau est utilisée aujourd'hui pour produire de l'électricité qui peut être facilement transportée et distribuée grâce au développement du réseau électrique. Le taux d'équipement de l'hydroélectricité est très variable d'un continent à l'autre : très élevé en Europe (80%), moyen en Amérique du Nord (50%) et faible en Amérique latine, Afrique et Asie (<30%), qui possèdent un potentiel énorme. L'impact sur l'environnement que peut avoir de grands barrages, comme Assouan en Egypte ou le futur barrage des 3 Gorges en Chine, peut être important; la mise en œuvre d'installations plus petites (jusqu'aux microcentrales de quelques kW) est nettement plus favorable de ce point de vue.

² Source: Eurostat, cité dans "Energy for the future : renewable sources of energy", Green paper for a community strategy, en circulation, Com(96)576.

- **biomasse** : elle est majoritairement utilisée dans les pays du sud, où elle constitue souvent l'essentiel de la consommation énergétique. Le revenu moyen par habitant est un bon indicateur de son utilisation : en dessous de 300\$ de revenu national par habitant et par année, plus de 90% de l'énergie est fournie par la biomasse, en dessus de 2000\$, la substitution est presque complète (figure 3, issue de [5]).

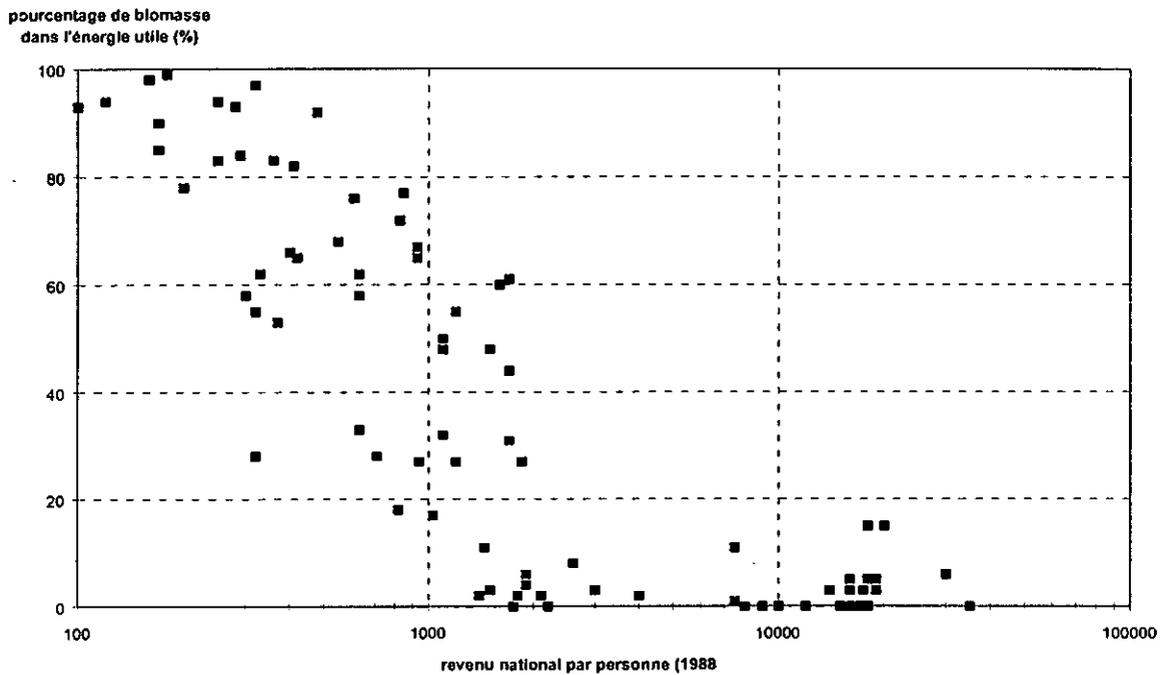


Figure 3. Utilisation de la biomasse et revenu national par habitant, d'après [5].

L'utilisation actuelle de la biomasse est essentiellement prédatrice et doit être radicalement modifiée. Exploitation "raisonnable" de la forêt, développement de cultures énergétiques efficaces et ne concurrençant pas la production alimentaire sont quelques uns des défis à relever pour que le potentiel important de cette filière soit pleinement et durablement exploité, ce qui serait une révolution dans les rapports que l'homme entretient avec la nature

Les autres filières renouvelables ne participent encore que marginalement au bilan global :

- **les éoliennes**, (en Europe, énergie produite équivalente à 1.5% de celle issue de l'hydraulique). Une génératrice permet de transformer en électricité l'énergie mécanique obtenue grâce au vent. Ce n'est pas non plus une filière vraiment nouvelle, mais la technologie a bénéficié des développements de l'aéronautique et atteint des rendements bien supérieurs à celui des anciens moulins à vent. La bonne rentabilité économique des installations situées dans les régions les plus ventées et un volontarisme affiché de certains pays (Danemark, Allemagne, Grande Bretagne,...) expliquent le décollage actuel de cette technologie (près de 4 000 MW installés dans le monde, dont près de la moitié en Europe, en forte progression). Le potentiel de développement est certainement grand dans la mesure où, globalement, le vent existe plutôt près des mers et l'hydroélectrique plutôt au centre des terres. Les problèmes environnementaux sont faibles : gêne occasionnée aux oiseaux, impacts esthétiques et acoustiques (que l'on a résumé par "soit belle et tait toi"). La référence [6] donne un bon aperçu de l'état de la technique.

- la géothermie, qui, en plus de chaleur, fournit à l'heure actuelle une quantité d'électricité équivalente à celle fournie par le vent, est une filière énergétique relativement nouvelle, même si les chinois anciens et les romains utilisaient l'eau chaude naturelle pour leurs bains. La première utilisation pour le chauffage de locaux (incluant des radiateurs) date de 1909, à Reykjavik, seule capitale entièrement chauffée par la géothermie. Il s'agit d'une source d'énergie intéressante dans certains endroits, mais qui ne peut pas être généralisable. Voir ref. [7] pour une revue récente sur ce sujet.
- L'énergie des marées, utilisée depuis longtemps (moulins à marée). La principale unité industrielle existante, l'usine marémotrice de la Rance (F), possède une puissance de 260 MW et fournit de l'électricité depuis une trentaine d'année à un prix intéressant. Malheureusement, les sites propices sont peu nombreux et les conséquences environnementales sont mal connues mais peuvent être importantes selon les sites touchés.
- L'énergie solaire : transformant directement les photons issus du soleil, les 3 filières solaires (solaire thermique, centrales thermodynamique et photovoltaïque) n'apparaissent pas encore dans les statistiques mais, vu leur potentiel élevé, constituent certainement une ressource intéressante pour le futur. Ces filières sont les plus novatrices et sont souvent qualifiées "d'énergies nouvelles", par opposition aux autres filières renouvelables, qui sont plutôt des filières anciennes "rajeunies". Regardons les de plus près.

4 Le soleil, ressource du futur?

L'énergie solaire a le potentiel le plus élevé des énergies renouvelables. Sur les $1.7.10^{11}$ W arrivant en permanence au sommet de l'atmosphère, un peu plus de la moitié atteint le sol, soit environ 10 000 fois la puissance moyenne consommée par l'humanité. Autrement dit, il suffirait de capter cette énergie pendant une heure par année ou pendant 10 secondes par jour pour couvrir l'ensemble de nos besoins. On dispose donc d'une manne d'énergie solaire importante³.

4.1 Les contraintes

Ce rapport énorme entre potentiel et besoins est à prendre avec précaution car pour qu'une énergie puisse être utilisable, elle doit être transformée de telle façon qu'elle puisse faire face aux différentes contraintes techniques, économiques, environnementales et d'acceptabilité sociale.

Les contraintes techniques sont de trois ordres:

³ Ce rapport énorme est indispensable et si l'homme se risquait à consommer une quantité d'énergie importante (autre que solaire), l'effet sur le climat serait immédiat. On peut estimer grossièrement que chaque % d'énergie ajoutée à l'énergie solaire atteignant le sol augmente la température du globe de 0.5K. Actuellement, l'homme utilise une quantité d'énergie non renouvelable de 0.01% de l'énergie solaire incidente, l'effet sur la température du globe est donc d'environ 0.005K. En doublant la consommation énergétique (non renouvelable) tous les 25 ans, il faudrait 2 siècles pour provoquer une augmentation de température de 1K. Ce problème d'auto-échauffement du globe n'est donc pas encore préoccupant mais donne une certaine limite à l'augmentation exponentielle de la consommation.

- **concordance de qualité** : ceci suppose des transformateurs adaptés aux besoins : capteurs thermiques à basse température pour le chauffage ou à plus haute température pour la transformation thermodynamique de la chaleur en électricité, cellules photovoltaïques pour la transformation directe des photons en énergie électrique. Le rayonnement solaire incident est intrinsèquement une source de bonne qualité puisque provenant d'une source thermique à 6000K : le rendement thermodynamique maximum par rapport à la température ambiante se monte à 0.95. Les rendements annuels actuellement observés pour des systèmes commerciaux se situent bien au dessous : environ 50% pour les systèmes thermiques à basse température, 20% pour les centrales héliothermiques et 10% pour les centrales photovoltaïques.
- **concordance de lieu** : le rayonnement solaire est relativement bien réparti sur la terre puisque les lieux les plus avantageés reçoivent environ 2500 kWh/m².an contre un peu moins de 1000 kWh/m².an pour les moins favorisés (Genève : 1250 kWh/m².an). Le problème d'espace se pose différemment dans les zones rurales, où il y a en général assez de place, et dans les zones urbaines, où se peut se poser réellement une question de surface disponible. Dans ce dernier cas, les réseaux de transports d'énergie (électricité, gaz, chaleur) existent et permettent d'alimenter la ville depuis l'extérieur. Il est de toute façon vain de vouloir rendre une ville importante énergétiquement autonome puisqu'elle dépend de toute façon de son entourage géographique pour des besoins aussi vitaux que son oxygène, sa nourriture ou son eau. L'espace nécessaire aux transformateurs solaires n'est pas exagérément important relativement aux autres transformateurs si on tient compte de toute la chaîne, depuis l'extraction jusqu'au traitement des déchets. Ainsi, la production d'un Exajoule d'électricité (288TWh, environ la consommation annuelle d'énergie de la Suisse ou 0.3% de la consommation mondiale) va demander des surfaces au sol très variables selon les technologies (ref [8]):

biomasse :	125 000 à 250 000 km ²
grand barrage:	8 000 à 250 000 km ²
petits barrages:	170 à 17 000 km ²
vent :	300 à 17 000 km ²
photovoltaïque:	1700 à 3300 km ²
centrales solaires :	700 à 3000 km ²
lignite :	7000 km ²
gaz naturel :	200 à 700 km ² .

Les filières renouvelables les plus utilisées aujourd'hui sont les plus extensives, et de plus elles sont liées à d'autres cycles naturels fondamentaux (carbone et eau pour les forêts et les grands barrages). Leur exploitation à grande échelle peut donc poser des problèmes environnementaux, sans que cela d'ailleurs soit une fatalité (voir l'utilisation du potentiel hydraulique des pays de l'arc alpin par exemple).

Les exploitations intensives (solaire mais aussi éolienne) présentent donc des avantages indéniables en permettant d'une part une exploitation de lieux inadaptés pour d'autres activités (déserts, mers,..) et, d'autre part, n'interférant pas avec des cycles naturels

fondamentaux. Un exemple d'interférences malheureuses avec le cycle de l'eau est donné par le catastrophique barrage d'Assouan dans la haute vallée du Nil; pour produire la même quantité d'énergie, il suffirait d'installer aujourd'hui une centrale thermique solaire couvrant une surface d'environ 20 km² (soit une très faible portion de la retenue d'eau actuelle), à des coûts économiques et environnementaux très inférieurs. De même, une étude récente de l'université de Genève sur une installation réelle a également montré que l'on pouvait produire aujourd'hui et en Suisse de l'hydrogène photovoltaïque (énergie solaire stockée) avec un rendement 100 fois supérieur à celui réalisé par le bois [9]. Il ne faut toutefois pas forcément opposer production intensive et extensive, qui peuvent très bien être complémentaires: par exemple, la valeur foncière d'un hectare de prairie du Wyoming est de 100 \$ par année, on pourrait lui faire produire, en plus, pour 25 000\$ d'électricité éolienne [8].

Malgré tout, les surfaces nécessaires ne favorisent pas les énergies renouvelables au point de vue économique. L'énergie solaire ne pourra couvrir à long terme une part importante des besoins mondiaux qu'à condition que ceux-ci restent dans une limite raisonnable. De ce point de vue, l'utilisation rationnelle de l'énergie reste une considération *sine qua non* [4].

- **concordance de temps** : il s'agit de toute évidence d'une question clé pour l'énergie solaire, le déficit fondamental à relever avec celui, très lié, du coût de revient de l'énergie produite. Le stockage temporaire de l'énergie semble à priori la réponse la mieux adaptée, on imagine mal aujourd'hui la demande d'énergie se plier aux caprices du climat. En fait, le besoin de "concordance de temps" entre production et besoins ne deviendra réellement un obstacle que quand la part de ces énergies deviendra importante. Dans un premier temps, les autres sources d'approvisionnement plus souples peuvent s'adapter aux fluctuations de la production renouvelable, comme elles le font déjà pour la couverture de la demande, par essence très variable. Le seuil au dessus duquel il devient difficile de gérer une production fluctuante dépend évidemment beaucoup de la courbe de charge et de l'ensemble du système de production. Si ce taux peut monter, dans le cas de l'électricité, jusqu'à 50% en Californie (pointe de demande due à la climatisation très liée à l'ensoleillement), il est certainement beaucoup plus bas en Europe [8]. Au dessus de ce seuil, il faut soit que les coûts de l'énergie solaire baissent suffisamment pour pouvoir se permettre une baisse de productivité passagère soit stocker l'énergie solaire. Il faut alors distinguer le stockage à court terme (du jour à la nuit), qui ne pose pas de problèmes insurmontables, et le stockage saisonnier, qui est techniquement possible mais économiquement encore très pénalisant, par exemple via la filière hydrogène [10] pour l'électricité ou le stockage souterrain pour la chaleur [14]. En fait, la situation actuelle est bien au deçà de ce seuil partout dans le monde et, avant que les filières solaires puissent produire une quantité d'électricité telle qu'elle pose des problèmes aux compagnies électriques et pour peu que l'on en ait réellement la volonté, il reste assez de temps pour régler ce problème par la mise en œuvre d'une tarification adaptée ou par le développement des techniques de stockage (filière "hydrogène",...).

Au niveau économique, l'énergie solaire n'est pas plus gratuite que le charbon, le pétrole ou l'uranium. Ce n'est pas l'énergie primaire elle-même qui a un coût, ce sont les différentes étapes pour son exploitation : extraction, transformation, transport, stockage, distribution. Ainsi, le coût d'un kWh solaire produit pour chauffer de l'eau comporte le prix de l'extraction

(collecteurs solaires), du transport (pompes, tuyauteries, électricité), du stockage (ballon solaire)⁴. Ceci étant dit, trois contraintes économiques se posent à l'énergie solaire:

- un lourd investissement initial, du, d'une part, à l'état de la technique actuelle qui doit encore s'améliorer et, d'autre part, à l'obligation d'assurer tout le financement de la chaîne en une seule étape (depuis l'extraction jusqu'à la distribution), ce qui n'est pas le cas de transformateurs utilisant des énergies primaires déjà extraites et continuellement disponibles sur le marché comme le pétrole ou le gaz.
- l'obligation dans de nombreuses applications décentralisées d'installer un auxiliaire ou un stockage pour parer à la variabilité de la ressource solaire.
- peu de facteur d'échelle pour la réduction du prix des systèmes, du fait que la captation d'énergie solaire est par essence "plane"; c'est à dire à deux dimensions, contrairement aux transformateurs opérant avec des combustibles qui travaillent "en volume". La seule baisse importante de coût à attendre est celle liée à la quantité totale produite via la courbe d'apprentissage. Ceci est particulièrement vrai pour le photovoltaïque, où les panneaux eux-mêmes constituent une part importante du coût; il y a donc moins d'intérêt à construire des grosses unités pour diminuer sensiblement le prix de revient de l'unité énergétique.

L'impact environnemental des différentes filières solaires est faible et surtout d'ordre esthétique. Les émissions ne sont présentes qu'à la fabrication des installations elles-mêmes (investissement environnemental initial) et inexistantes lors du fonctionnement. On peut donc affirmer que toute substitution d'une énergie traditionnelle par de l'énergie solaire, pour autant qu'on atteigne une certaine efficacité, est un gain environnemental dans le sens où on pollue moins.

L'acceptabilité sociale du solaire est sujette à discussion. Si tout le monde est d'accord sur l'avantage qu'il y aurait à utiliser un maximum d'énergie solaire, on trouve plus de sceptiques quand il s'agit de défendre des applications pratiques. La méfiance vis à vis de sa fiabilité a pour origine des défauts de jeunesse et l'idée fautive selon laquelle il s'agit d'une technologie facile. Il est effectivement possible de bricoler le solaire pour son plaisir, il est par contre plus difficile de livrer "clé en main" et avec garantie de résultats une installation solaire performante. Ceci nécessite du personnel compétent, qu'il convient donc de former (ingénieurs, chauffagistes, électriciens,..). Le problème d'acceptabilité sociale est cruciale dans les applications de ces techniques dans le sud.

⁴ En fait, l'énergie solaire transforme l'utilisateur en (auto)producteur avec tous les problèmes que cela pose (gestion de la puissance de pointe, suivi à long terme, calcul en terme de production d'énergie et non pas en terme de m² installé,..). Un côté positif est la prise de conscience par l'utilisateur des problèmes liés à la production et à la distribution de l'énergie.

4.2 Les filières

4.2.1 Le solaire thermique

Il s'agit de l'utilisation la plus ancienne et la plus aisée, dont on considérera 3 applications :

- l'eau chaude sanitaire (température demandée de 20 à 50°C, toute l'année)
- l'eau chaude industrielle (température demandée > 80°C, toute l'année)
- le chauffage des bâtiments (température demandée 20°C, en hiver et dans les zones tempérées ou froides).

l'eau chaude sanitaire

Un système actif, comprenant capteurs solaires, pompes, tuyauteries, régulation électronique, etc. permet d'extraire et d'utiliser l'énergie thermique issue du rayonnement solaire. Il s'agit d'une application assez ancienne puisque le capteur solaire proprement dit a été inventé par De Saussure (1740 - 1790) pour mesurer le flux solaire incident. Les capteurs solaires utilisés aujourd'hui ne sont guère différents. Une plaque noircie transforme le rayonnement solaire en chaleur, qui est évacuée par un fluide, en général de l'eau. Cette plaque est plus ou moins isolée de l'air extérieur selon la température à atteindre. On trouve actuellement des fabricants dans tous les pays du monde pour des produits de qualité et de prix très divers.

Pratiquement tous les problèmes techniques liés à cette utilisation du solaire ont été résolus; on dispose d'outils de dimensionnement ayant fait leur preuve, des professionnels compétents existent. La possibilité la plus intéressante sous nos latitudes a été cernée : le préchauffage de l'eau chaude sanitaire dans des immeubles collectifs d'au moins une dizaine de logements et à raison d'environ 0,5 m² à 1m² de collecteur par habitant, couvrant entre 33 et 50 % des besoins d'énergie pour l'eau chaude domestique d'un européen moyen. Chaque mètre carré économise environ 80 litres de mazout par an et a un rendement énergétique situé entre 35 et 50%. Et pourtant, cette possibilité simple d'utilisation du solaire est encore peu usitée. Outre les problèmes économiques (on sait faire du kWh solaire - chaleur au même prix que le kWh électrique, soit 3 fois plus cher que le kWh mazout), il faut mettre en avant 2 raisons :

- l'inadaptation de l'organisation des métiers du bâtiment à la construction de projets de production d'énergie,
- la difficulté pour le propriétaire de reporter les investissements réalisés sur les charges : l'économie est donc réalisée par le locataire alors que c'est le propriétaire qui a investi. Les constructions de systèmes solaires de préchauffage se font donc essentiellement sur des petits bâtiments privés, alors que ce sont les grands ensembles qui représentent le plus d'intérêts grâce au facteur d'échelle qui diminue un peu le prix et à une demande plus régulière qui augmente la productivité. Il n'est pas étonnant que les pays disposant de nombreuses installations de ce type soient les pays ensoleillés (Chypre, Grèce,..) et ceux possédant une structure d'habitat à dominante individuelle (Australie, Etats Unis,..). On peut toutefois noter certains exemples d'installation à grande échelle de préchauffages solaires de l'eau chaude sanitaire sur des bâtiments locatifs, comme le réalise la ville de Genève [11]. Mais ceci est dû essentiellement à une volonté politique affirmée de rationalité énergétique de la part des responsables en place.

l'eau chaude industrielle

Il s'agit de maintenir de l'eau à des températures supérieures à 80°C pour des usages industriels, médicaux ou autres. Pour ce faire, des capteurs solaires plus perfectionnés, donc plus onéreux, doivent être utilisés si l'on veut maintenir un rendement correct pour l'installation (> 25%). Pour cette application "haute" température on utilise généralement des capteurs évacués, c'est à dire dont l'isolation est réalisée par un vide poussé (dit secondaire). Leur température maximum de travail est 300°C.

Plusieurs expériences pilotes ont été bien suivies de part le monde, notamment en Suisse, et les conclusions obtenues sont les suivantes [12] :

- Les collecteurs solaires nécessaires existent commercialement et sont techniquement au point. Des installations travaillant à plus de 80°C été comme hiver dépassent le seuil des 30% de rendement.
- Les coûts sont encore trop élevés pour pouvoir espérer faire décoller le marché. Mais d'autre part il faudrait un marché minimum pour pouvoir accéder à la baisse des coûts résultant d'une production de masse. Le cercle vicieux dure depuis 10 ans et aucune amélioration n'est en vue.
- Une surveillance minimum des installations est nécessaire. Faute de quoi, des pannes surviennent par manque d'entretien et donnent une mauvaise image à la technologie. Un effort dans le sens d'une augmentation de la fiabilité est à réaliser et ne s'acquiert qu'en expérimentant. Il faudrait développer un service d'entretien organisé et bon marché; comme c'est le cas pour les installations de chauffage domestique par exemple.

le chauffage des bâtiments

Un bâtiment moyen en Suisse est chauffé à raison d'environ 10% par le soleil. On peut monter cette part à 20 - 30 % en utilisant mieux le rayonnement solaire à disposition. Certaines maisons du plateau suisse sont même uniquement alimentées par l'énergie solaire (y compris l'électricité). Il y a donc de belles perspectives pour ce qu'on appelle l'architecture bio-climatique [13].

Une des plus belles découvertes de l'homme est à la base de l'utilisation passive du rayonnement solaire : le verre. Grâce à ses propriétés optiques, ce matériau réalise l'effet de serre et reste aujourd'hui extrêmement intéressant aussi bien pour l'éclairage que pour le chauffage. De nombreux systèmes passifs de captation solaire ont été expérimentés et sont basés sur les 3 principes suivants : capter, stocker et restituer (serre, véranda, atrium, double peau, mur trombe,...).

Les systèmes actifs, identiques à ceux utilisés pour l'eau chaude, sont peu adaptés au chauffage des bâtiments sous nos climats à hiver peu ensoleillé et un investissement dans les économies d'énergie est souvent préférable. On peut toutefois les utiliser pour certains cas précis : climats méditerranéens ou montagnards, couplage avec une utilisation estivale (piscine,...), stockage saisonnier,....

L'utilisation d'un stockage saisonnier de la chaleur demande de gros investissements, qui ne sont raisonnables que si la taille du stockage est suffisante pour limiter les pertes thermiques relativement à la quantité de chaleur stockée. La capacité thermique minimum requise va dépendre de la qualité de l'isolation. Pour les stocks peu ou pas isolés, elle est environ 50

GJ/K, soit 20 000 m³ de terre ou 10 000 m³ d'eau [14]. Des stocks plus petits demandent une isolation très poussée dont le volume peut atteindre le volume de stockage actif.

En Suisse, 11 installations ont été recensées depuis 1973 et cinq nouveaux projets sont en préparation. Le leader mondial reste sans conteste la Suède.

Les freins au développement de cette technologie sont les suivants :

- chaque site est spécifique et nécessite une étude (pas de système clef en main)
- les investissements sont élevés et le coût de l'énergie non compétitif,
- le faible développement des réseaux de chauffage à distance. Or ce sont justement les grandes installations qui sont les plus intéressantes,
- le stockage saisonnier est encore peu connu.

4.2.2 Les centrales héliothermiques pour la production d'énergie électrique

Dans cette application, le rayonnement solaire est concentré pour obtenir un fluide à haute température permettant d'actionner une turbine couplée à un générateur électrique. Elle n'utilise que le rayonnement direct et ne fonctionne bien que dans les zones très ensoleillées. Les premiers développements connus datent du siècle passé avec la fameuse machine à vapeur de Mouchot à l'exposition universelle de Paris ou les installations d'irrigation en Egypte [15]. Plusieurs centrales solaires ont été expérimentées, principalement aux Etats Unis (déserts californiens), mais une seule méthode s'est avérée commercialement viable, qui est basée sur une faible concentration du rayonnement solaire sur des tubes évacués dans lesquels circulent un fluide caloporteur.

Basées sur ce principe, les 9 centrales de Luz, en Californie, atteignent une puissance totale de 300MWe[16]. Elles produisent de l'électricité pour 300 000 personnes à un prix compétitif (environ 12 cents le kWh) puisque vendue aux heures de pointe. Ses promoteurs prétendent pouvoir fournir de l'électricité solaire bon marché, en utilisant de préférence le désert et, comme on l'a déjà vu, ne consommant pas plus d'espace que les autres techniques de production. Beaucoup de pays du sud pourraient être intéressés pour alimenter les réseaux électriques présentant une forte pointe de demande aux heures les plus ensoleillées (refroidissement). Par contre, ce type de centrales n'a que peu d'avenir en Suisse (climat non adapté, sauf éventuellement en région alpine) et n'a aucune utilité pour les habitants des régions privées de réseau électrique. De nombreux projets sont en étude et concernent des pays aussi variés que l'Inde, le Maroc, la Tunisie ou l'Australie.

4.2.3 La filière photovoltaïque

Il s'agit de la voie royale pour le solaire : l'énergie solaire se transforme directement en électricité à l'intérieur d'un matériau. Il n'y a ni usure (aucune pièce en mouvement), ni entretien, ni fluide, ni fumée.

Le principe de l'énergie photovoltaïque est le suivant : à l'intérieur de certains matériaux, la lumière absorbée est capable de mettre en mouvement les électrons qui s'y trouvent, créant ainsi un courant électrique utilisable. Les semis-conducteurs sont un milieu favorable, sous forme monocristalline, polycristalline ou amorphe. D'autres matériaux plus complexes sont actuellement en développement, comme les films semi-conducteurs nanocristallins colorés de

Grätzel (EPFL) [17]. Toutes ces cellules produisent un courant électrique proportionnel à la lumière incidente et à un potentiel à peu près constant (1/2 à 1 volt par cellule). Le groupement de cellules en panneaux et de panneaux entre eux permet de générer courants et tensions continus aux valeurs désirées.

Pour les petits systèmes isolés, indépendants et autonomes, les panneaux doivent être couplés à des batteries permettant le stockage de l'énergie et auxquelles se raccorde l'utilisateur. Ce type de systèmes est de plus en plus employé dans les zones isolées, dans les pays du nord comme dans les pays du sud. Ils délivrent en fait plus des prestations (éclairage, frigo,..) que du kWh. Ils apporteront sans doute beaucoup à l'amélioration des conditions de vie des habitants du sud sans que cela soit réellement visible sur les statistiques : l'énergie produite n'est pas vendue mais utilisée directement par le propriétaire du système. On estime à près de 2 milliards le nombre de personnes non encore connectées à un réseau électrique et la plupart ne le seront sans doute pas dans l'immédiat [4,5]. Couvrir quelques besoins élémentaires de cette population (éclairage, radio,..) par des minicentrales solaires décentralisées, individuelles ou collectives, est couramment réalisé. La généralisation de cette pratique à l'ensemble des besoins, à raison de 10Wp⁵ par personne, porterait la demande de panneaux à 20 GWp (200km², surface égale à deux fois la production annuelle allemande de verre plat [10]). Cette demande potentielle représente 250 fois la production annuelle mondiale actuelle et constitue un marché estimé à 100 milliards de francs suisses⁶. En plus de l'amélioration du niveau de vie des plus démunis et de la lutte contre l'exode rural, un tel scénario rendrait possible le décollage de la filière, dont le volume de production permettrait alors une baisse sensible du matériel, rapprochant le prix de revient du kWh photovoltaïque des pays du nord au prix de revient des sources non renouvelables que l'on trouve sur le réseau.

Une autre possibilité est de coupler directement les panneaux sur le réseau électrique par le biais d'un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif. Un ou plusieurs utilisateurs peuvent se connecter entre l'onduleur et le réseau. Un comptage électrique est alors réalisé sur les flux entrant et sortant. La Suisse a été longtemps un des leaders dans le développement de ces systèmes, le Japon puis les Etats-Unis ont annoncé des programmes ambitieux dans le domaine des "toits solaires" [8].

La puissance des centrales photovoltaïques est modulable depuis quelques watts jusqu'à quelques MW ou plus. Des projets grandioses de production d'hydrogène photovoltaïque au Sahara ont été décrits [10] et consistent en des centrales de très grande puissance (30 GWp) transformant l'énergie solaire en électricité puis en hydrogène, qui serait alors distribué vers l'Europe via des pipelines.

Le prix de l'énergie photovoltaïque est encore élevé; un ordre de grandeur supérieur à celui du marché actuel. Si on considère une baisse du prix de l'unité électrique photovoltaïque produite de 50% tous les 10 ans, ce qui a été grossièrement observé ces 2 dernières décennies, il

⁵ Le Wp (watt pointe) correspond à une puissance électrique délivrée de 1W dans des conditions normalisées : ensoleillement de 1000W/m² (plein soleil) et température de panneaux de 25°C. En une année, il faut compter l'équivalent d'environ 1000 heures de fonctionnement normalisé pour nos contrées et jusqu'à 2500 heures pour les régions les plus favorisées (déserts tropicaux).

⁶ Cette somme peut paraître à première vue importante, mais elle représente moins de 10% des budgets militaires mondiaux pour une année et le quart de la somme nécessaire à la neutralisation de l'ensemble des mines antipersonnelles [21]. Il ne s'agit donc pas d'un problème de ressources mais d'allocation des ressources.

faudrait attendre une trentaine d'années pour que l'électricité photovoltaïque vendue en réseau soit commercialement rentable; en plus de ses autres qualités.

4.3 Vers la chasse aux photons extra-terrestres?

Plusieurs projets proposent de capter l'énergie solaire extra-terrestre grâce à de vastes stations photovoltaïques orbitales ou posées sur la lune, qui transformeraient cette énergie sous forme de micro-ondes [18, 19]. Des centrales sur terre réceptionneraient et distribueraient l'énergie électrique ainsi produite. Une récente étude [20] tente de démontrer la viabilité économique et environnementale de tels systèmes. Malheureusement, la démonstration se fait à partir d'une situation hypothétique en l'an 2100 de 20 milliards d'individus consommant comme un américain d'aujourd'hui, ce qui représente une multiplication de la consommation actuelle par 11.7. En étendant ce raisonnement aux autres ressources (régime alimentaire américain pour tous, consommation d'eau,...), l'avenir de l'humanité devient bien sombre.

Bien sur, on peut faire des objections sérieuses sur la crédibilité économique et technique de telles opérations et se demander si, en fin de compte, le bilan énergétique global (en tenant compte de l'énergie investie dans le matériel et les mises sur orbite) ne serait pas négatif. Pourtant, ces études ont le mérite de démontrer que, uniquement dans le cas de l'approvisionnement énergétique, les limites du globe peuvent être dépassées avec les techniques d'aujourd'hui : il serait ainsi possible de puiser dans des ressources extra-terrestres renouvelables quasi infinies à l'échelle de l'homme. Ce qui contredit le mode de pensée géocentrique qui domine actuellement (la planète est limitée) et ouvre une voie vers un nouvel héliocentrisme. Illusion ou, c'est le cas de le dire, perspective "révolutionnaire" ?

5 Conclusion

Ce petit tour des spécificités des énergies renouvelables a fait apparaître 6 points importants pour bien appréhender le rôle qu'elles pourront jouer dans le futur.

1. La part des énergies renouvelables dans la couverture des besoins humains a atteint son minimum et a maintenant tendance à croître. Il s'agit sans doute d'une tendance lourde, qui a pour origine l'amélioration technique des différentes filières concernées et les problèmes environnementaux liés à l'utilisation des autres ressources. Curieusement, grâce à son abondance, le charbon suit aussi la même voie puisque, après avoir baissé depuis le milieu de ce siècle, sa contribution augmentera très certainement dans l'avenir.
2. L'utilisation énergétique de la biomasse constitue encore le pilier des énergies renouvelables, principalement au sud. Toutefois, l'homme a à son égard un comportement essentiellement de prédateur qui doit être radicalement modifié pour qu'elle mérite véritablement son qualificatif de "renouvelable".
3. Les filières très anciennes, datant de l'antiquité (hydraulique et éolienne), ont pleinement bénéficié d'avancés techniques (turbines, aéronautique...) et constituent encore des technologies sur lesquelles il faut compter. Leur renouveau doit à la fois au développement des réseaux électriques et au développement d'applications décentralisées permettant de fournir de l'électricité à des zones isolées du réseau.
4. A plus long terme, seule la transformation directe du rayonnement solaire (photons) en énergie utile a la capacité quantitative de se substituer aux énergies fossiles, à condition que la demande en énergie se stabilise grâce à une utilisation plus rationnelle. Le

rayonnement solaire constitue une ressource 10 000 fois supérieure à la consommation mondiale d'énergie, répartie assez régulièrement à la surface de la terre quand on le compare aux autres ressources. Des différentes filières possibles, le photovoltaïque semble être le meilleur candidat à long terme. Il constitue également la seule filière réellement nouvelle et en pleine évolution, où le potentiel de nouveautés technologiques est immense. Les possibilités d'un développement rapide sont réelles mais soumises à des contraintes économiques difficiles.

5. Il ne faut pas opposer production centralisée et production décentralisée, qui sont complémentaires. Un point de vue souvent rencontré veut qu'on oppose ces deux possibilités. Ne vaut-il pas mieux renoncer à de tels schémas, souvent purement idéologiques, et saisir toutes les opportunités de développement des énergies renouvelables: la première forme fournit des kWh à un réseau tandis que la deuxième fournit soit directement des prestations dans des zones isolées, soit soulage le réseau existant.
6. La poursuite du développement des énergies renouvelables suppose une vision à long terme et une action volontariste, comme le montre clairement le succès de la filière "éolienne". Un rôle critique est tenu par les pouvoirs publics et par les grandes sociétés énergétiques, en pleines évolutions actuellement (mondialisation de l'économie, affaiblissement du rôle de l'état, libéralisation des marchés de l'électricité et du gaz,...). Une attention particulière sera nécessaire pour que la réglementation qui va être mise en place à l'occasion de la libéralisation des marchés énergétiques prennent en compte le nécessaire développement des énergies renouvelables.

Bibliographie

1. Debeir, J.P: Deléage, D. Hémerly, "Les servitudes de la puissance. Une histoire de l'énergie", Flammarion, 1986.
2. Chevalier, P. Barbet, L. Benzoni, "Economie de l'énergie", Presse de la fondation nationale des sciences politiques & Dalloz, 1986.
3. Pharabot, "Atlas mondial de l'énergie", Editech, 1989.
4. Dessus, " Atlas des énergies pour un monde viable", Syros, Paris, 1994.
5. Barnes, W.M. Floor, "Rural energy in developing countries : a challenge for economic development", Annual review of energy and the environment, Vol. 21, 1996, pp. 497-530.
6. "Eolienne : la croissance", Systèmes Solaires, N°110, Novembre-décembre 1995.
7. Barbier, "Nature and technology of geothermal energy. A review", Renewable & Sustainable Energy Review, Vol. 1, N°1, March-June 1997, pp. 1-67.
8. Flavin, "Domestiquer le soleil et le vent", L'Etat de la Planète 1995/1996, pp. 87-113, La Découverte.
9. Hollmuller, Cuepe, 19 av. de la Jonction, 1205 Genève, communication privée.
10. Winter, J. Nitsch, "Hydrogen as an energy carrier", Springer-Verlag, 1988.
11. Macherel, G. Krebs, "Installations solaires de préchauffage de l'eau chaude sanitaire", Cahiers du service du chauffage de la ville de Genève, n°3, 1990.

12. Hurdes, B. Lachal, "Industrial solar heat", Delta energy, CH-8197 Rafz, 1986.
13. Weber, "Données interactives d'architectures solaires DIAS", logiciel, Cuepe, CH-1205 Genève.
14. Pahud, "Analyse énergétique de l'immeuble industriel Marcinhès à Meyrin", thèse n° 2645, Université de Genève, 1993.
15. Crober, "En captant la chaleur solaire, nous pourrions nous passer de charbon", La Science et la Vie, Tome V, avril-juin 1914.
16. Dracker, P. De laquil III, "Progress commercializing solar-electricity power systems", Annual review of energy and the environment, Vol. 21, 1996, pp. 371-402.
17. Bonhote, M. Graetzel, " Développement d'un nouveau type de cellules solaires basées sur des films semi-conducteurs nano-cristallins", Stratégies Energétiques Biosphère & Société, 1995, pp. 61-68.
18. Numéro spécial "Wireless power transmission", Solar Energy, vol. 56, N°1, 1996, pp. 1-131.
19. "Prospective XXI^e siècle", Systèmes Solaires, N°67/68, Mars-avril 1991.
20. Criswell, R.G. Thompson, "Data envelopment analysis of space and terrestrially-based large scale commercial power systems for earth : a prototype analysis of their economic advantages", Solar Energy, vol. 56, N°1, 1996, pp. 119-131.
21. Renner, "Le budget du désarmement", L'Etat de la Planète 1995/1996, pp. 224-250, La Découverte.

La contribution potentielle des énergies renouvelables au développement durable

Bernard Chabot

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)

500 route des Lucioles, F - 06560 Valbonne

e-mail: chabot@ademe.fr

Un recours plus important aux énergies renouvelables est une des conditions nécessaires pour prendre le chemin d'un développement durable, du fait de leurs avantages pour résoudre les problèmes d'énergie, d'environnement et de développement économique et social [1]:

Les énergies renouvelables sont basées sur l'exploitation de flux naturels d'énergie: rayonnement solaire, cycle de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère, flux de chaleur interne de la terre, effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans. Ce sont donc des énergies inépuisables, à l'inverse des énergies fossiles et minières (charbon, pétrole, gaz naturel, uranium) dont l'accès aux réserves à faibles coûts, par nature limitées et souvent mal réparties, accentue les tensions géopolitiques présentes et surtout à venir.

Elles n'émettent pas de gaz à effet de serre (y compris dans le cas d'une exploitation rationnelle de la biomasse, où le rapport émission/fixation de carbone peut être quasiment équilibré). Leur substitution aux énergies fossiles carbonées réduit donc le risque de réchauffement climatique. Leur impact sur l'environnement local est par ailleurs limité, jamais irréversible et toujours limité à la période d'exploitation du fait de l'absence de problèmes particuliers de démantèlement et de gestion de déchets toxiques et de longue durée de vie. Enfin les précautions, les règles de l'art et les solutions techniques qui permettent de limiter leur impact sur l'environnement local sont bien connues et facilement intégrables dans les règlements et procédures d'autorisation des projets.

Les énergies renouvelables permettent de produire une grande diversité de produits et de vecteurs énergétiques: énergie thermique, combustibles solides, liquides et gazeux, électricité. Cette diversité d'applications leur permet de pénétrer le marché des produits et des services énergétiques de tous les secteurs économiques: agriculture, industrie, habitat et tertiaire, transports.

Cette diversité d'applications ainsi que la complémentarité des gisements (soleil, vent, eau, biomasse...) et leur bonne répartition de par le monde permet une utilisation décentralisée des énergies renouvelables, à la fois spatialement et au niveau des décideurs et des utilisateurs: familles, villages, cités, entreprises, régions et pays, que ces derniers soient industrialisés ou en développement. La valorisation de cette production décentralisée peut se faire par le biais de réseaux existants: réseaux d'électricité, de gaz, de chaleur, de transport et de commercialisation de combustibles. Mais l'utilisation décentralisée des énergies renouvelables permet aussi et surtout d'apporter le minimum de services énergétiques modernes dans les régions ou les pays en développement où les réseaux conventionnels de distribution d'énergie ne pénétreront pas avant des décennies.

Les techniques requises pour exploiter les énergies renouvelables vont des techniques traditionnelles (le bois de feu), à des techniques maîtrisables par tous les pays où des

industries électromécaniques et chimiques sont déjà établies (hydroélectricité, énergie éolienne, capteurs solaires, biocombustibles et biocarburants...) et enfin à des techniques de pointe mais qui ont déjà donné lieu à des transferts de technologies réussis entre pays industrialisés et pays en développement, comme dans le cas de la fabrication locale de cellules et de modules photovoltaïques. Les transferts et l'appropriation des technologies d'énergies renouvelables sont donc possibles entre les pays industrialisés et les pays émergents ou en développement, sans compter les possibilités de coopération "Sud/Sud".

Malgré le fait qu'elles soient basées sur des ressources inépuisables et souvent "gratuites" (soleil, vent...), les énergies renouvelables nécessitent pour être exploitées des ressources en capital, en matières premières et en espace. Dans une optique d'utilisation à grande échelle, leur exploitation rationnelle doit donc se concevoir comme le couronnement d'une démarche globale de maîtrise de l'énergie basée sur les principes suivants:

- La Sobriété énergétique, qui permet de déterminer quels sont les services énergétiques indispensables et de leur affecter prioritairement les ressources disponibles par rapport à ceux qui sont superflus.
- L'efficacité énergétique, qui permet d'assurer ces services énergétiques prioritaires en consommant le moins possible d'énergie primaire (d'origine fossile ou renouvelable). Les solutions techniques correspondantes sont maintenant bien connues, tant du côté de la production d'énergie (par exemple la cogénération) que du côté de sa transformation et de son utilisation (par exemple les lampes à fluorescence qui consomment cinq fois moins d'énergie que les lampes à incandescence). La synergie entre la sobriété énergétique et l'efficacité énergétique débouche sur ce que l'on peut appeler à juste titre l'utilisation rationnelle de l'énergie.
- Le respect de l'environnement, par l'utilisation de ressources énergétiques qui font peser le moins possible de contraintes sur l'environnement local, régional et planétaire et sur les générations futures, soit en épuisant d'ici moins d'un siècle des stocks de ressources naturelles non renouvelables, soit en nécessitant une mobilisation continue pour gérer des déchets à longue durée de vie.

Les énergies renouvelables exploitées rationnellement et équitablement, répondent en particulier à ces principes et à ces critères.

Compte tenu de ces avantages et des progrès techniques et économiques amenés par les programmes de recherche et développement et d'ouverture des marchés consentis depuis les premiers chocs pétroliers, on peut se demander pourquoi la contribution des énergies renouvelables reste inférieure à 20 % des besoins totaux d'énergie primaire mondiaux, soit environ 6 % via l'hydroélectricité (2 300 TWh/an, soit 510 Mtep) et 13 % via la biomasse (1,3 Gtep dont 1,1 Gtep dans les pays en développement, principalement sous forme de "bois de feu"), les autres filières (solaire thermique et photovoltaïque, énergie éolienne, géothermie...) comptant pour encore moins de 1 % malgré des taux de croissance élevés. A cela il y a plusieurs raisons:

La concurrence et la compétitivité des énergies fossiles s'est accrue depuis le contre-choc pétrolier en 1986. De plus, les filières correspondantes ont bénéficié de progrès importants. Par exemple la mise au point et la commercialisation de centrales électriques au gaz naturel utilisant des cycles combinés à haut rendement (plus de 50 %) et de faible coût d'investissement (moins de 4 FRF/W) provoque actuellement une "ruée vers le gaz" de nombreuses compagnies d'électricité de par le monde, au détriment de technologies classiques

n'émettant pas de gaz à effet de serre mais plus gourmandes en investissement initial comme l'hydroélectricité et le nucléaire.

Changer le "paysage énergétique mondial" requiert des générations: il a fallu 100 ans d'investissements massifs à l'hydroélectricité pour dépasser 2 300 TWh par an; après cinquante ans d'investissements encore plus massifs, la contribution mondiale de l'énergie nucléaire (2 200 TWh/an) est limitée à moins de 6 % des besoins totaux d'énergie primaire. Mais c'est justement une raison de plus de ne pas remettre aux lendemains les efforts de diversification vers des sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre !

Les prix des énergies ne tiennent pas compte des "externalités", c'est à dire de la totalité des coûts de chaque filière énergétique pour l'environnement et la santé. Mais il ne faut pas attendre de "miracle" des calculs de ces externalités: leurs valeurs ne peuvent être approchées qu'à la suite d'hypothèses qualitatives (par exemple la valeur donnée à un biotope ou à une vie humaine) et attendre qu'on aboutisse à un consensus sur les externalités dans chaque configuration technique et d'implantation reviendrait à décider de ne rien faire pendant des années. Plus que leur niveau absolu, c'est plutôt le "différentiel d'externalités" entre les énergies renouvelables et les énergies fossiles qui est intéressant à analyser. Comme on le voit en figure 1, il est très en faveur des énergies renouvelables, y compris pour la biomasse valorisée en cogénération. Ainsi, à chaque fois que des taxes ou des incitations ont été mises en place pour donner un signal clair sur l'existence de ce différentiel d'externalités, le résultat a été largement positif pour les énergies renouvelables, comme on le verra plus loin dans le cas de l'énergie éolienne.

La compétitivité économique, est nécessaire mais pas suffisante pour qu'une filière énergétique puisse se développer à grande échelle. Des conditions techniques, réglementaires, législatives et tarifaires adaptées sont aussi indispensables. En particulier, des conditions simples et de faible coût doivent permettre l'accès aux "réseaux" au sens large des filières d'énergies renouvelables décentralisées de petite et moyenne puissance (petites centrales hydroélectriques, aérogénérateurs, toits photovoltaïques...).

Enfin, du fait de l'inertie des marchés de l'énergie et de la position prépondérante des énergies fossiles d'une part et de l'aspect décentralisé des applications les plus courantes des énergies renouvelables, le développement à grande échelle de ces dernières requiert un investissement préalable important pour l'information, la motivation et la formation des millions ou des milliards d'usagers potentiels. Ainsi, la majorité des foyers ruraux des pays en développement utilisant du bois de feu, des lampes à pétrole et des piles jetables verraient leur conditions de vie largement améliorées, souvent sans dépenses cumulées d'investissement et de fonctionnement supplémentaires, si elles s'équipaient en "foyers améliorés" (permettant de diviser par deux ou trois la consommation annuelle de bois) et en petits systèmes photovoltaïques domestiques pour l'éclairage et la radio. Or ces investissements préalables pour l'information et la formation des usagers et des relais techniques et commerciaux locaux ne peuvent pas la plupart du temps être pris en charge par le secteur privé, soit parce que la valeur du produit est trop faible (foyers améliorés artisanaux) soit parce que le marché est encore trop limité pour pouvoir amortir les frais correspondants sur des petites séries (cas des "kits photovoltaïques"). De leur côté, les pouvoirs publics ont à faire face avec des moyens limités au problème global du développement économique de ces zones (agriculture, désenclavement, santé, éducation...) et ils ne peuvent pas toujours accorder toute l'attention nécessaire aux problèmes énergétiques, bien qu'on retrouve une composante "énergie" dans tous les volets du développement cités ci dessus.

Figure 1: Externalités de la production d'électricité en Europe

Source S1: Etude DG XII ExternE, rapport préliminaire, 1995

Autres: "Extension de l'analyse Impact Pathways aux coûts externes des installations de cogénération", ARMINES, 10/96

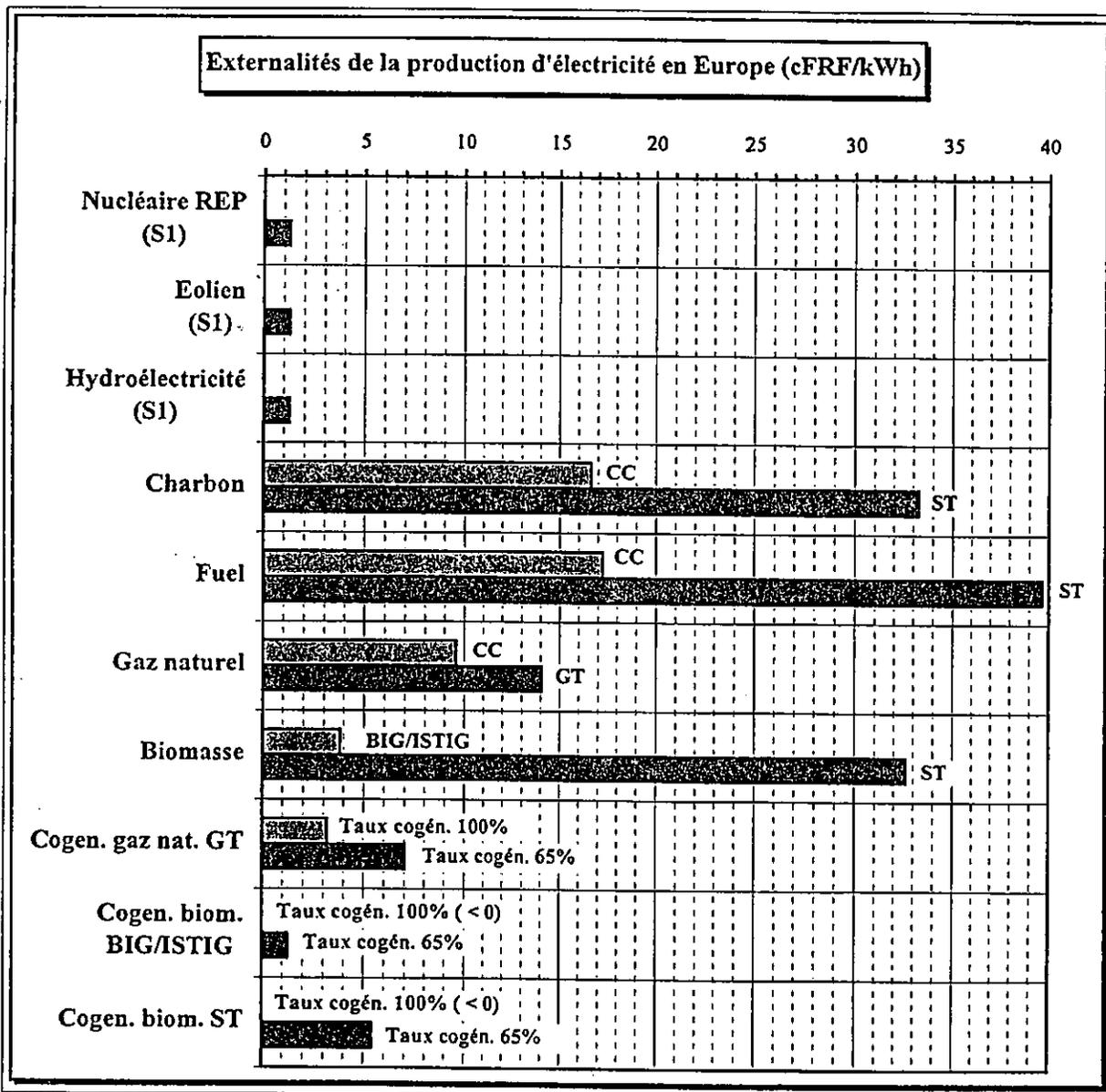
CC: Cycles combinés; ST: turbine à vapeur; GT: turbine à gaz; BIG/ISTIG: biomasse gazéifiée, injection vapeur dans GT

Nota 1: basé sur coût d'une vie humaine de 17 MFRF, appliqué sans prorata du nombre d'années perdues

Nota 2: centrales conformes aux réglementations actuelles

Nota 3: incertitudes élevées, notamment sur valeurs minimales

Taux: 1Euro = 6,4 FRF



Dans les pays industrialisés, ce problème n'est pas non plus négligeable: alors qu'il est relativement aisé à un fournisseur de centrales à cycles combinés de convaincre quelques grandes compagnies d'électricité des avancées et de la fiabilité de sa nouvelle technologie, convaincre un pourcentage suffisant de ménages ou de gestionnaires de bâtiments de l'intérêt des chauffe eaux solaires individuels ou collectifs nécessite un investissement commercial souvent hors de portée de petites et moyennes entreprises du secteur, qui ne pouvant ainsi augmenter leurs séries de production ne peuvent diminuer leurs coûts de façon suffisante.

Tout se passe ainsi comme si l'on était face à un "cercle vicieux": le marché accessible est étroit et insuffisant pour permettre des baisses de coûts par effet de série, et les prix restant élevés, le marché ne décolle pas !

Heureusement, les énergies renouvelables ne sont pas condamnées à cette logique implacable, et on va voir que des solutions existent pour briser ces cercles vicieux et pour "passer à des cercles vertueux", avec pour ces derniers une rétroaction très fortement positive entre l'ouverture des marchés et les baisses de coûts, amplifiée par la possibilité de consacrer plus de fonds propres à la recherche, au développement de nouveaux produits et services et à la promotion commerciale.

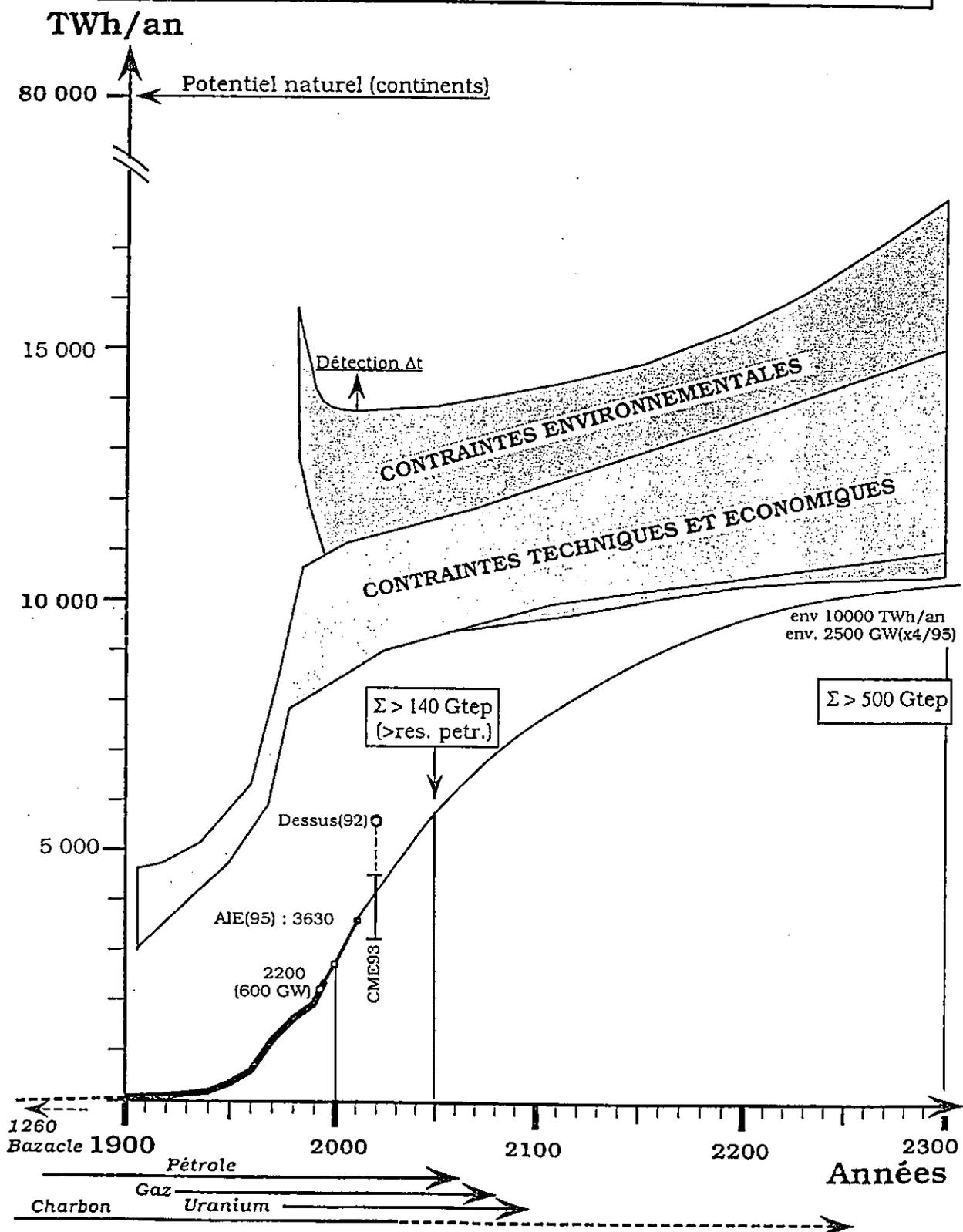
Pour cela, rien ne vaut des exemples de réussites, qui seront pris ici dans le secteur de l'électricité, domaine stratégique puisque concernant la forme la plus noble de l'énergie (pouvant donner accès notamment à l'éclairage, à la force motrice et surtout au traitement et à la transmission de l'information pour l'éducation, la formation, la culture, les loisirs et les activités professionnelles) et faisant partie d'un des secteurs de l'énergie en forte croissance et participant fortement aux émissions de gaz à effet de serre.

L'hydroélectricité à grande et à petite échelle:

Il est souvent de bon ton de faire une différence marquée entre les applications à moyenne et grande puissance de l'hydroélectricité (de quelques dizaines de MW à plusieurs GW) et la petite hydroélectricité (moins de 5 ou moins de 25 MW selon les pays). A l'extrême, seule cette dernière est parfois jugée digne de recevoir la qualification d'énergie renouvelable et de figurer dans les statistiques et les programmes ad-hoc! Cette position est bien sûr absurde, et souvent pas innocente, puisqu'elle permet de "démontrer" que les énergies renouvelables ainsi artificiellement réduites ne fournissent qu'un pourcentage négligeable de l'électricité primaire mondiale, alors que justement, avec l'hydroélectricité elles représentent la première source d'électricité primaire dans le monde. Bien sûr, il n'est pas question de passer sous silence les quelques contre références de grands projets d'hydroélectricité réalisés en leur temps sans apporter une attention suffisante aux problèmes sociaux et d'environnement, mais plutôt de rappeler quelques évidences qui peuvent éclairer et orienter le développement de cette filière au 21ème siècle:

Comme on le voit en figure 2, le développement de l'hydroélectricité est toujours soutenu, et ses perspectives d'utilisation mondiales ne sont pas bornées par le potentiel technique et économique, dont seulement 1/7ème est actuellement exploité. Et surtout, de grands pays consommateurs d'énergie au 21ème siècle (Chine, Indonésie, Brésil, Zaïre...) ont des potentiels énormes et à peine entamés.

Figure 2 L'HYDROELECTRICITE : HISTORIQUE, PISTES POUR LE FUTUR



B. CHABOT - Ademe - Tr 95/30

La démonstration a été faite, notamment par la France et par la Suisse, qu'un pays peut exploiter plus de 90 % de son potentiel hydroélectrique sans problèmes majeurs d'environnement, et au contraire en valorisant et en enrichissant son patrimoine et en permettant une utilisation plus rationnelle de l'eau pour d'autres usages (réduction des crues, irrigation, adductions d'eau, loisirs).

L'évolution des techniques (par exemple les groupes turboalternateurs immergés pour très faibles chutes) permettent des "aménagements doux" des fleuves, en évitant les grands barrages par des dérivations (cas de l'aménagement du Rhône en aval de Lyon), voire sans aucune dérivation et par simple aménagement des rives (centrale sur l'Isère en aval de Grenoble, projets d'aménagement du Rhône en amont du lac Léman).

Les progrès de l'interconnexion des grands réseaux électriques, du transport de l'électricité à grande distance ou de la fabrication, du transport et de l'utilisation de nouveaux vecteurs énergétiques (hydrogène, méthanol...) permettront l'exploitation de "mégagisements" hydroélectriques à un coût du kWh extrêmement faible.

Cette nécessaire remise en perspective du développement global de l'hydroélectricité ne doit bien sûr pas mener à négliger les efforts à consacrer au développement de la petite hydroélectricité (moins de 10 MW). Celle-ci présente en effet des avantages spécifiques, notamment de pouvoir donner lieu à des investissements de plus petite taille, donc plus accessibles aux collectivités locales et présentant des impacts plus faibles sur l'environnement. Un recours accru à cette filière, en particulier dans les pays en développement, présente un intérêt stratégique compte tenu du rôle que les PCH (petites centrales hydroélectriques) peuvent jouer pour l'électrification rurale décentralisée [2]. L'exemple de la Chine est à cet égard tout à fait intéressant à analyser [3].

De 1974 à 1993, le développement de la petite hydroélectricité en Chine a été spectaculaire: la puissance installée est passée de 2,6 à 15 GW (une multiplication par 5,7) et l'énergie produite est passée de 4,87 à 47 TWh par an (une multiplication par pratiquement un facteur 10, traduisant l'amélioration technique des équipements et de l'exploitation). Sur les 48 284 petites centrales hydroélectriques répertoriées en 1993, plus de 85 % sont gérées au niveau des villages. Moins de 8 % du total sont reliées au réseau national interconnecté et les autres alimentent des réseaux locaux (30 %), ou fonctionnent de façon totalement autonome pour électrifier un seul village (30 000 soit 62 %). Cette électrification ne se limite pas à la production d'électricité, mais elle s'est accompagnée d'actions sur l'utilisation sobre et efficace de l'énergie:

- Priorité accordée aux besoins productifs: agriculture (irrigation, moulins...), petites industries et artisanat, de façon à faciliter le "décollage économique" par l'électrification rurale.
- Promotion d'appareils domestiques efficaces, notamment de cuiseurs à riz de faible puissance pour limiter le recours au bois de feu lorsque l'eau est abondante et pour éviter la création de pointes de consommations et mieux valoriser la production en heures creuses.

Par ailleurs, la gestion des programmes correspondants a été largement décentralisée, aussi bien au niveau technique (ateliers de production des équipements, études et réalisations des projets) qu'à celui de la gestion (financements de l'investissement initial, exploitation, tarification et vente du courant, réinvestissement des bénéfices pour d'autres opérations de petite hydroélectricité). De plus, depuis le début des années 90, les promoteurs et les

propriétaires de petites centrales hydroélectriques peuvent être aussi bien des collectivités locales que des coopératives ou des investisseurs privés et tous sont libres de vendre l'électricité au tarif qui leur convient le mieux.

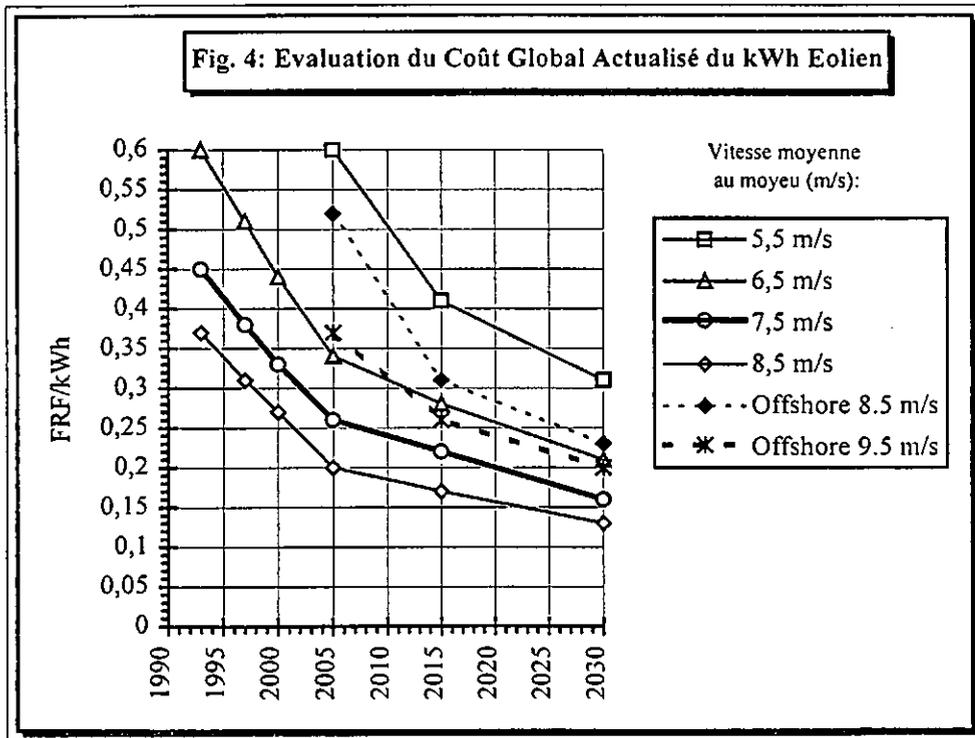
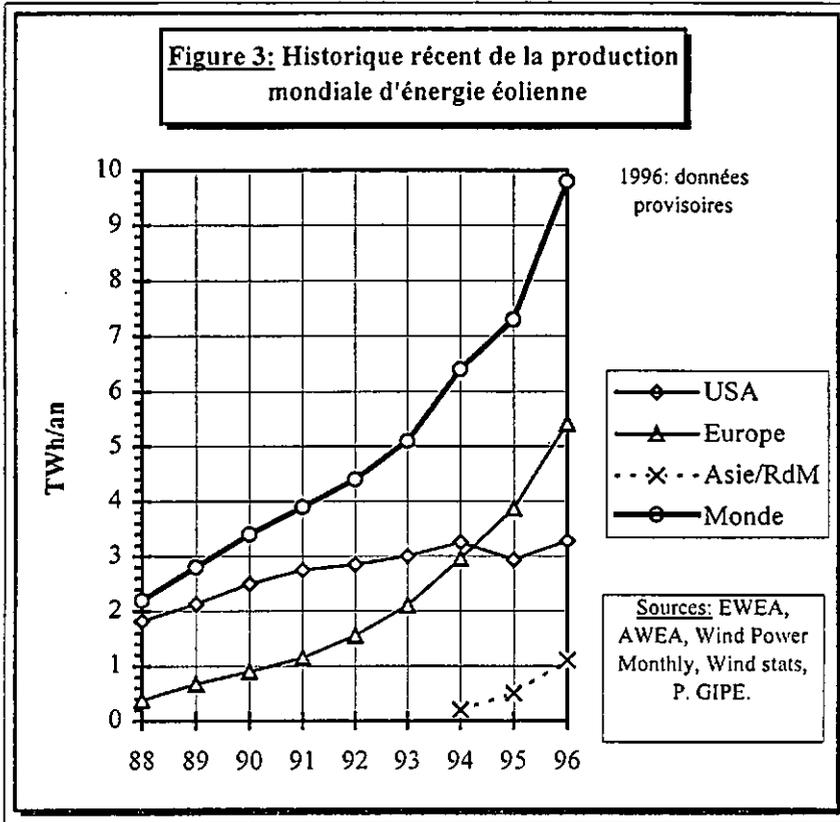
Cette approche décentralisée a ainsi permis d'électrifier plus de 90 millions de personnes depuis 1980. Bien que la décentralisation ait permis de rendre marginale la contribution de l'Etat pour le financement des investissements et de rendre inutile le recours à des financements internationaux, le rôle des pouvoirs publics a été et reste crucial pour fixer les "règles du jeu" et pour prendre en charge l'énorme effort de formation et d'information qui a rendu possible ce succès. Juste retour des choses, le "point focal" de ces actions, le "Hangzhou Regional Center (HRC)" est maintenant reconnu au niveau international et par les Nations Unies comme centre de référence pour la promotion de la petite hydroélectricité.

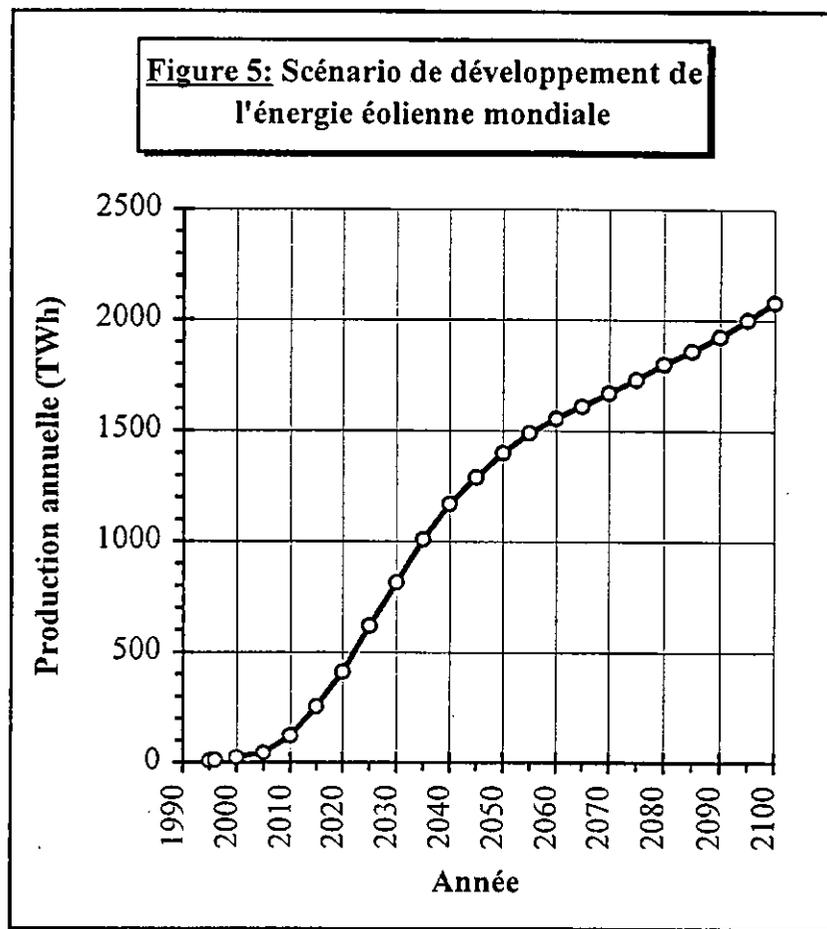
Comme la contribution mondiale de la petite hydroélectricité est de l'ordre de 80 TWh par an alors que le gisement mondial exploitable est de l'ordre d'au moins 500 TWh par an, on voit que le potentiel de contribution de cette forme d'énergie renouvelable à l'électrification et au développement économique et social des zones rurales des pays en développement en est seulement à ses débuts et que d'autres "cercles vertueux" de ce type pourraient et devraient être créés ailleurs.

L'énergie éolienne sur réseaux interconnectés:

Plus encore que les efforts de R&D, c'est l'ouverture volontariste des marchés de Californie (1980/1985), du Danemark (de façon continue depuis 1979) puis notamment d'Allemagne, du royaume Uni, de l'Inde (décennie 90) qui a permis de faire progresser et de valider sur le terrain les performances techniques et économiques des aérogénérateurs qui produisent maintenant plus de 10 TWh par an (cf. figure 3 et [4]). Cette ouverture des marchés s'est d'abord faite sous formes de déductions fiscales et/ou de subventions à l'investissement initial, mais il est devenu clair que la solution la plus simple et la plus efficace, mise en œuvre en particulier au Danemark et en Allemagne, est de fixer le prix de vente du kWh éolien des producteurs indépendants aux compagnies d'électricité à partir des coûts évités pour ces dernières et d'une "prime d'énergie propre et participant au développement local et de l'emploi". Une telle décision requiert bien sûr que l'Etat joue son rôle de régulateur, en prenant en compte le long terme pour définir et mettre en œuvre ses politiques de l'énergie, de l'emploi, du développement industriel et d'aménagement du territoire. Car il est bien évident que le marché est à lui seul incapable de prendre en compte ces exigences de long terme.

En retour de ces tarifs préférentiels, le coût des installations et du kWh éolien a fortement diminué, et les créations d'emplois et d'activités économiques ont été au rendez vous. Ce processus de "cercle vertueux" est loin d'être terminé. L'évaluation des coûts du kWh éolien présentée en figure 4 extraite de [5] montre que pour peu que cette dynamique de développement soit entretenue, l'énergie éolienne sera rapidement une des filières de production d'électricité primaire des plus compétitives. L'énergie éolienne, avec un siècle de décalage, pourrait fort bien suivre la trajectoire du développement de l'hydroélectricité sur les 100 dernières années pour devenir au 21ème siècle l'une des filières majeures de production d'électricité primaire sans émissions de gaz à effet de serre: le scénario de développement correspondant résumé en figure 5 et basé sur ces baisses de coûts et la prise en compte progressive des avantages de l'énergie éolienne pour l'environnement et le développement n'a rien d'irréaliste.





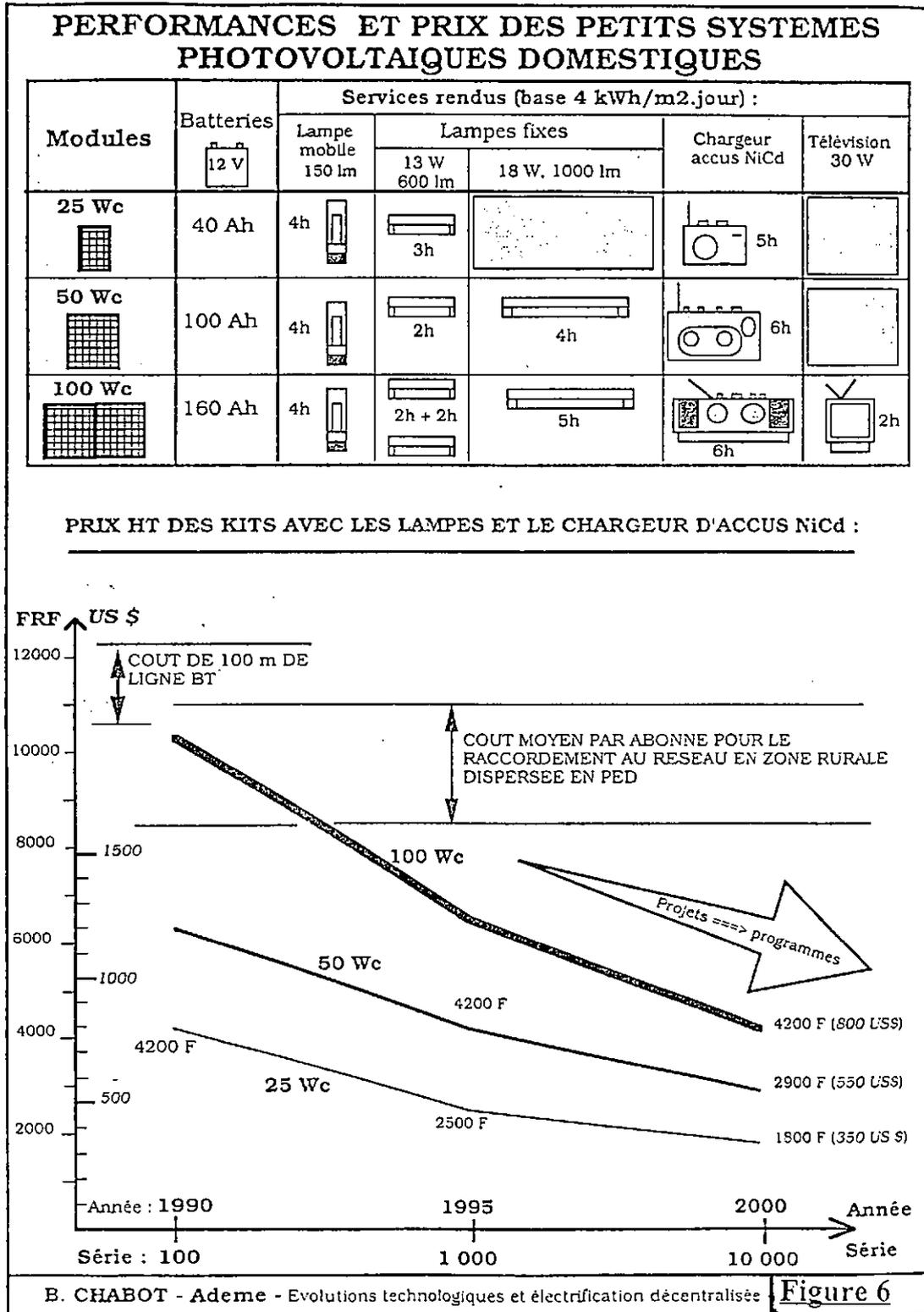
L'électrification photovoltaïque décentralisée:

Les systèmes photovoltaïques décentralisés ont la possibilité de s'affranchir de réseau de distribution d'électricité, puisque leur modularité (typiquement de 25 Wc à 25 kWc) et leur facilité d'installation permet de spécifier "un générateur par besoin à couvrir".

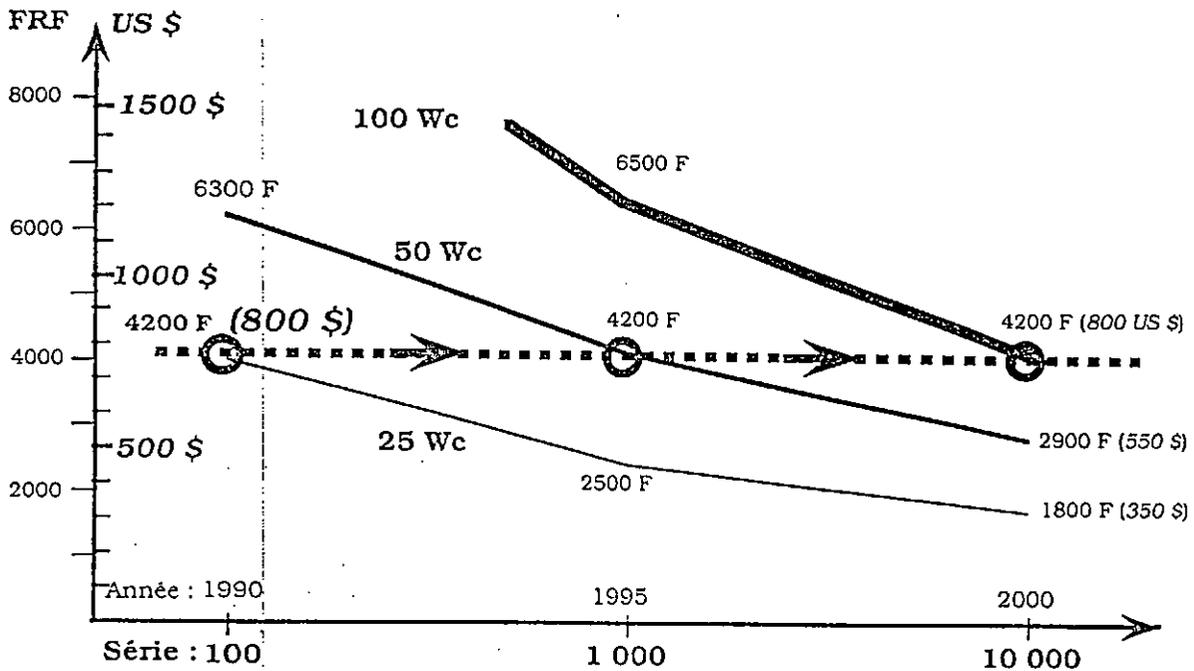
Dans les pays en développement, ces besoins correspondent aux petits générateurs domestiques pour les besoins d'éclairage et d'audiovisuel des familles (cf. figure 6 extraite de [2]) et aux générateurs spécialisés pour les services et les besoins communautaires: école, mairies, centres de santé, petits commerces, pompes d'hydraulique villageoise ou pastorale ou d'irrigation. Alors qu'au début des années 80 les opérations correspondantes relevaient d'opérations de démonstration individuelles, des programmes importants ont pu être menés pour démontrer la validité et l'acceptabilité de ce type d'électrification décentralisée.

Actuellement, ce sont déjà des centaines de milliers de familles dans les zones rurales des pays en développement qui bénéficient de services énergétiques basés sur l'électricité photovoltaïque: éclairage, pompage, chaîne du froid pour la conservation des vaccins, téléphonie rurale etc... L'enjeu est maintenant de vérifier la viabilité économique de cette électrification en diminuant son coût d'accès par des baisses de prix créées par l'effet de série, par l'amortissement des coûts d'apprentissage et de lancement et de gestion des programmes sur un plus grand nombre de bénéficiaires et par la mise au point de financements à taux préférentiels adaptés aux capacités financières des usagers potentiels (paiements mensuels ou au moment des récoltes plutôt qu'achat en une seule fois des équipements, cf. figure 7). Si le défi que représente la création de ce "nouveau cercle vertueux" peut être relevé, et tout laisse à

penser que ce pourra être le cas, ce sont à terme des centaines de millions de familles qui en bénéficieront dans les zones isolées des pays en développement.



ELECTRIFICATION PAR KITS PHOTOVOLTAIQUES : INFLUENCE DU TYPE DE FINANCEMENT

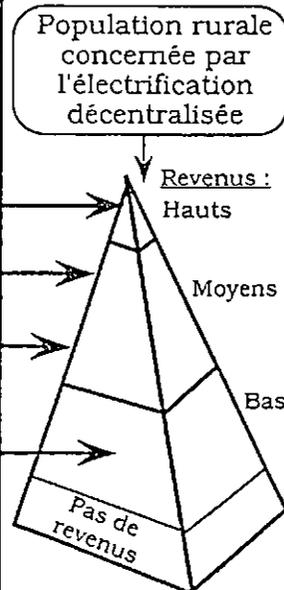


PRINCIPE :

Apport personnel usager : 20% = 160 US\$ (ou 8 x 20 \$ d'épargne préalable)

Prêt : 80% de l'investissement = 640 \$

Type de prêt	Nombre d'années	Taux d'intérêt	Mensualités (US\$/mois)	Exemple de % d'habitants concernés en PED
Prêt privé	2 ans	20%	35 \$	5 à 15%
Prêt public	3 ans	12%	23 \$	+ 10 à 20% 15 à 30%
Prêt bonifié	5 ans	3%	12 \$	+ 20 à 30% 30 à 50%
Prêt bonifié et subvention de 50% sur le coût d'investissement (= 400\$) (cash : 80\$; prêt : 320\$)	5 ans	3%	6 \$	+ 30 à 40% 60 à 90%



Dans les pays industrialisés, le concept de "toit photovoltaïque", initialement lancé et validé en Suisse (qui reste un pays pionnier en la matière), a été repris ensuite avec succès en Allemagne (plus de 30 MWh de générateurs photovoltaïques reliés au réseau en fin 1997 [6]) puis maintenant au Japon. L'exemple du programme très ambitieux de ce dernier pays (il visait 70 000 toits photovoltaïques en 2000 à son lancement officiel en 1994) est très intéressant, car les baisses de coûts prévues (cf. figure 8) et celles obtenues, ainsi que la croissance des réalisations et surtout des demandes solvables enregistrées pour bénéficier de subventions à hauteur de 50 % (cf. figure 9), montrent bien que là aussi, un "cercle vertueux" est en train de se concrétiser.

Ces exemples de créations réussies ou en cours de "cercles vertueux" ne sont pas limitatifs. Leur extension aux autres applications des énergies renouvelables proches de la rentabilité économique ou correspondant à une demande sociale et à d'autres secteurs économiques des pays industrialisés et en développement ne poserait pas de problèmes insurmontables, mais au contraire amènerait sur le moyen et le long terme des bénéfices sociaux, économiques et environnementaux certains.

Cette généralisation passe par l'intégration des énergies renouvelables dans la démarche globale de maîtrise de l'énergie (décrite dans l'introduction) et dans les politiques environnementales et de coopération entre les pays industrialisés et les pays en développement. La dynamique ainsi créée pourra de plus se renforcer continûment des progrès apportés par la recherche et le développement.

Ainsi sur le moyen et le long terme, l'intégration de plus en plus poussée des applications des énergies renouvelables dans tous les secteurs économiques et en synergie avec l'utilisation sobre et efficace de l'énergie mèneront à ce que l'on peut d'ores et déjà appeler la "fusion bien tempérée" (cf. figure 10): s'il n'y a aucun doute que sur le très long terme l'humanité devra appuyer son développement sur l'énergie issue de la fusion thermonucléaire, le recours aux applications directes et indirectes de l'énergie du soleil - qui est lui même un réacteur thermonucléaire dont l'énergie est accessible partout, de façon sûre et de plus en plus économique - est une solution évidente et rationnelle si l'on veut vraiment prendre le chemin du développement durable.

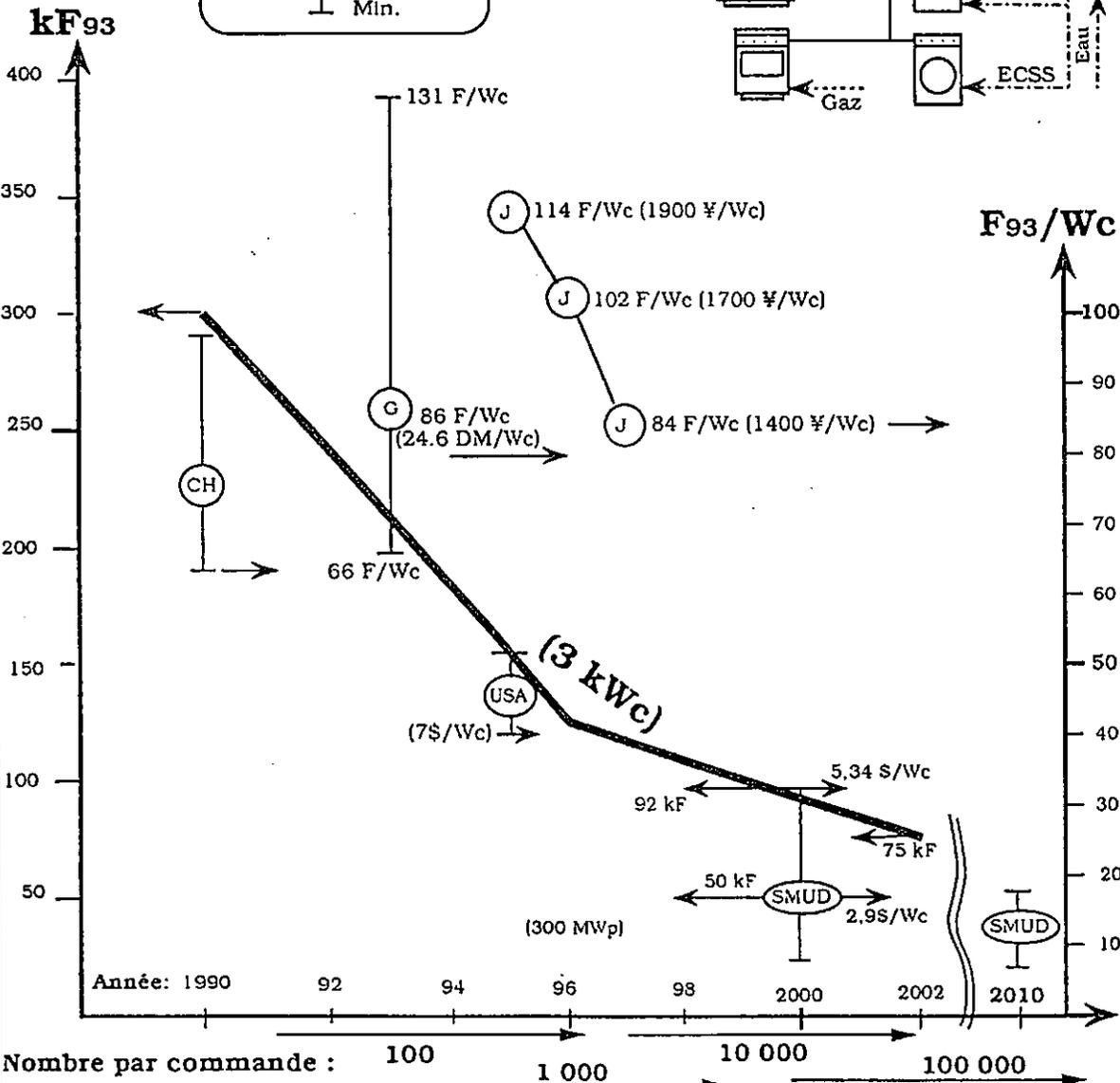
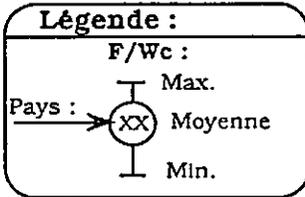
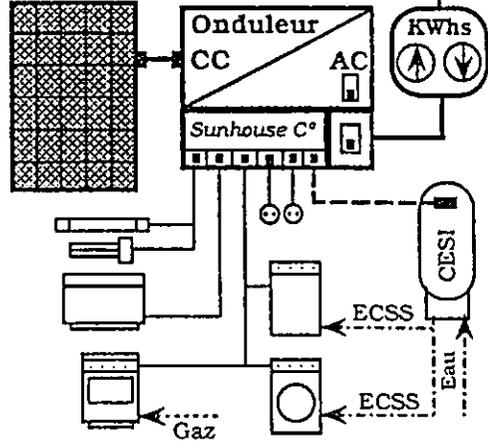
Références:

1. Chabot, "Les énergies renouvelables", in nouveau cédérom "Encyclopaedia Universalis", Paris, mise à jour 4eme trimestre 1997.
2. Bernard Chabot: "L'électrification rurale décentralisée: état de l'art et perspectives techniques et économiques", Revue de l'Energie, N° 475, Paris, 1996.
3. Tong Jiandong: "Small Hydropower: China's Practice", Hangzhou Regional Center Publications, 1994.
4. Paul Gipe: "Wind Energy Comes of Age", John Wiley & sons, New York, 1995.
5. Bernard Chabot: "L'analyse économique de l'énergie éolienne: méthodes, outils, résultats actuels et perspectives à court, moyen et long terme", Revue de l'Energie, N° 485, Paris, 1997.
6. Gabler et al., "Market Introduction of Grid-Connected Photovoltaic Installations in Germany", Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 1987.

LES TOITS PHOTOVOLTAÏQUES : PRINCIPES, COÛTS

Type Maison	P crête	Cas : 3.5 kWh/m2.jour	
		kWh/an	kWh/j.
4/5 pièces 110 M ² 880 kF	3 kWc 1990 : 30 m ² 2000 : 20 m ²	3000	8.2

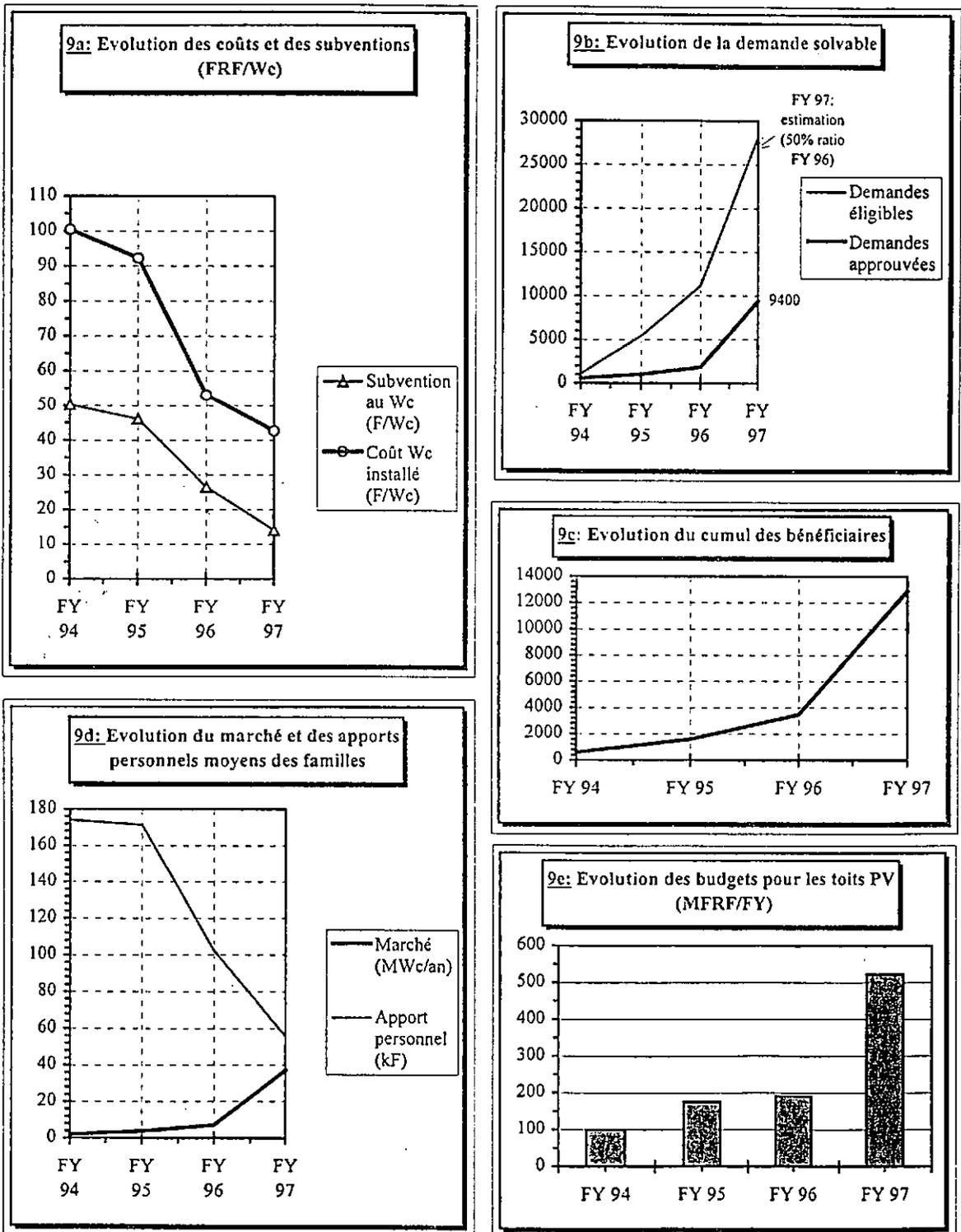
Modules PV
(ex: 30x100 Wc)



Ademe - B. CHABOT

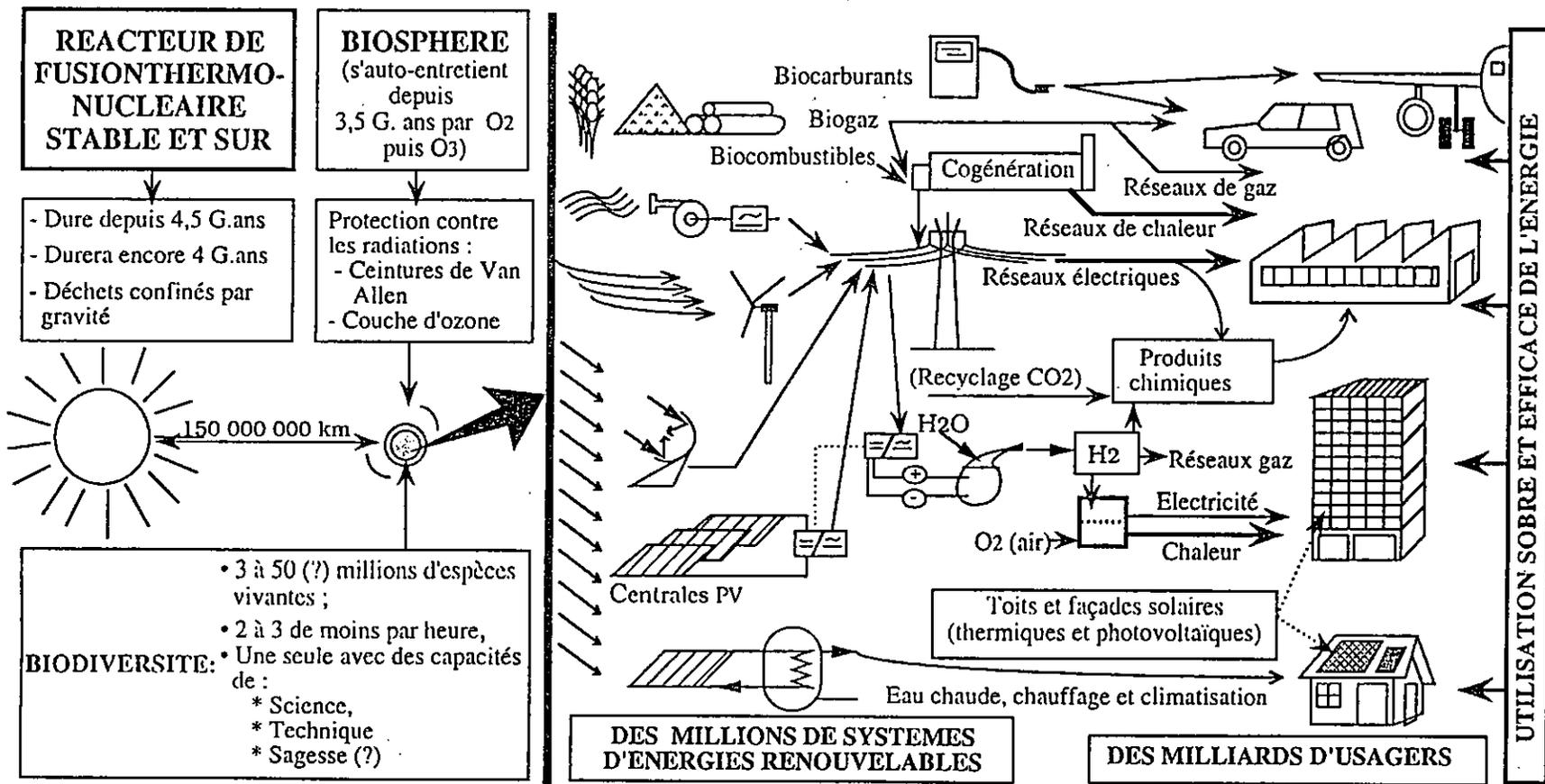
Figure 8

Figure 9: Evolution de la politique et des résultats des toits photovoltaïques au Japon



L'INTEGRATION A LONG TERME ET A GRANDE ECHELLE DES ENERGIES RENEUVELABLES : VERS LA "FUSION BIEN TEMPEREE"

Figure 10



L'agriculture, joker énergétique ?

Antoine Reist

Station fédérale de recherches en production végétale de Changins
Centre des Fougères, CH - 1964 Conthey

Introduction

Dans notre pays, la tâche de l'agriculture s'est résumée jusqu'ici à fournir des aliments (avec un très modeste appoint de matières premières textiles). L'augmentation des rendements et la substitution par des produits importés engendrent une surproduction. La garantie du revenu des producteurs, par des prix administrés plus élevés que ceux du marché international et diverses primes liées aux cultures ou à la mise en valeur des produits, surchargent le budget de la Confédération.

On estime que 80.000 ha de terres agricoles, dont la moitié de terres ouvertes et la moitié de surfaces herbagères, doivent être distraites de la production d'aliments et de fourrages d'ici à l'an 2000 (Hofer, 1994).

Les surfaces ainsi libérées, gardant vocation agricole, peuvent être mises en jachère (interdites de rendements commercialisables) ou affectées à des productions alternatives: matières premières industrielles et/ou énergétiques. L'opportunité du « gel » des terres productives ou de leur exploitation alternative dépend d'un arbitrage complexe de critères énergétiques, écologiques et économiques. On envisagera ici, en priorité, la filière énergétique (production et transformation).

Pour ce qui concerne la politique énergétique: les énergies renouvelables doivent couvrir, d'ici à l'an 2000, un supplément de 3% des besoins thermiques et 0.5% de l'approvisionnement en électricité (par rapport à 1990). La biomasse (agriculture, forêt, déchets) est censée contribuer pour 52% (chaleur) et 84% (électricité) à ce projet (Eicher, 1997). Dans la CE (pour comparaison), il est prévu que les biocarburants couvrent 5% des besoins des véhicules à moteur d'ici à 2005 par l'affectation de 7 millions d'hectares à la production de biodiesel et de bioéthanol (Altener, 1993 cité par Nyfenegger, 1993).

Critères d'évaluation

Pour que la production d'énergie soit envisageable, il faut que son bilan énergétique soit positif et que sa contribution à l'approvisionnement soit perceptible. Pour qu'elle soit justifiable, il faut que son bilan écologique soit au moins aussi favorable que celui des cultures qu'elle remplace. Pour qu'elle soit praticable, il faut que son bilan économique soit, pour les entreprises de la filière d'approvisionnement, aussi attrayant que celui des productions traditionnelles. Pour qu'elle soit applicable, il faut que son coût, pour la collectivité et les utilisateurs, ne soit pas plus élevé que celui des énergies concurrentes.

Cultures envisageables et filières de transformation

Des essais de culture ont été réalisés en Suisse avec le topinambour (*Helianthus tuberosus*), le millet (*Sorghum bicolor*) et l'euphorbe (*Euphorbia lathyris*) destinés à la production de

méthane ou d'éthanol (Reust, 1992). Une étude approfondie de la culture et de la transformation de colza (*Brassica oleracea*) (production de biocarburant ou de lubrifiant), de roseau de Chine (*Miscanthus sinensis*) (combustion ou production de matières premières industrielles), d'herbe (divers mélanges) (combustion ou production de méthane par fermentation) a été réalisée récemment (Wolfensberger et al, 1997). Une analyse parallèle des filières « herbe, résidus de récolte et bois de taillis » (combustion, fermentation) a été menée à bien (Hersener et al, 1997). Ces deux derniers travaux comprennent les bilans énergétiques, écologiques et économiques et constituent les principales références du présent exposé.

Bilans énergétiques et signification

En production intensive, la culture, la récolte et le transport représentent un investissement énergétique de l'ordre de 0.5 tep / ha dont la moitié pour les engrais azotés (Dessus, 1994). Les rendements des cultures énergétiques dépendent aussi, en moyenne de plusieurs années, de la quantité d'engrais apportée; cette dépendance n'est pas linéaire et les besoins diffèrent selon l'espèce. On peut estimer le coût énergétique de la matière prête à la transformation, à 10-20% de son contenu énergétique brut.

Les processus de transformation en énergie utilisable (pressage, déchiquetage, granulation, installations spéciales de combustion, transformation chimique...) peuvent coûter jusqu'à 10% de la teneur en énergie de la récolte (mais 30% de l'énergie contenue dans le produit à transformer, pour l'estérification de l'huile de colza). Le bilan énergétique net (40-90% de production d'énergie par rapport à la masse végétale récoltée, c'est-à-dire un apport net de 0.7 - 6.4 tep / ha) est donc très variable selon l'espèce, le mode d'exploitation et de transformation, mais il est toujours positif.

Avec une production moyenne de 2 tep et 80.000 ha affectés à cette fonction, l'agriculture suisse couvrirait environ 3% de la consommation actuelle d'huile de chauffage (5.2 mio tep selon Hersener et al, op. cit. p. 14).

Bilan écologique

L'influence des divers scénarios d'approvisionnement énergétique agricole se mesure à l'économie de ressources non renouvelables, l'émission de substances nocives et les déchets, la fertilité des sols, la diversité des espèces.

Pour la production d'énergie, l'économie de ressources non renouvelables est assimilable au bilan énergétique; l'alternative de production de matières premières industrielles (papier, lubrifiants, substrats de culture, matériaux d'emballage) permettrait, concurremment, des économies de ressources de 17-34%.

L'émission de substances nocives est liée en partie au mode d'exploitation agricole, et en partie au mode d'utilisation des produits récoltés. S'agissant du premier, les cultures ne couvrant le sol qu'une partie de l'année favorisent l'eutrophisation des eaux par des pertes de phosphore; l'utilisation d'engrais de ferme sur les cultures intensives entraîne l'émission de gaz à effet de serre (méthane et composés azotés volatils). Le bilan ne change que si la production d'énergie implique une modification du mode d'exploitation (passage de l'extensif à l'intensif ou inversement, utilisation d'engrais de ferme ou de produits du commerce), ce qui n'est pas envisagé ici. L'émission de substances nocives est également liée à la lutte contre les

mauvaises herbes, les maladies et les ravageurs. Certaines cultures couvrant lentement le sol nécessitent l'emploi d'herbicides (colza, roseau de Chine...). L'emploi de fongicides et d'insecticides doit être envisagé dans la culture de colza, mais dans aucune des autres productions de matières premières renouvelables.

Par contre, la combustion de matières végétales aux propriétés diverses de structure physique et de composition chimique, comporte l'émission de substances nocives ou corrosives (poussières, oxydes d'azote, dioxine, composés soufrés et chlorés), difficilement maîtrisable avec les techniques actuelles. La teneur des matières combustibles en azote, soufre, chlore et potassium baisse avec la lignification, d'où la nécessité d'une épuration des fumées meilleure pour l'herbe que pour les pailles, et meilleure pour les pailles que pour le bois. Par contre, la teneur des cendres et scories en éléments minéraux correspond à celles des engrais du commerce et elles peuvent être affectées au même usage. Les poussières retenues par les filtres vont en décharge de déchets inertes.

La transformation des produits végétaux par méthanisation pourrait, dans l'hypothèse d'une production intensive, livrer l'équivalent de 3 tep par ha de culture (1 tep pour production extensive). La structure de la charge sur l'environnement est différente (moins d'effluents toxiques, davantage de composés volatils à effet de serre). Il n'y a pas de déchets à déposer en décharge.

La gazéification en vue de l'utilisation dans des installations chaleur-force est encore au stade expérimental pour les matières autres que le bois.

La production d'éthanol par fermentation d'amidon ou d'inuline provenant de cultures de céréales (maïs, blé, sorgho...) ou de tubercules (pommes de terre, topinambour...) est une alternative coûteuse en investissements et en énergie: un bilan énergétique positif n'est envisageable qu'avec les techniques les plus élaborées. De plus, elle génère d'importants déchets de transformation (Studer, 1990).

La fertilité des sols (composition chimique, structure physique) est influencée par leur mode d'exploitation (intensif ou extensif), par le travail du sol et le degré de couverture végétale. Elle n'est que peu influencée par l'espèce cultivée, pour un mode d'exploitation équivalent (sous réserve que l'apport d'engrais soit mesuré aux exportations respectives). Les métaux lourds constituent un cas particulier: importation nette avec les engrais du commerce, exportation nette avec la récolte de plantes entières, bilan équilibré avec les engrais de ferme. Dans le cas de l'apport d'engrais du commerce et de récolte partielle (graines), il y a enrichissement des sols en métaux lourds. L'érosion des sols et le ruissellement (entraînant la pollution des eaux par le phosphore et les résidus de produits de traitement) dépendent du degré de couverture des sols et soulèvent les mêmes réserves que pour les productions traditionnelles.

La diversité des espèces est influencée, selon le compartiment envisagé, par le travail du sol, la densité et la durée de la couverture végétale. Par rapport aux productions concurrentes exploitées de la même manière, les cultures envisagées n'ont pas d'influence sur la flore, la faune hypogée ou épigée, ni sur les oiseaux. Par contre, l'occupation de longue durée par le roseau de Chine ou des taillis favorise la diversité de la faune.

Bilan financier pour les producteurs et consommateurs

Le revenu des agriculteurs dépend du rendement financier des récoltes et de diverses subventions. Le prix consenti aux matières premières est calculé en fonction de celui des produits à substituer, sur la base de rendements agronomiques moyens. S'agissant de carburants, leur valeur commerciale est supérieure s'ils sont vendus au public (car augmentée du montant des droits de douane non perçus) que s'ils sont utilisés dans l'agriculture (à laquelle ces droits sur les carburants importés sont rétrocédés).

Les subventions doivent compenser le manque à gagner en comparaison avec une culture traditionnelle sur la même surface, mais ils ne doivent pas être suffisants à rendre les surfaces écologiques de compensation moins rentables que les cultures alternatives (Message du Conseil fédéral sur la deuxième étape de la réforme de la politique agricole, 26 juin 1996). La combinaison des revenus des cultures et des subventions en vigueur permet de calculer la rentabilité des diverses variantes de cultures énergétiques: il s'agit en fait d'un manque à gagner, dont la compensation doit faire l'objet d'une politique d'incitation. Comme les rendements physiques des cultures de matières premières énergétiques sont, du fait de l'inexpérience, très incertains, les risques sont importants pour les agriculteurs et l'incitation actuellement faible. A l'insécurité matérielle et financière des rendements s'ajoute celle des filières de transformation, parfois incertaines techniquement et toujours coûteuses.

Les consommateurs n'ont pas, sauf brusque pénurie d'approvisionnement, à se préoccuper de la manière dont l'énergie est produite. Toutefois, ils pourraient devoir contribuer à l'adaptation des moteurs de véhicules (utilisation de biocarburants) et des installations de production de chaleur et d'électricité (chaudières, couplage chaleur-force). Les taxes incitatives, remises fiscales et droits de douane répartissent les charges engendrées par la politique d'approvisionnement.

Bilan financier pour les collectivités

La production d'énergie par l'agriculture induit un manque à gagner sur les droits de douane des carburants. La mise au point des méthodes de culture et de transformation réclame des investissements importants, de même que le subventionnement de filières d'approvisionnement financièrement déficitaires. En compensation, les collectivités font l'économie de la prise en charge de productions alimentaires excédentaires, et peuvent bénéficier de droits de douane élevés sur les fourrages importés. Selon les alternatives choisies, les charges directes pour la Confédération en cas de remplacement de cultures traditionnelles par des cultures de matières premières énergétiques peuvent varier, en chiffres ronds, de [+ 2000 Fr./ ha] (colza pour méthylester à la place de blé d'hiver) à [-600 Fr./ ha] (herbe pour la combustion à la place de blé d'hiver).

Le cas particulier de la forêt

Les surfaces boisées sont confisquées à l'agriculture au profit de la forêt; toutefois, la production de bois à brûler a été envisagée à titre d'exception, par des plantations de taillis à peuplement mixte. La mise en place de 20-50 arbres à l'hectare permet l'exploitation après quelques années, et les rendements envisagés sont d'une moyenne de 23 stères par an, sur 15 ans. L'apport énergétique net serait de l'ordre de 2 tep / ha (Hersener et al, op.cit.).

Le potentiel d'approvisionnement en bois par récolte dans les forêts existantes est estimé à quelque 4 mio de stères à moyen terme (et à un maximum de 6) sans concurrencer le bois d'œuvre. Sa contribution possible à l'approvisionnement énergétique est évaluée à environ 1 million de tep (Rutschmann, 1997).

Conclusion

L'affectation de surfaces agricoles productives à la fourniture de matières premières énergétiques permettrait de couvrir, avec 0.16 Mtep, environ 3% des besoins actuels en huile de chauffage. Deux variantes d'affectation sont possibles: la fourniture de matières premières industrielles, dont les filières ne sont toutefois pas bien établies; et la mise en jachère de ces surfaces, qui coûterait davantage au budget de l'Etat.

Parallèlement à la culture de matières premières énergétiques, l'approvisionnement énergétique pourrait faire appel à la récolte de bois forestier, pour 1 Mtep ou 19% des besoins actuels en huile de chauffage, et à la méthanisation des résidus agricoles (excréments et déchets de récolte) pour quelque 0.3 Mtep ou 6% des mêmes besoins.

Bibliographie

Dessus, B., 1994. Atlas des énergies pour un monde viable. Syros, Paris

Eicher, H., 1997. Erneuerbare Energien. Möglichkeiten und Grenzen. In: Erneuerbare Energien und rationelle Energienutzung. Energieforum Schweiz Bern. p. 19--21.

Hofer, H., 1994. Masterplan Pflanzenbau. Bericht der Expertenkommission zur Neuorientierung im Pflanzenbau. EVD Bern, 183 S.

Hersener, J.-L., Meister, E., Meidavilla, V., Lips, A., Rüegg, J., Nussbaumer, T., Baserga, U., Müller, D., Dinkel, F., Waldeck, B., Müller, T., Hirs, B., 1997. Schlussbericht Projekt Energiegras/Feldholz. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik Tänikon, 166p.+ ann.

Nyfenegger, L., 1993. Matières premières renouvelables en Suisse. Revue suisse Agric. 25 (6) 339-342.

Reust, W., 1992. Nachwachsende Rohstoffe und Alternativkulturen : Ertragspotential von Topinambur, Zuckerhirse und einer Wolfsmilch. Landwirtschaft Schweiz 5 (10) 509-516.

Rutschmann, C., 1997. Holz - im Wald wächst Wärme. In : Erneuerbare Energien und rationelle Energienutzung. Energieforum Schweiz Bern. p.27.

Studer, R., 1990. Inländischer Treibstoff aus nachwachsenden Rohstoffen. Landwirtschaft Schweiz 3 (11) 625-628.

Wolfensberger, U., Dinkel, F., Gaillard, G., Hirs, B., Lips, A., Nentwig, W., Todt, W., Waldeck, B., Strasser, H., Grub, A., Hausheer, J., Menzi, H., Prasuhn, V., Stauffer, W., Studer, K., Ulrich, W., Weisskopf, P., Diserens, E., Oberholzer, H.-R., Dubois, D., Frei, G., Achtel, L., Schütt, K., Aeberhardt, A., Rieder, P., Schmid, H., 1997. Beurteilung nachwachsender Rohstoffe in der Schweiz in den Jahren 1993-1996. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik Tänikon, 230p.

L'évolution de l'utilisation des énergies renouvelables: exemple de l'habitat

Willi Weber

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)

19, avenue de la Jonction, CH - 1205 Genève

e-mail : willi.weber@cuepe.unige.ch

Résumé

Jusqu'au XVIIIe siècle, les énergies renouvelables couvraient près de la totalité des énergies nécessaires aux activités de construction et d'exploitation des bâtiments.

Aujourd'hui, de nouveau, grâce au développement de moyens de simulation et de nouveaux matériaux, des constructions pilotes, autonomes en énergie, ont été réalisées. Certaines produisent même un surplus d'énergie qui peut être vendu et injecté dans le réseau électrique. Sans vouloir généraliser ce type extrême de construction, il est néanmoins facile de réduire d'un facteur trois ou quatre les besoins en énergie d'un bâtiment et de répondre par des énergies renouvelables à une partie des besoins restants.

Les bâtiments construits avant le début des années 90, qui représentent la majorité du parc immobilier, nécessitent le développement de stratégies de rénovations thermiques appropriées.

Potentiel d'économies d'énergies non renouvelables dans le secteur du bâtiment

« Vivre sans recourir de manière importante aux énergies fossiles est de nos jours considéré comme visionnaire. Alors qu'en réalité l'homme a vécu de cette manière, la plus grande partie de son histoire et de sa préhistoire, parce qu'il n'y avait pas d'autres possibilités. »

Dr. A. Goetzberger, fondateur du
Fraunhofer-Institut für Solar Energiesysteme

Historique

Jusqu'au XVIIIe siècle, la construction des habitations, leur chauffage et éclairage étaient basés sur l'utilisation d'énergies renouvelables: le chauffage se faisait au bois, mais seulement dans certaines pièces et à certains moments de la journée.

En fonction des savoirs techniques et des cultures, des modèles de constructions, adaptées au climat, économes en matériaux et en énergie se sont développés [exemple 1 en annexe].

Ce n'est qu'au siècle dernier, avec le développement des transports, que s'est répandu l'usage du charbon pour le chauffage.

Le XXe siècle a été une période d'utilisation de l'énergie axée sur le confort: eau chaude à profusion, éclairage excessif, chauffage dans toutes les pièces (23-25 °C), ainsi qu'un développement rapide et important de la surface et du nombre de logements et de bureaux.

C'est pourquoi, si jusqu'au XVIIIe siècle les énergies renouvelables couvraient près de la totalité des énergies nécessaires aux activités de construction et d'exploitation des bâtiments, elles n'en représentent aujourd'hui plus qu'une très faible partie.

La facilité d'accès aux réseaux d'électricité et de gaz naturel, le faible coût de cette énergie n'incitent guère à modifier ces habitudes de construction générant une forte consommation d'énergie.

Cependant, le constat de l'épuisement des ressources en énergies fossiles, l'exigence d'un approvisionnement stable et les problèmes environnementaux de pollution et de changements climatiques (encore plus préoccupants à long terme), ont sensibilisé l'opinion et poussé la plupart des gouvernements à élaborer une politique d'encouragement à l'utilisation des énergies renouvelables non polluantes et à l'économie d'énergie.

Le secteur du bâtiment est un acteur prépondérant de cette politique énergétique, puisqu'il y joue un rôle important: il consomme près du 10% du total des énergies produites dans le monde pour construire et aménager maisons et bureaux et 30 à 50 % de l'énergie pour l'exploitation de ces bâtiments.

De plus, il utilise environ 40% des matières entrant chaque année dans l'économie planétaire. Il crée des nuisances lors de la production des matériaux de construction, puis d'autres dues au chauffage [1].

Possibilité des techniques et concepts énergétiques

Les solutions techniques existent, qui permettent de concevoir et réaliser des habitations ne recourant que faiblement aux énergies fossiles. Plusieurs maisons expérimentales autonomes en énergie pour le chauffage et certaines, même, pour la production d'eau chaude et d'électricité, ont été réalisées.

Ceci grâce au développement de nouveaux matériaux de construction, d'installations et grâce à la possibilité de simuler le comportement des bâtiments.

Matériaux de construction

Pour ce qui est des matériaux de construction, c'est principalement dans le domaine des verres que les développements sont spectaculaires:

- verres à couches sélectives,
- verres intégrant un ou plusieurs films plastiques,
- verres photochromiques,
- composants translucides en verre ou en plastique, formés d'un assemblage d'alvéoles horizontales, appelées communément isolation transparente ou TWD.

Installations techniques

Entre autres innovations au niveau des installations techniques on trouve:

- le développement de systèmes, à très bon rendement, de ventilation à double flux avec préchauffage de l'air au moyen d'une récupération de chaleur sur l'air extrait;
- des régulations intelligentes ou prévisionnelles qui permettent d'intégrer les paramètres climatiques et du confort pour optimiser le fonctionnement des installations;
- l'amélioration du rendement des chaudières.

Simulation

Dans le domaine du projet:

- l'accumulation d'expériences a permis d'établir des méthodes rapides, simplifiées, de dimensionnement pour les surfaces de vitrages, les surfaces de stockage, les protections solaires, les besoins de chauffage;
- le développement de logiciels de simulations dynamiques, qui permettent, eux, de simuler et de quantifier les paramètres d'énergie et de confort sur un jour un mois ou une année et, ainsi, d'observer le comportement thermiques du bâtiment virtuel et, par améliorations successives, de s'assurer de son bon fonctionnement avant la réalisation.

Concept énergétique de deux maisons autonomes

Pour diminuer l'utilisation d'énergie non renouvelable, deux concepts différents permettent d'y parvenir: réduction des besoins en énergie ou substitution par des énergies renouvelables.

Deux exemples de réalisations d'habitations autonomes poussent ces concepts jusqu'à l'extrême:

- les habitations à Trin [exemple 2 en annexe], qui, par un choix judicieux de l'implantation et avec une enveloppe fortement isolée (notamment 50 m² de très bons vitrages au sud, $k=0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$), diminuent à l'extrême les déperditions thermiques de l'enveloppe et permettent à l'énergie solaire pénétrant par les vitrages sud de maintenir le confort durant la saison d'hiver. Pour les périodes de quelques jour sans soleil un stockage de chaleur est prévu [2];
- la Nulenergiehaus de Freiburg en Brisgau [exemple 3 en annexe], où le choix de la forme et l'utilisation de l'isolation transparente permettent de limiter fortement les besoins en énergie de chauffage grâce à la bonne isolation et à l'énergie solaire passive. Les besoins restants sont couverts par la combustion de l'hydrogène, obtenue par électrolyse, grâce à l'électricité des cellules photovoltaïques [3].

Ce qui est réalisable

S'il n'est pas pensable, pour de raisons économiques, de généraliser les constructions autonomes, il est néanmoins facile de réduire d'un facteur deux ou trois les besoins en énergie du bâtiment et de répondre par des énergies renouvelables à une partie des besoins restants.

Ueli Schäfer, un architecte zurichois, qui a plus de vingt-cinq ans d'expérience dans la réalisation de constructions à basse consommation d'énergie, résume les diverses stratégies.

Il dit, en substance, qu'entre les maisons économes en énergie des années 70 et les nouvelles maisons à basse consommation d'énergie, il semble se dessiner des stratégies progressives, avec comme point de départ les valeurs limites imposées actuellement par les divers règlements et comme point d'arrivée le but de construction ne consommant plus d'énergie [4].

Il définit quatre seuils pour la consommation des immeubles:

- « limite »: les constructions respectent les prescriptions, utilisent les combustibles les moins chers, chauffent à profusion et ne prennent pas de risques;

- « économes en énergie»: constructions traditionnelles avec isolation extérieure plus grande, utilisation du chauffage quand cela est strictement nécessaire et utilisation d'énergies renouvelables;
- «à basse consommation d'énergie»: constructions à isolation renforcée, vitrages superisolants ou volets isolants et ventilation à double flux, avec récupération d'énergie; enfin, régulation du chauffage sur la température intérieure.
- «à énergie nulle»: construction avec isolation renforcée; fenêtres superisolées, renouvellement d'air minimum avec un très bonne récupération de la chaleur et un stockage pour parer aux périodes de temps froid, sans soleil.

Etat actuel et futur de la consommation d'énergie dans les bâtiments

Actuellement, dans plusieurs pays (Allemagne, Autriche, Suisse), c'est le standard des constructions "limites" qui est appliqué pour les habitations neuves. Pour imposer ce standard, des règlements prescrivent des valeurs limites pour les besoins en énergie de chauffage, de production d'eau chaude et d'électricité (par année au m² ou au m³ chauffé). Ces valeurs sont définies par région (par canton en Suisse) ou pour l'ensemble d'un pays (Allemagne). Le contrôle se fait au moment de délivrer le permis de construire. L'utilisation des énergies renouvelables est encouragée par des subventions au m² de capteurs solaires, de panneaux photovoltaïques, etc.

Ces valeurs limites sont appelées à évoluer. Etant donné les progrès de la technologie du bâtiment, les engagements pris par la Confédération à la suite de la Conférence de Rio pour la diminution des émissions de CO₂ et l'influence des partis écologistes, le concours de ces divers éléments amènera à appliquer des valeurs limites plus sévères correspondant au standard «économes en énergie», voire même «basse consommation d'énergie».

Mais en période de récession, des résistances se manifestent sous prétexte de renchérissement de la construction, d'augmentation de taxes ou d'accroissement de la complexité des bâtiments et, de ce fait, du travail de projection et de réalisation, ce qui porte préjudice à l'application de ces nouvelles mesures.

Quelle sera l'évolution du standard et des exigences pour les bâtiments de demain?

Diverses projections et analyses, portant sur l'évolution de la qualité du domaine bâti et des économies d'énergie qui en résulteront, ont été réalisées:

Etude de la Commission énergie de la SIA, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes [5]

En 1996, la Commission énergie de la SIA a produit un document "pour, à partir des connaissances actuelles, définir les caractéristiques énergétiques minimales des bâtiments dans le futur". Ce document concerne les bâtiments neufs, ainsi que les rénovations, qui représentent un des grands potentiels d'économie.

Constructions neuves

Ce document de la SIA établit (figure 1) une hypothèse pour l'évolution de la consommation d'énergie des bâtiments neufs jusqu'en 2020:

- entre 1990 et 2020, l'amélioration des enveloppes et l'installation de récupération de chaleur sur le renouvellement d'air permettront une économie d'énergie de 330 à 90 MJ/m²an;
- la production d'eau chaude sanitaire diminuera de moitié ses besoins en énergie, grâce à l'utilisation systématique du préchauffage solaire de l'eau sanitaire, cela à partir de l'an 2000;
- un meilleur rendement des appareils et de l'éclairage produira un abaissement de la consommation électrique (120 à 80 MJ/m²an).

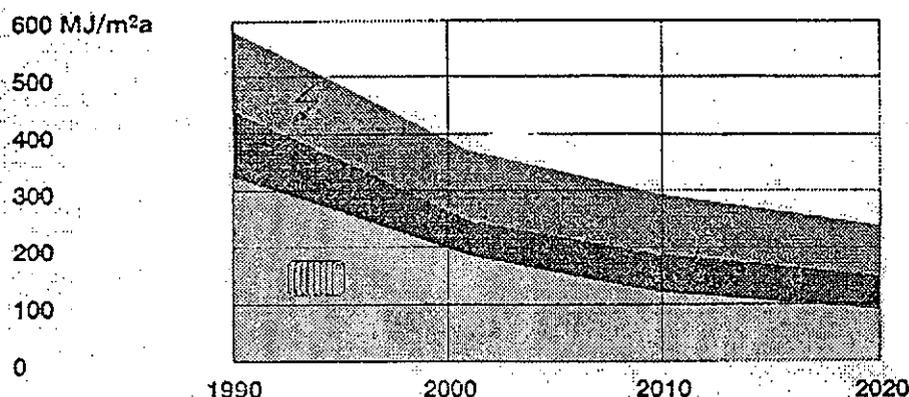


Figure 1, évolution attendue de l'indice de dépense d'énergie (IDE) dans les bâtiments neufs

Rénovations

Actuellement, les constructions neuves réalisées chaque année ne représentent guère plus du 1% du domaine bâti.

C'est donc dans le secteur de la rénovation, conclut cette commission, que le potentiel d'économies d'énergie est le plus grand.

Le parc immobilier existant a été subdivisé en cinq périodes caractérisées par un mode de construction typique.

Pour les bâtiments de chacune de ces cinq périodes, le document envisage deux phases de rénovation, intervenant en 1995 et en 2020; l'objectif implicite de ces rénovations est une amélioration des caractéristiques énergétiques minimales des composants de l'enveloppe et une amélioration des installations techniques. L'amélioration des consommations d'énergie résultant des rénovations entraîne une réduction approximative de la moitié des besoins en énergie pour une rénovation en 1995 et une réduction des deux tiers des besoins en énergie pour une rénovation en 2020.

Agence internationale de l'énergie (AIE)

Le résultat d'un séminaire l'AIE, publié en 1993 [6], prévoyait, dans ses conclusions, sur la base de la technologie disponible, que les maisons à faible consommation d'énergie devaient devenir la norme pour les constructions nouvelles et les transformations. Ce travail réaffirmait combien le secteur du bâtiment est un acteur central des économies d'énergie (soit actuellement la moitié de la consommation globale d'énergie en Suisse). Le potentiel d'économie évalué était de 65%.

La conviction de ce groupe d'étude est que la diminution des consommations d'énergie s'accompagnera d'une modification des sources d'énergie (figure 24):

- une partie (60%) de l'énergie électrique est produite par des PV (cellules photovoltaïques),
- l'eau chaude est préchauffée pour 50% par le solaire,
- quant au chauffage (figure 25), la part d'énergie fossile restante qui serait nécessaire peut être remplacée par le bois ou le solaire avec stockage saisonnier.

Label Minergie et Eco 2000

Pour inciter les maîtres d'ouvrage à construire des bâtiments plus respectueux de l'environnement, des labels ont été proposés, notamment:

- le label Minergie (proposé par le canton de Zurich)
- le label Eco 2000, (proposé par l'Office fédéral de l'énergie).

Pour mériter ces labels, les constructions doivent répondre à une série d'exigences qui vont de l'implantation à la qualité écologique des matériaux et, surtout, une très basse consommation d'énergie.

L'octroi du label entraîne un certain nombre d'avantages, dont des hypothèques à taux préférentiels (en effet, l'Office fédéral et quelques offices cantonaux de l'énergie ont obtenus des arrangements avec certaines banques).

Energieperspektiven des Szenarien I bis III, Prognos AG, Basel, novembre 1996 [7]

Finalement, pour pouvoir s'appuyer sur des prévisions réalistes, l'Office fédéral de l'énergie a chargé le bureau Prognos AG de Bâles d'étudier divers scénarios pour définir l'évolution des consommations d'énergie dans les prochaines décennies, en tenant compte du poids des acteurs de la scène politique et économique.

Le rapport final de novembre 1996 évalue pour sept scénarios (I à IIIId) la consommation d'énergie, la répartition des vecteurs d'énergie et les émissions de CO₂ qui en résultent.

Le scénario I applique les mesures actuellement en vigueur, le scénario II prévoit une nouvelle loi sur l'énergie et une taxe sur le CO₂, enfin les scénarios III (a-d) tiennent compte de l'acceptation des deux initiatives "énergie et environnement" et "pour l'introduction d'un centime solaire".

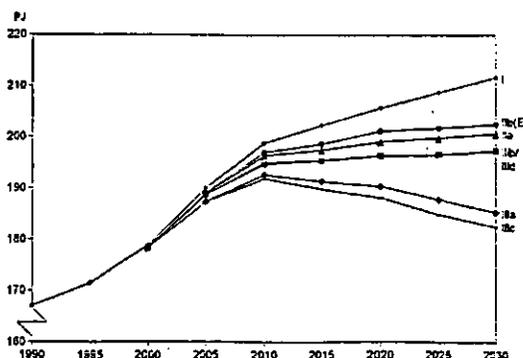
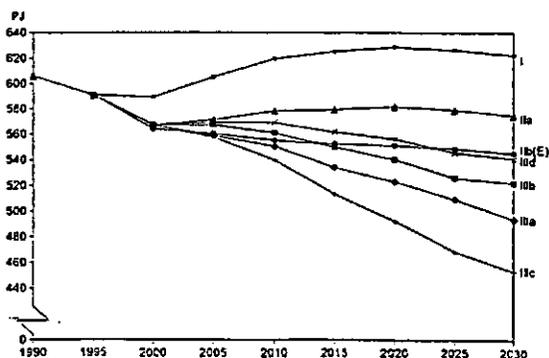


Figure 2, évolution des besoins d'énergie fossile, Figure 3, évolution des besoins d'électricité

Pour les énergies fossiles (figure 2), le rapport prévoit une stabilité de la consommation avec le scénario I et une forte diminution avec le scénario IIIc. Par contre pour les besoins en électricité (figure 3), il prévoit une forte augmentation sauf pour les scénarios IIIa et IIIc où, après 2010 la consommation diminue.

Energie grise, énergie solaire passive

Energie grise ou indirecte

L'existence d'un bâtiment, du projet à sa démolition, après son utilisation et les éventuelles rénovations, implique, en plus de l'énergie nécessaire à son fonctionnement, l'énergie nécessaire à la construction et à l'entretien du bâtiment que l'on appelle énergie indirecte, ou énergie grise.

Une étude du Bureau Umweltchemie de Zurich [8] a calculé et comparé l'énergie d'exploitation et l'énergie de construction (énergie grise) pour trois bâtiments:

- Sagi-Hegi, immeuble d'habitation à faible coût de quatre niveaux et demi. Double mur avec briques de ciment Silico calcaire, demande d'énergie de chauffage correspondant à la valeur limite de la SIA (300MJ/m²an);
- Niederholzboden, ensemble sur 2 niveaux sur cave avec toiture froide. Construit selon des considérations d'écologie. Ventilation à double flux avec échangeur de chaleur. Besoin d'énergie 80 MJ/m²an;
- Trin, maison unifamiliale sur deux niveaux, maison écologique à consommation nulle d'énergie. Utilisation de l'énergie solaire passive au moyen de fenêtres sud, d'un grand stockage. Construction écologique avec isolation renforcée et ponts thermiques réduits au minimum.

Cette étude conclut que si, pour la moyenne des bâtiments existants l'énergie d'exploitation est dix fois supérieure à l'énergie nécessaire à sa construction, il n'en va plus de même lorsque la qualité thermique des bâtiments s'améliore.

A partir d'un certain seuil (Niederholzboden, par exemple) l'énergie grise est égale puis supérieure à l'énergie d'exploitation.

Si pour l'instant, on néglige relativement l'importance de cette énergie grise, il faudra en tenir compte, dès lors que la qualité des constructions permettra de réduire l'énergie d'exploitation. Il sera nécessaire aussi de choisir des composants du bâtiment qui soient peu consommateurs en énergie pour leur production et veiller à utiliser des matériaux renouvelables (donc pas de bois exotiques).

Energie pour le transport.

Le choix de l'implantation des bâtiments, outre ses conséquences sur la longueur des réseaux routiers, amenées et évacuations des eaux etc., détermine aussi la consommation d'énergie liée aux distances de déplacements travail/habitation; or, ces déplacements représentent en général l'équivalent des besoins en énergie de chauffage et sont donc un des principaux agents de la pollution (figure 4). Avec des maisons à basse consommation d'énergie, la part de l'énergie pour les déplacements représente plus du 60%. Dès lors le choix de l'implantation, par rapport aux transports publics et aux lieux de travail et de loisirs devient très important.

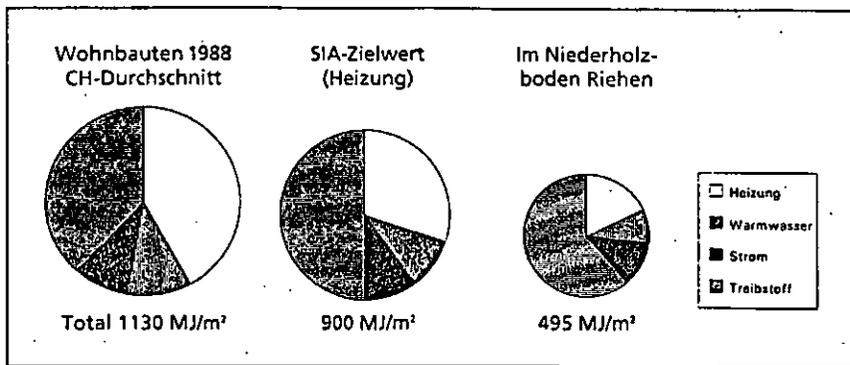


Figure 4, consommation d'énergie par m² d'habitation [9]

Energie solaire passive, mode de comptage

Pour rendre possible et raisonnable le recours aux énergies renouvelables, quantitativement limitées et fluctuantes, comme l'ensoleillement, il est nécessaire en premier lieu de réduire drastiquement les besoins en énergie de chauffage, de limiter les besoins en énergie pour l'eau chaude et de restreindre l'apport en énergie électrique pour l'électroménager.

Les apports d'énergie solaire passive (rayonnement qui pénètre par les parties vitrées) participent à ces économies. D'ailleurs, dans les bâtiments existants, une partie non négligeable de l'énergie pour le chauffage et l'éclairage provient du solaire passif. Pour un bâtiment traditionnel cette part est d'environ 5 à 10% de la consommation totale en énergie; mais dans des maisons dites solaires elle peut dépasser les 40%.

Cette part de l'énergie solaire passive est difficile à mesurer (en fait on l'évalue à partir de simulations) et elle n'est, de ce fait, pas comptabilisée dans la plupart des statistiques; elle n'y apparaît qu'à titre d'économie d'énergie et non pas à titre de production d'énergie.

Les énergies solaires qui apparaissent dans les comptabilités énergétiques comme "production d'énergie" et comme substitution aux énergies fossiles sont:

- la chaleur produite à partir de capteurs solaires (à eau, à air, plans, sous vide, etc.),
- l'électricité produite à partir de cellules photovoltaïques (PV).

Comme la plupart des statistiques ne comptabilisent pas l'énergie solaire passive, elles sous-estiment l'apport des énergies renouvelables. Il en découle que les subventions sont destinées principalement aux installations d'énergie solaire active (capteurs, PV) apparaissant comme production d'énergie renouvelable dans les statistiques. Ceci en défaveur, donc, de l'utilisation de l'énergie solaire passive.

Conclusion

En fait, c'est la phase d'étude du projet (dans laquelle les options et les concepts adoptés peuvent engendrer des économies, tant sur l'énergie que sur les matériaux) (figure 5) qui devrait bénéficier en priorité de toute l'attention, et des subventions, pour améliorer les constructions. Subventionner, par exemple, la production d'énergie par des capteurs revient à subventionner un bâtiment plus complexe.

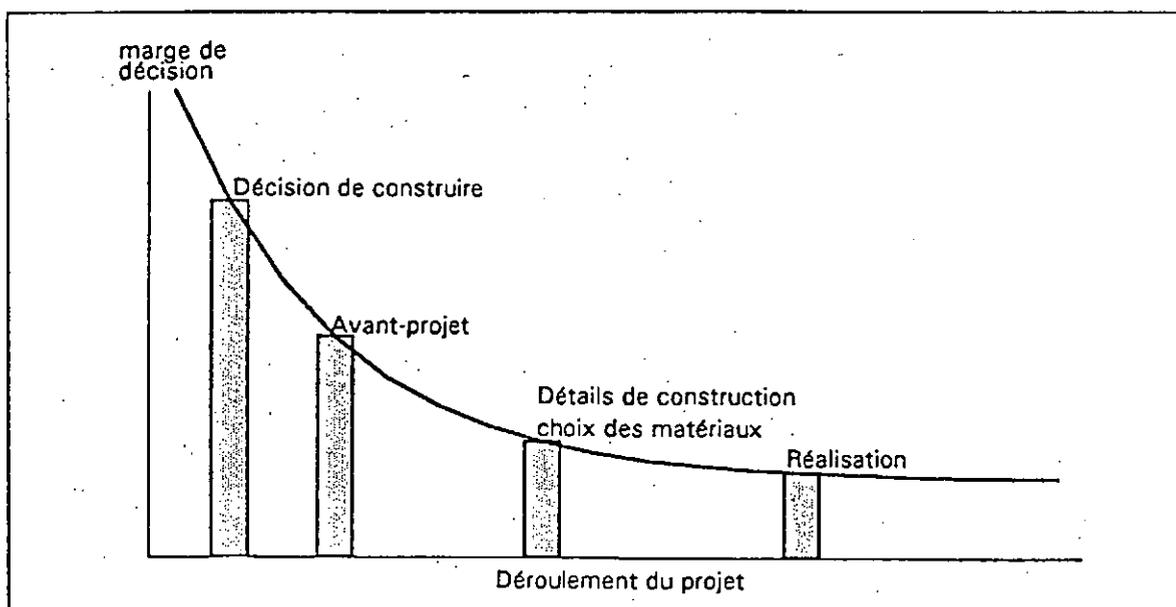


Figure 5, Représentation graphique de la diminution de la marge de manoeuvre lors de l'avancement du projet [10].

Favoriser un travail pluridisciplinaire lors de la phase d'étude (avant projet, projet), permettrait de gérer toute la complexité du bâtiment et, par la même, de donner à l'équipe pluridisciplinaire la possibilité de le simplifier avec, comme but ultime, d'obtenir des gains énergétiques, des gains économiques, un plus grand respect de l'environnement et une meilleure qualité de vie pour les habitants.

Malheureusement, aussi longtemps que la rémunération de l'étude est fonction du coût de l'ouvrage, elle favorise les constructions chères et récompense l'adjonction d'installations inutiles (une climatisation par exemple); elle pénalise la recherche de la simplicité et l'abaissement du coût global. Cette attention à la phase d'étude et ce travail pluridisciplinaire ne sont pas possibles dans ce mode actuel de rémunération.

La SIA est en train de remettre en cause les normes d'honoraires (pour d'autres raisons d'ailleurs) et cette réforme, espérons-le, devrait permettre de récompenser la qualité de l'étude.

Aujourd'hui, sans exagérer beaucoup, chaque bâtiment est un prototype. L'architecte réinvente la roue (repart à zéro) pour chaque projet, mais s'en remet aux entreprises de construction pour les détails et aux ingénieurs spécialisés ou aux installateurs pour l'éclairage, le chauffage la ventilation, les réseaux électriques etc. Le bâtiment n'est qu'une addition de composants.

Questionner le fonctionnement du bâtiment construit, répertorier, classer et analyser les réalisations permettrait de créer une base de données d'informations critiques qui, avec le cumul d'expériences, conduirait à développer des constructions de plus en plus économes en énergie, et pourvues de qualités architecturales et de fonctionnements meilleures.

Références

1. L'état de la planète 1995/1996, Worldwatch Institute, édition la Découverte 1995
2. Messprojekt Direktgewinnhaus Trin, Basler & Hofmann, 1996, Office fédéral de l'énergie
3. Das Energieautarke Solarhaus, Stahl, Goetzberger, Voss, C. F. Müller Verlag, 1997
4. Erfahrungen und Ergebnisse mit Einfamilienhäusern und kleine Siedlungen, Ueli Schäfer, conférence du 23 novembre 1995 à Bienne
5. Vers quel indice de dépense d'énergie, Commission énergie de la SIA et Energie 2000, 1996
6. Les maisons à faible consommation d'énergie doivent devenir la norme pour les constructions nouvelles et les transformations, H. Gahlmann, 1993Ch. 4, p13, résumé d'un atelier de travail mai 1989 de l'AIE
7. Energieperspektiven der Szenarien I bis III 1990 - 2030, Prognos AG, Basel, novembre 1996, Office fédéral de l'énergie
8. Gesamtbuchhaltung von drei Gebäude, Büro für Umweltchemie, Zürich, 1995, fiche Diane
9. Mobilität und Wohnen: Schritt zum Energiesparen, Erich Willi, Metron Verkehrsplanung und Ingenieurbüro AG, fiche Diane Oeko-Bau, Office fédéral de l'énergie
10. L'écologie dans les installations techniques du bâtiment, D 0118f, 1996, Société suisse des ingénieurs et des architectes
11. Vernacular examples of energy conscious design "The wooden houses of Ormont-Dessus", Willi Weber, Architectural Association, 1985

Annexe 1

Energie renouvelable dans l'architecture traditionnelle: chalet de la région d'Ormont-Dessus, Vaud [11]

"Ormont-Dessus", qui veut dire "au-dessus de la forêt", est une région des Alpes vaudoises, située entre 1000 et 3000m. d'altitude, dont la rivière principale est « la Grande Eau »

Depuis plus de 700 ans, les habitants ont développé un mode de vie approprié, utilisant au mieux les ressources de la région.

La ferme (chalet), lieu d'habitation et de travail, est étroitement dépendante, des ressources environnantes (matériaux de construction) et du climat.

Choix de l'implantation. La vallée est divisée en deux parties, selon l'exposition au soleil qui détermine un microclimat spécifique: le revers (orienté au nord), utilisé pour la production du bois. Chaque propriétaire y maintenait régulièrement une quantité de bois suffisante pour pouvoir reconstruire le chalet et pour couvrir les besoins en chauffage.

L'adroit (sud), où se dressaient les habitations et leurs pâturages.

La partie habitable du chalet est orientée au sud, pour profiter au mieux du soleil; d'ailleurs un bâtiment transgressant cette règle était surnommé le « mal tourné ».

Un avant-toit important côté sud protège la façade et le balcon de la pluie et crée un microclimat dans cet espace protégé et ensoleillé

Construction. Le travail des charpentiers a permis de développer un modèle d'habitation en bois, construction en madrier, suffisamment souple pour s'adapter à différentes localisations.

Une normalisation des éléments constructifs permettait la réutilisation et l'interchangeabilité des éléments dans le cas de dommages dus aux vents, aux avalanches ou au feu.

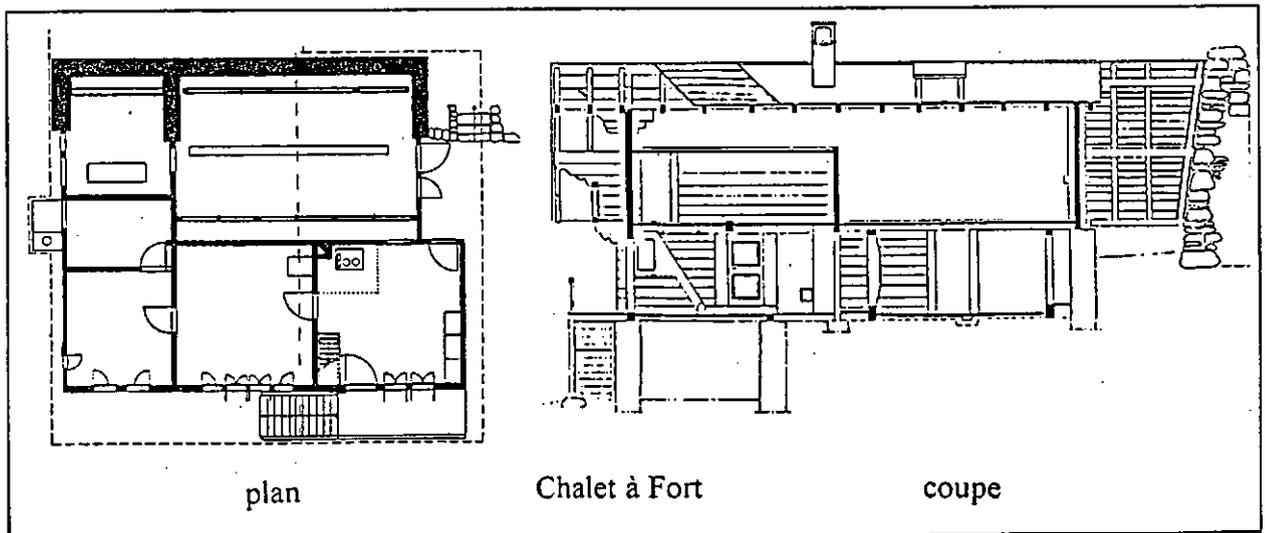
Les murs en madrier avaient un rôle de structure, d'isolation (k de 0,7 W/m²K) et permettaient d'éviter les ponts thermiques. Le madrier, toujours en plein coeur pour limiter les déformations, a des dimensions standard (environ 15 / 28 cm).

Entre deux madriers, une couche de mousse permettait d'éviter les infiltrations d'air.

Les fenêtres sont plutôt petites, protégées par des volets extérieurs et orientées au sud regardant le fond de la vallée.

Organisation du plan. L'organisation des chalets, du plus simple au plus complexe, suivait toujours les mêmes principes, soit une organisation concentrique des espaces, allant du plus chaud au plus froid:

1. zone de séjour et de travail où le confort maximum devait être assuré
2. au nord, contre le rocher, l'étable des vaches. La chaleur produite par les animaux maintenait une température minimum entre 10 et 15 °C.
3. en dessous, l'étable des chèvres qui, elles aussi, produisait de la chaleur
4. autour ou au-dessus de l'espace de séjour, les chambres, qui sont des espaces tempérés et qui profitent de la chaleur du séjour
5. grange et toiture froide, dont l'air et le foin isolent le haut du bâtiment.



Annexe 2

Maisons à consommation d'énergie nulle à Trin dans les Grisons [2]

Des trois maisons unifamiliales projetées à Trin par l'architecte Andrea Rüedi, deux seulement ont été réalisées. Elles sont situées dans une pente sud, bien ensoleillée et protégée au nord par une forêt de sapin, à 900 m d'altitude. Elles comportent chacune 200m² de plancher chauffé sur deux niveaux.

Concept énergétique. Le concept est adapté au climat bien ensoleillé (même en hiver) de Trin. Le bâtiment comporte pour son fonctionnement:

- 50 m² de vitrages spéciaux orientés sud ($k=0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$) qui doivent permettre, grâce à leurs gains solaires, de couvrir l'ensemble des besoins de chauffage;
- une enveloppe très bien isolée ($k=0.14$) et étanche aux infiltrations d'air;
- une masse de stockage suffisante pour une semaine sans soleil. Ce stockage est divisé en un stockage primaire (dalles et murs) et un stockage secondaire dans l'épaisseur des dalles composé de trois couches de blocs calcaires;
- des stores toiles pour la protection solaire estivale et l'éblouissement.

Matériaux de construction. Le choix des matériaux et de la structure s'est fait dans le but de minimiser l'énergie grise et de permettre une réutilisation des éléments lors de la démolition:

- bois pour le bardage extérieur, structure porteuse pour les planchers et la toiture
- plots silico-calcaire pour les murs, et le stockage
- chapes de béton non armé au rez-de-chaussée et à l'étage
- isolation types fibres minérales ou fibres de verre contre terre.

Usage. Ces habitations ont permis une vie familiale pendant plusieurs hivers sans qu'il soit besoin de recourir au poêle à bois, prévu pour compléter les apports solaires, si nécessaire.

1. La conception des habitations implique une participation active des usagers, notamment pour la gestion de la ventilation durant les périodes froides.

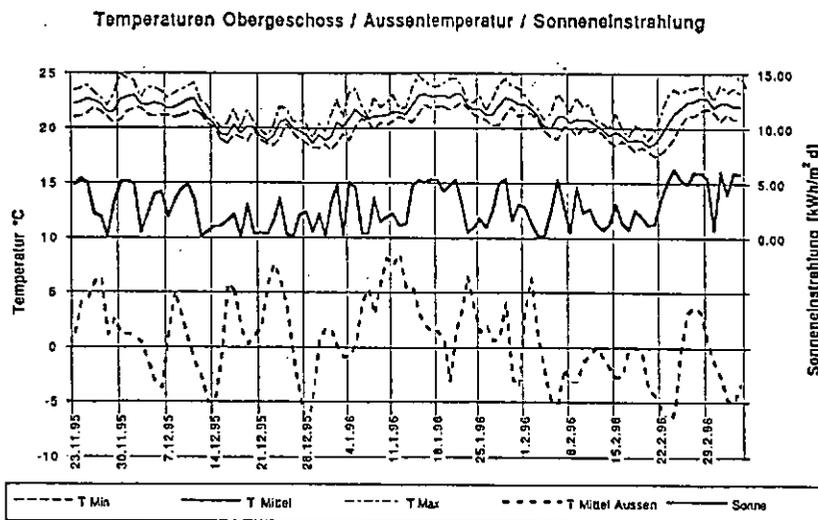


Abbildung 20: Verlauf der Minimal-, Maximal- und Mitteltemperatur im Obergeschoss, der Aussentemperatur sowie der Sonneneinstrahlung für die "Heizsaison" 95/96



Annexe 3

Nulenergiehaus de Freiburg en Brisgau [3]

La réalisation de cette maison en 1991 est due à l'initiative du Dr. A. Goetzberger, fondateur du Fraunhofer-Institut für Solar Energiesysteme. Le but de cette réalisation était de démontrer que même sous nos climats, l'énergie solaire pouvait satisfaire tous les besoins en énergie d'une construction et cela sans avoir besoin d'être raccordé à un réseau (gaz, électricité).

Cette construction est destinée à loger des étudiants et des enseignants et dispose également d'une salle de séminaire.

Concept énergétique. Cette construction intègre dans son concept tous les derniers développements dans le domaine de l'énergie solaire active et passive:

- isolation transparente;
- nouveaux récupérateurs de chaleurs sur air vicié à très bon rendement;
- composants électroniques économiques en électricité;
- production d'hydrogène à l'aide de cellule photovoltaïques.

Le choix de la forme et l'utilisation de l'isolation transparente permettent de limiter fortement les besoins en énergie de chauffage grâce à la bonne isolation et à l'énergie solaire passive. Les besoins restants sont couverts par la combustion de l'hydrogène, obtenue par électrolyse, grâce à l'électricité des cellules photovoltaïques.

Construction. Cette construction est organisée sur deux niveaux avec un sous-sol pour les installations techniques et une cave de rangement. Les principaux matériaux utilisés pour sa réalisation sont:

- structure en plots de ciments et béton;
- isolation en laine de verre;
- menuiseries en bois-aluminium;
- bardage de la façade nord en bois

1. L'énergie nécessaire à sa construction (énergie grise) est plus importante que pour une habitation traditionnelle. Près de la moitié provient de l'utilisation du métal (aluminium, armatures en fer).

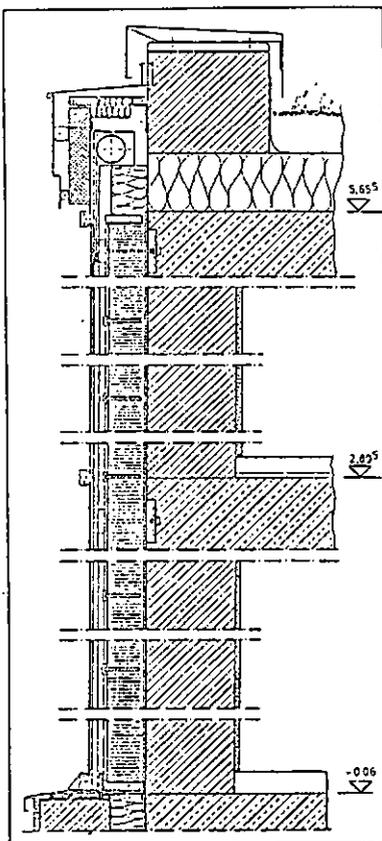


Abb. 4.8: TWD-Fassade im vertikalen Schnitt

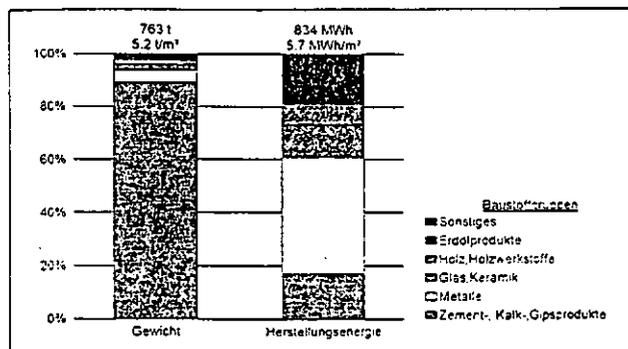


Abb. 7.2: Anteile unterschiedlicher Baustoffgruppen an Gewicht und Herstellungenergie des Energieautarken Solarhauses

-

.

.

Les applications du photovoltaïque, aujourd'hui et demain

André MERMOUD

Groupe de physique appliquée (GAP) et
Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)
19, avenue de la Jonction, CH - 1205 Genève
andre.mermoud@gap-e.unige.ch

1 Introduction

Nous aurions de la peine à imaginer aujourd'hui notre vie quotidienne sans électricité. Dans les pays industrialisés, elle imprègne l'ensemble des activités humaines au point de devenir un produit de toute première nécessité.

Si en Suisse elle est produite à près de 60% par des ressources renouvelables (hydraulique), il n'en est pas de même dans la plupart des autres pays, qui font appel au nucléaire ou aux énergies fossiles. A long terme, même en tentant de stabiliser la consommation, cette situation n'est évidemment pas viable, que l'on considère l'épuisement des ressources ou les nuisances (particulièrement la production de gaz à effet de serre et les déchets nucléaires).

Le problème devient encore bien plus épineux si l'on prend en compte les pays en voie de développement. Dans les années à venir, leur consommation en énergie est appelée à croître beaucoup plus rapidement que dans les pays déjà équipés. Pour les régions semi-industrielles et urbaines, ce développement ne pourra se faire - dans un premier temps - qu'en recourant aux solutions les plus économiques, c'est-à-dire les solutions classiques éprouvées depuis des décennies dans nos pays. Il est donc capital qu'à moyen terme, les pays industrialisés fassent un effort considérable vers des solutions énergétiques compatibles avec le développement durable.

Nous allons présenter les potentialités et les limitations d'un recours massif à la technologie solaire - et particulièrement photovoltaïque - pour contribuer à une substitution de la production d'électricité de réseau.

Le rôle de l'électricité est également important dans le développement des populations rurales des PVD. Dans ces régions, même en très petites quantités (en comparaison de notre boulimie), l'électricité génère déjà des services inestimables. Mais l'électrification rurale éloignée des centres urbains ne peut se concevoir par l'extension des réseaux, beaucoup trop onéreuse. Dans ces cas les solutions décentralisées doivent assurer un **service minimum**, faisant appel à de très petites unités de production dans lesquelles la technologie photovoltaïque est d'ores et déjà compétitive. Cependant, ce mode de fonctionnement a des implications économiques et sociologiques nécessitant une intervention forte d'instances extérieures (gouvernements, ONG), et la mise en place de réseaux de financement / distribution / maintenance / formation généralisés.

2 La situation actuelle du photovoltaïque

2.1 La production et les applications mondiales

Rappelons tout d'abord que la puissance d'un système photovoltaïque (PV) s'exprime en Wc. C'est la puissance délivrée par un module PV exposé à un rayonnement de 1 kW/m² (plein soleil).

La table 1 donne un aperçu de la production mondiale actuelle des modules PV. La production totale annuelle avoisine 90 MWc, soit moins d'un dixième d'une centrale nucléaire classique (1000 MW). Nous pouvons donc affirmer que l'industrie photovoltaïque, pour la production massive d'électricité, n'en est encore qu'à ses balbutiements.

	Gamme de Puissances	Ventes 1996 MWc	Fraction	Prix des modules \$/Wc
Grand public intérieur (Montres, calculettes, gadgets)	< 1Wc	4.2	4.7%	14
Grand public extérieur (automobile, lampes jardin, alarmes)	< 50Wc	12	13.4%	6.3
Professionnel isolé (Télécomm., mesure, signalisation)	10 Wc - 10 kWc	20	22.3%	5.1
Habitat isolé (Eclairage, radio-TV, pompage, frigos, dispensaires, ...)	100 Wc - 10 kWc	42	46.8%	4.5
Connexion réseau décentralisée (Toitures, façades)	1 kWc - 100 kWc	6.4	7.1%	4
Centrales solaires	> 50 kWc	5.2	5.8%	3.6
Total		90		488 M\$

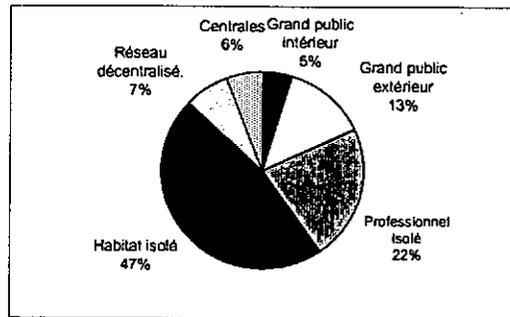


Table 1. Ventes mondiales de modules PV, selon leur destination

2.2 La situation actuelle en Suisse

La table et la figure 2 donnent le détail de l'évolution des installations PV en Suisse depuis 1990. Notons au passage que les ventes en Suisse représentent à peine plus de 1% du marché mondial des modules PV.

Un tiers est réservé aux installations isolées (essentiellement des résidences secondaires), la principale niche "naturelle" du photovoltaïque, pour laquelle la loi du marché peut s'appliquer.

Les deux tiers (en constante augmentation depuis 1990) sont des installations couplées au réseau, destinées à la production d'énergie en "concurrence" avec l'énergie de réseau. Les lois du marché ne permettent pas de justifier ce développement d'un point de vue strictement économique: le coût du kWh solaire (de l'ordre d'un franc/kWh ou plus) est encore sans commune mesure avec le coût de l'électricité de réseau (15 à 25 ct. environ, prix consommateur, ou 5 - 6 ct. à la production). Soulignons néanmoins que les coûts moyens "officiels" de production s'appliquent aux centrales hydrauliques – largement amorties – et à la production nucléaire, qui n'intègre que marginalement les coûts de gestion des déchets ou de démantèlement.

Le marché du PV raccordé au réseau est donc actuellement porté par les tendances suivantes:

- Une attitude volontariste de certains milieux soucieux de l'environnement (privés, communes, entreprises, plus récemment entreprises de distribution d'électricité) et/ou un désir d'image de marque.

- Un désir d'autonomie énergétique, qui ne se justifie d'ailleurs pas au niveau individuel dans la mesure où les systèmes actuels liés au réseau ne peuvent fonctionner de manière autonome.
- Des politiques de tarification particulières, consenties par certaines entreprises de distribution ou imposées par certaines collectivités (cantons ou communes) visent à diminuer le fossé entre coût du kWh renouvelable et le prix de revente. Pour être vraiment efficaces, ces mesures doivent être assurés à long terme, les financements devant être planifiés sur la durées de vie de l'installation, soit plus de 20 ans.

C'est pourquoi le marché montre une très forte dépendance des subventions (fédérales et cantonales). Le programme de subventions de la Confédération (dans le cadre de Energie 2000, conséquence du moratoire sur le nucléaire décidé par le peuple suisse en 1990), a permis de développer une industrie et un équipement de 6.2 MW couplés au réseau, notamment avec environ 300 "toits solaires PV" décentralisés (3 kWc), ainsi que quelques installation dans la gamme des dizaines ou centaines de kWc. L'objectif affiché par Energie 2000 était d'assurer 0.5% de la production électrique en l'an 2000 par des sources renouvelables (hors hydraulique), dont la moitié par le PV. Nous atteignons en 1996 à 6.33 GWh/an, soit 0.013 %.

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996 (estim.)
Installations :								
Isolé domestique (résidentiel: maisons de vacance)	kWc cumulés	1287	1596	1720	2019	2272	2539	
Isolé professionnel (communications, services, agricole)	kWc cumulés	69	84	90	106	120	134	
Total Isolé	kWc cumulés	1355	1680	1810	2125	2392	2673	2994
Réseau centralisé (terrain dédié)	kWc cumulés	10	50	895	1120	1120	1350	
Réseau décentralisé (habitat, édifices commerciaux)	kWc cumulés	790	1750	2205	2880	3680	4050	
Total connecté au réseau	kWc cumulés	800	1800	3100	4000	4800	5400	6200
Puissance totale installée en Suisse	kWc cumulés	2155	3480	4910	6125	7192	8073	9194
Fraction Réseau		37.1%	51.7%	63.1%	65.3%	66.7%	66.9%	67.4%
Installation nouvelles	kWc	860	1325	1430	1215	1067	881	1121
Energie produite (install. réseau)	GWh	1.12	1.98	3.03	4.04	4.78	5.68	6.33
Consommation suisse d'électricité	GWh	46578	47586	47866	47239	46897	47882	48000
Fraction PV de la consommation suisse		0.002%	0.004%	0.006%	0.009%	0.010%	0.012%	0.013%

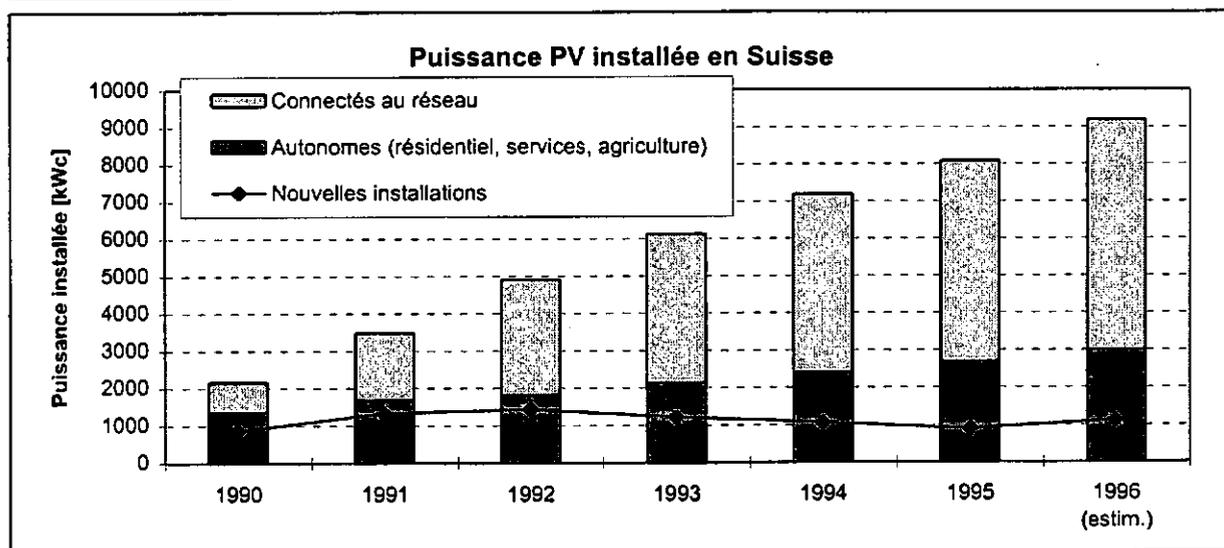


Fig. 1. Situation des installations photovoltaïques en Suisse (d'après el et [2])

Le subventionnement de systèmes PV de production énergétique peut se justifier aujourd'hui non pas par les bénéfices énergétiques immédiats, mais surtout par le souci d'assurer un

développement progressif de cette filière énergétique en vue d'une utilisation massive au siècle prochain. Les principaux acquis obtenus jusqu'ici sont:

- L'accélération du développement de la technologie des cellules et des panneaux,
- L'intégration dans le bâtiment,
- La mise au point des technologies de conditionnement de puissance (onduleurs, régulation, panneaux AC, etc.), particulièrement en Suisse,
- La standardisation des composants et des procédures.

Les démonstrations de faisabilité technique, et les tentatives d'organisations et de montages financiers viables, sont un préalable essentiel à l'acceptabilité d'une nouvelle technologie par les instances de décision.

2.3 Situation dans les autres pays industrialisés

Si la Suisse a été relativement pionnière dans le développement de systèmes PV couplés au réseau, de nombreux autres pays ont mis sur pied des grands programmes nationaux. Citons en particulier l'Allemagne (programme de 1000 toits PV), le Japon (grand projet de 70'000 toitures PV d'ici l'an 2000), les Etats-Unis (besoin de climatisation en phase avec la production solaire), l'Italie avec quelques grandes centrales de plusieurs MWc, etc. (réf. [3]). Dans l'ensemble de ces pays de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie, représentant plus du 80% du marché mondial, où a été réalisée cette étude), les installations isolées - domestiques ou industrielles - forment les 2/3 du parc total.

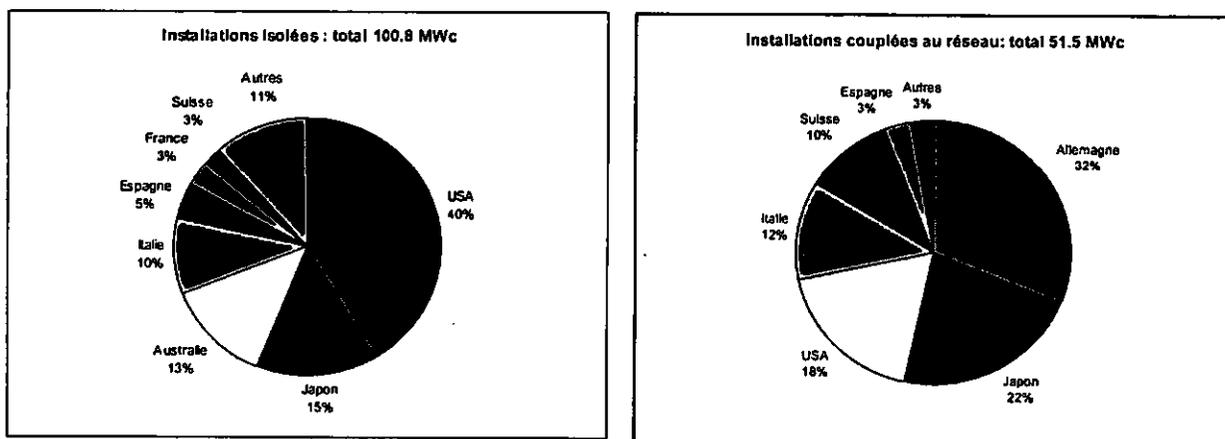


Fig. 2. Répartition des installations PV dans les pays de l'AIE, en 1995

3 Pays en voie de développement

Plus de 2 milliards d'hommes et femmes vivent actuellement dans des zones rurales non desservie par des réseaux d'électricité. Pour cette population un apport même minime d'énergie électrique représente un service inestimable, indispensable au développement social (éducation, santé, rendements agricoles). C'est pourquoi l'électrification rurale décentralisée est de plus en plus à l'ordre du jour dans les programmes d'aide au développement.

Citons le programme d'électrification de 90 millions de chinois par des micro-centrales hydroélectriques dans les zones montagneuses depuis 1980; le Mexique, où plus de 30'000

familles bénéficient de l'électricité photovoltaïque dans le cadre d'un programme national; ou le programme marocain PPER (Programme Pilote d'Electrification Rurale Décentralisée) qui tente de jeter les bases techniques, sociales et économiques en vue de l'électrification de 39'000 hameaux isolés de 30 à 150 foyers (14 millions d'habitants) (cf. [4] et [5]).

Les principaux besoins, susceptibles d'être couverts par des installations décentralisées de production d'électricité, sont:

- Au niveau familial: l'éclairage (lampes fixes ou mobiles), la radio/télévision, et beaucoup plus rarement la réfrigération, bien trop gourmande en énergie.
- Dans les collectivités locales (écoles, dispensaires, lieux de culte, bâtiments administratifs): l'éclairage, la réfrigération des médicaments ou vaccins, la sonorisation, les communications, l'informatique, l'éclairage public.
- Les équipement collectifs de gestion et production agricole: pompage de l'eau (unités de un à quelques kW), mouture du grain, réfrigération du lait, etc...

La plupart de ces installations sont organisées autour d'un parc de batteries chimiques, qui peut être alimenté par divers moyens de production selon les ressources locales: petites centrales hydrauliques, éoliennes, photovoltaïque, moteur + alternateurs (essence, diesel ou idéalement biogaz!).

Les solutions techniques pour l'organisation de la distribution sont nombreuses. Elles dépendent de la puissance requise et de l'extension géographique des utilisateurs potentiels. Pour les besoins les plus limités (2 ou 3 lampes par famille, télé et radio) et les habitats dispersés, de nombreux projets sont articulés autour de "stations-service" (en général photovoltaïques), dans lesquelles les usagers louent des "boîtes énergie" constituées d'une batterie et son régulateur de décharge, et la font recharger périodiquement. De telles stations peuvent aussi recharger des appareillages spécifiques (lampes portables avec batterie, petits accumulateur Ni-Cd en remplacement de piles, etc).

D'autres collectivités locales installent des micro-réseaux d'une extension de quelques dizaines de mètres (basse tension oblige), ou encore les installation PV complètes (panneaux, batterie, régulateur) individuelles.

L'utilisation de cette énergie rare doit être optimisée par l'emploi d'appareils performants, fournissant un service maximum pour un coût énergétique minimum (lampes fluorescentes, petits réfrigérateurs super-isolés, etc). Le coût des services nécessitant l'électricité en milieu rural est très élevé, de 20 à 1500 fois (piles) celui du même service sur un réseau interconnecté. Une famille marocaine rurale dépense jusqu'à 40% de ses revenus en piles pour la radio et la télévision. On comprend dès lors le progrès que peut représenter l'apport de l'énergie photovoltaïque, sous forme de kit familial ou collectif, ou même sous forme de station-service de recharge de batteries.

A noter la très grande disparité du rapport coût/service, pour les équipements traditionnels. A titre d'exemple, la table 2 donne les coûts d'usage de divers modes d'éclairage au Maroc[4]. On constate que l'électrification PV - avec une participation financière de l'Etat dans les investissements initiaux, mais qui se réduit à 1/3 des coûts sur 20 ans d'exploitation - devient compétitif pour un service de meilleure qualité.

Usage	Puissance	Durée		Coût	Coût de
	lumineuse	d'éclairage		horaire	l'énergie
	lumen	heures		CHF/heure	CHF/kWh
Batterie 75Ah + lampe fluo	400	112	h/recharge	0.050	6.3
Lampe BUTAGAZ	300	42	h/bouteille	0.065	11
Lampe à pétrole	45	33	h/litre	0.027	30
Lampe torche (2*R20)	7	18	h/ 2 piles	0.053	375
Grande bougie	1	8	h	0.017	825
Petite bougie	1	2.7	h	0.017	825

Table 2. Coût de l'éclairage traditionnel (sur la base de la puissance lumineuse électrique, équivalente d'une lampe fluorescente, 50 lm/W)

Le problème fondamental de ce développement est évidemment le financement. Dans une installation solaire l'investissement initial atteint 90% des coûts (panneaux, batteries, réseau, appareils): comme si l'on achetait d'un seul coup toute l'électricité pour 20 ans ! Cette conception est évidemment incompatible avec les modes de vie ruraux, et nécessite des organismes de financement prêts à s'engager sur une telle période.

La réussite d'un programme d'électrification rurale est donc conditionnée par une infrastructure technique, éducative, sociale, juridique, économique (commerciale) et administrative solide. Nombre de systèmes PV isolés, installés dans les années 80 par des ONG, ne fonctionnent plus actuellement.

Les points clés de l'infrastructure à mettre en place sont:

- L'information des usagers,
- La motivation des usagers par leur participation financière (même modeste),
- La formation et le suivi d'un service technique compétent sur le terrain,
- La fabrication indigène de composants (lampes, batteries, panneaux?, etc.),
- Des systèmes commerciaux et/ou administratifs efficaces (prise en charge du programme d'électrification par des structures associatives, collectivités locales, structures commerciales, etc),
- Un cadre juridique capable d'assurer la pérennité des institutions,
- Une aide extérieure surtout au niveau du financement initial.

L'équipement des régions rurales est donc une niche privilégiée pour le développement de la filière photovoltaïque (plus de 20 GWc pour un équipement de 10Wc par personne), générateur d'un service fondamental nécessaire au développement, et qui conduira certainement à une conception énergétique plus compatible avec la notion de développement durable que dans nos régions industrialisées.

4 Production d'électricité de réseau à moyen terme

Après avoir défini les caractéristiques spécifiques de la production photovoltaïque, nous passerons en revue diverses limitations à son emploi généralisé, de la moins contraignante à la plus restrictive.

Pour comprendre les possibilités et les limitations de la contribution future de l'énergie photovoltaïque dans la production d'énergie de réseau, nous prendrons l'exemple de la Suisse,

dont la structure de consommation est représentative de nombreux pays industrialisés aux moyennes latitudes. Par contre, nous verrons que ses capacités de stockage en lacs d'altitude sont un atout majeur pour une utilisation généralisée du PV.

4.1 Le gisement solaires

L'énergie solaire incidente (disponible) est caractérisée par :

- Son caractère diffus (limité à 1 kW/m^2),
- Sa variabilité dans le temps (variabilité diurne et variabilité saisonnière),
- Sa variabilité géographique (latitude et météo),
- L'influence de l'orientation et de la disposition des panneaux (sheds, etc...).

La fig. 3 trace l'énergie journalière maximale sur plan horizontal, pour le cas idéal d'un jour clair, en fonction de la saison et pour différentes latitudes.

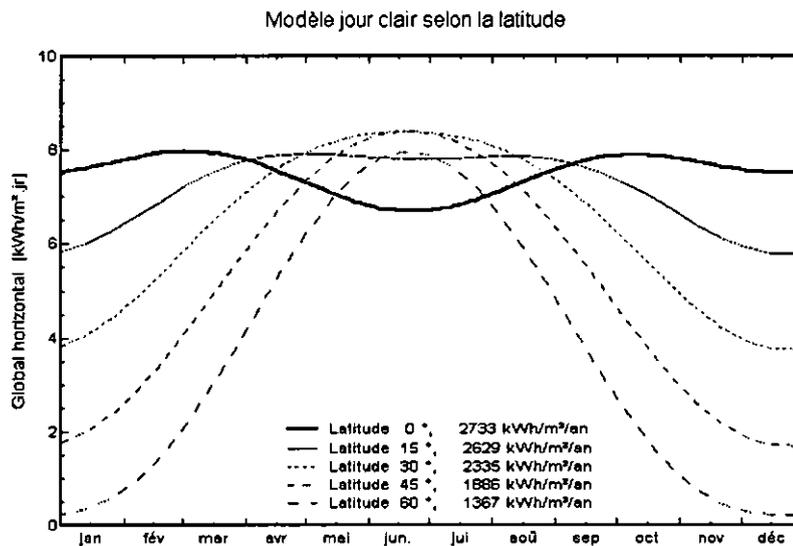


Fig. 3. Modèle "Jour clair" selon la latitude [6]

On constate que pour les régions intertropicales, l'énergie solaire des meilleures périodes n'est pas plus élevée qu'ailleurs. Par contre, elle est *bien distribuée sur toute l'année*, alors que plus on monte en latitude plus l'effet saisonnier est marqué. Cette caractéristique est accentuée par l'influence de la météo, qui renforce la nébulosité hivernale dans les zones tempérées à moyennes latitudes.

La figure 4 montre l'énergie annuelle réellement disponible pour différents sites d'Europe, Afrique et Asie, relativement au maximum envisageable par beau temps. Les régions les plus favorisées (tropicales) bénéficient d'un ensoleillement de l'ordre de 2000 kWh/an, moins du double de chez nous. Les régions équatoriales, malgré une excellente répartition annuelle, sont plus touchées par la nébulosité. Les zones au-delà du 50^{ème} parallèle sont peu propices à l'utilisation massive de l'énergie solaire, du moins durant les périodes hivernales.

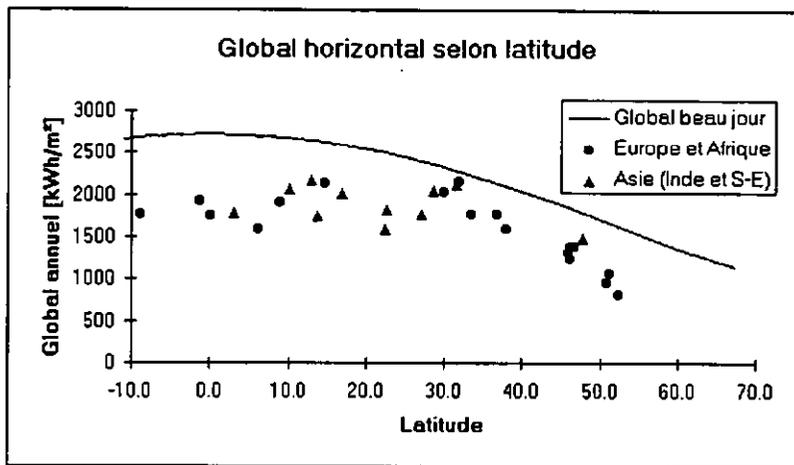


Fig. 4. Energie annuelle selon la latitude

Enfin, la fig. 5 montre la répartition de l'énergie solaire mensuelle pour Genève et Dakar. A Genève, même en inclinant les panneaux vers le sud, on ne peut espérer obtenir plus de 1 kWh/m² par jour en hiver, alors qu'à Dakar l'ensoleillement varie entre 5 et 7 kWh/m²·jour.

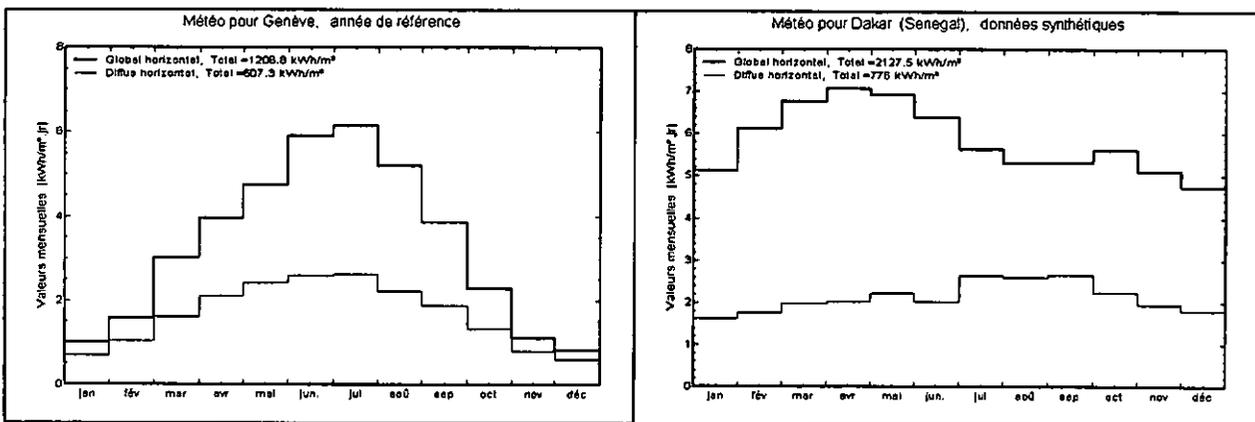


Fig. 5. Météo mensuelle pour Genève (46°N) et Dakar (15°N)

L'énergie incidente sur les panneaux dépend également de leur orientation et leur disposition. A Genève par exemple, l'inclinaison optimale annuelle est de 30°sud, avec un gain de 15% environ, alors qu'une façade sud ne captera que 70% de la valeur de rayonnement horizontal. Une disposition en sheds perd environ 5% de rayonnement, essentiellement par occultation du diffus et de l'albédo.

4.2 Puissance et énergie, facteur d'utilisation

Pour pouvoir effectuer des comparaisons avec les besoins énergétiques et les autres sources d'énergie, il faut préciser les notions de puissance installée et énergie, telles qu'on les utilise dans le cas du photovoltaïque.

On caractérise en général une installation PV par sa **puissance de crête**, soit la puissance nominale que doivent délivrer les panneaux PV sous une irradiation de 1 kW/m², (perpendiculairement aux rayons du soleil) et à 25°C. La puissance réelle utilisable (fournie à

l'utilisateur) dans ces conditions idéales est pénalisée par la température de fonctionnement des panneaux (-0.4% par degré), la qualité des panneaux par rapport aux données du fabricant, l'efficacité du système de conversion, les pertes des conducteurs et de la régulation, etc. Elle ne dépasse guère 85% de la puissance nominale en plein soleil, et 75% en moyenne annuelle.

Pour caractériser l'énergie fournie par une installation PV, on peut admettre que l'énergie utile est directement proportionnelle à l'énergie incidente sur les panneaux. Dans ce cas, l'énergie fournie par une irradiation incidente de 1 kWh/m² est équivalent au fonctionnement de l'installation à sa puissance nominale pendant une heure.

Ainsi une installation PV de 1 kWc installée à Genève et bien orientée (recevant 1350 kWh/m² · an) devrait fournir annuellement 1350 kWh/m² · 75% = 1012 kWh/an, soit une **puissance moyenne de 115 W**. Dans la réalité, la production moyenne des installations suisses, toutes orientations et qualités confondues, est de 825 kWh/kWc·an, soit une puissance moyenne de 83 W. Nous définissons alors un "**facteur d'utilisation**" comme le rapport de la puissance moyenne annuelle obtenue à la puissance nominale installée.

Ainsi, sous nos latitudes, le facteur d'utilisation d'une installation solaire ne dépasse pas 7% (façade sud) à 12 % (orientation et installation optimisées). D'autre part, cette production reste concentrée sur les périodes estivales. Dans les régions tropicales, par exemple à Dakar, le facteur d'utilisation pour un plan fixe à 15° sud est de 18 %, et peut atteindre 25% avec un plan suiveur.

Ceci est à comparer avec une installation classique de production d'énergie (centrales thermiques ou nucléaire, barrages au fil de l'eau), dont le facteur d'utilisation avoisine 80 à 95%. Ainsi en Europe, hors problèmes de stockage, la production d'une centrale nucléaire de 1 GWe correspond à celle d'un parc photovoltaïque de l'ordre de 10 GW_c.

4.3 Surfaces disponibles

Prenons pour base cette puissance installée de 10 GW_c. Considérant le rendement actuel des panneaux PV - de l'ordre de 12% - elle représente une surface sensible de 83 km². A l'horizon 2010, le rendement devrait atteindre 16%, ce qui ramènera la surface nécessaire à 62 km².

	Superficies		Potentiel installations PV (rendement 16%)	
	Suisse km ²	Genève km ²	Suisse GWc	Genève GWc
Superficie totale	41'284	282	6'605	45.1
Bâtiments	1'186	44	190	7.0
Aires industrielles	147	4	24	0.6
Transports	801	18	128	2.9
Maisons individuelles				
Toitures, utilisabilité 0.9	22		3.5	
Toitures, utilisabilité 0.7	47		7.5	

Table 3. *Superficies caractéristiques en Suisse et à Genève*

La table 3 donne un aperçu des surfaces construites et/ou susceptibles d'être équipés d'installations solaires en Suisse. On constate que le potentiel est considérable, et que les surfaces disponibles ne constituent en aucun cas une limitation ([7], [8]).

4.4 Consommation suisse d'électricité

La table 4 donne un résumé des structures de la production et de la consommation d'électricité en Suisse [9]. Il faut rappeler que dans les outils de production disponibles en Suisse, seules les centrales hydrauliques à accumulation sont susceptibles de variations rapides de puissance. Elles permettent à la Suisse de jouer un rôle important dans la régulation journalière du réseau européen, en important du courant la nuit (au besoin pour pomper de l'eau dans les barrages) et en le réexportant la journée. La consommation globale par habitant s'est stabilisée depuis 1990 à environ 770 W/personne..

	Valeurs globales		Valeurs par habitant		Quote part
	Energie GWh	Puissance GW	Energie MWh / hab.	Puissance W / hab.	
Consommation totale (toutes énergies)	222'756 (801'920 TJ)	25.4	31.5	3'592	dont 21.4% d'électricité
Production d'électricité	58'838	6.7	78.3	949	100.0%
Centrales nucléaires	23'486	2.7	3.3	379	39.9% / Production
Hydraulique fil de l'eau	16'148	1.8	2.3	260	27.4% / Production
Hydraulique accumulation	17'929	2.0	2.5	289	30.5% / Production
Centrales thermiques	1'275	0.1	0.2	21	2.2% / Production
Consommation d'électricité	47'882	5.5	6.8	772	100.0%
Ménages	14'680	1.7	2.1	237	30.7% / Consomm
Industries et agriculture	17'005	1.9	2.4	274	35.5% / Consomm
Services	12'280	1.4	1.7	198	25.6% / Consomm
Transports	3'917	0.4	0.6	63	8.2% / Consomm
Divers					
Bilan Export - Import	7'271	0.8	1.0	117	12.4% / Production
Pertes de distribution	3'685	0.4	0.5	59	6.3% / Production
Capacité des bassins d'accumulation	8'435		1.2		17.6% / Consomm.

Table 4. Production et consommation suisses en 1995 (population 7'080'000 habitants)

Pour comparaison, la table 5 détaille la production des installations PV existantes en 1995, et la situation hypothétique d'un parc national de systèmes PV de 10 GWc (atteignable à l'horizon 2035 - 2050, cf paragraphe 4.8).

	Valeurs globales			Valeurs par habitant		Quote part
	Puissance installée MWc	Energie GWh	Puissance moyenne MW	Puissance installée Wc / hab.	Puissance moyenne W / hab.	
Installations PV existantes :						
Total 1995	8.07	6.66	0.760	0.94	0.11	0.014% / Consomm
Installations réseau	5.40	4.46	0.509			67% / install. PV
Installations autonomes	2.67	2.21	0.252			33% / install. PV
effic. 11% => surface environ	73'000	m ²		0.01	m ² / hab.	
Parc PV hypothétique (horizon 2035 - 2050)	10'000	8'250	942	1'412	133	17% / Consomm
effic. 18% => surface	56	km ²		7.8	m ² / hab.	1995

Table 5. Installations PV en 1995, et prospective pour 10 GWc

4.5 Structure journalière de la consommation

Le profil journalier de la consommation suisse est relativement semblable à toutes les périodes de l'année. La fig. 6 en donne un exemple pour un mercredi du mois de mars (réf

[9]). La consommation nocturne avoisine 6000 MW, et atteint 8000 MW en milieu de journée. La dynamique susceptible d'être comblée par la contribution solaire n'est donc que de 2000 MW.

On voit également sur cette figure la structure de production : une base constante est assurée par les centrales nucléaires, thermiques et au fil de l'eau. Les centrales à accumulation sont réduites la nuit (avec importation du courant), et couvrent la surconsommation intérieure tout en contribuant à l'exportation durant la journée.

A cette période on importe la nuit car les barrages sont vides. Durant l'été et l'automne le courant d'importation est utilisé la nuit pour le pompage d'accumulation. La puissance de pompage maximale en 1995 était de l'ordre de 600 MW.

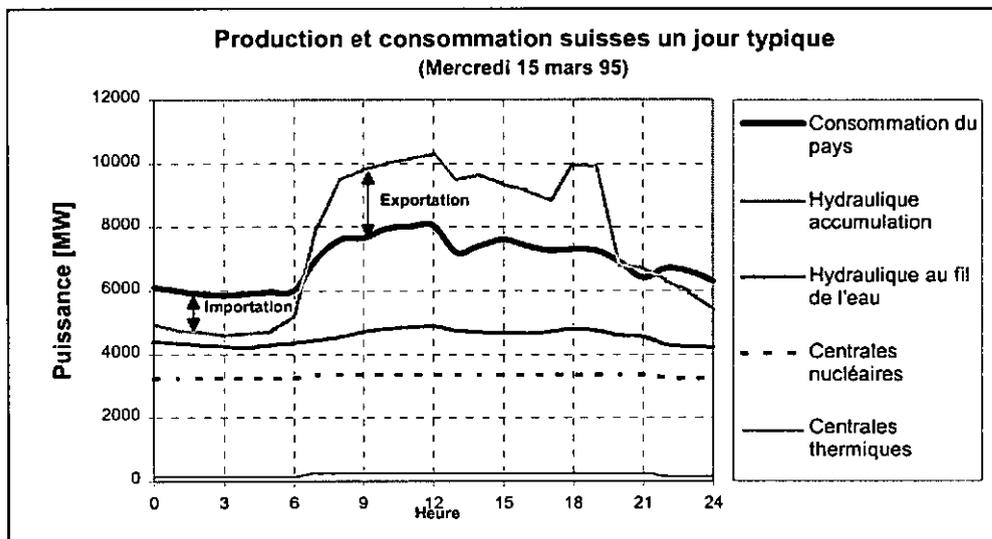


Fig. 6. Profil de consommation et structure de la production

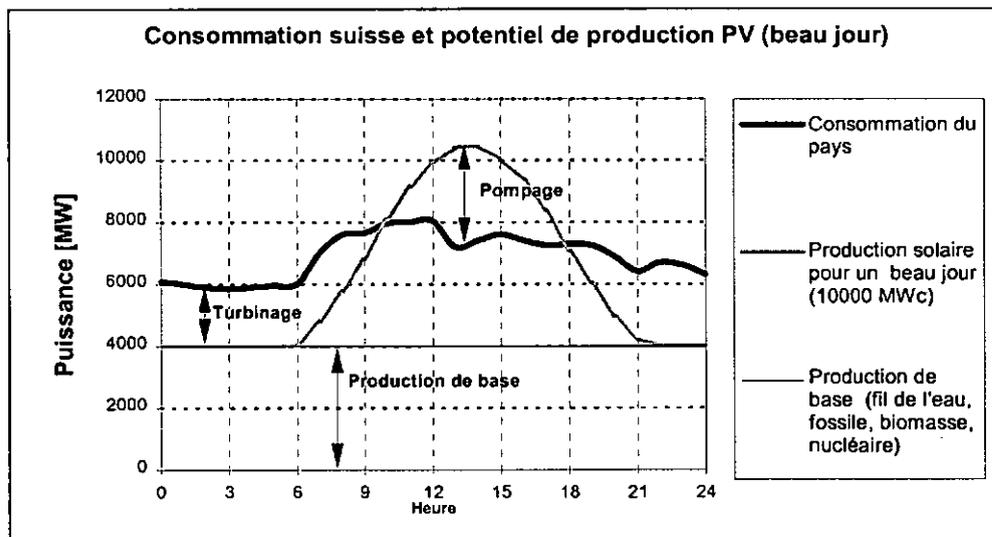


Fig. 7. Profil de consommation et production solaire d'un beau jour

Prenons maintenant l'hypothèse d'un parc photovoltaïque couplé au réseau de 10'000 MWe (avec une distribution d'installations de diverses orientations et une efficacité moyenne de 85%). Durant un beau jour de juin, généralisé sur toute la Suisse, la production PV de pointe dépassera 6000 MW (fig 7). Une telle situation se présentera assez rarement; le plus souvent la moyenne des conditions météorologiques sur le pays entier ne permettra pas d'atteindre de telles puissances de pointe.

Néanmoins, selon le niveau de la production de base, il faudra alors stocker l'énergie en excès par pompage. En effet, si le gestionnaire du réseau ne peut contrôler la production PV décentralisée, il sera contraint d'absorber la puissance supplémentaire. Dans ce cas, le facteur limitatif sera la **puissance installée de pompage**. Dans l'exemple ci-dessus (hypothétique), elle devrait être portée à plus de 3000 MW, ce qui représente la puissance cumulée de toutes les centrales à accumulation actuelles! Or le pompage n'est pas possible sur tous les sites de montagne: il nécessite la mise en œuvre d'un réservoir-tampon au bas de l'installation. La puissance de pompage et la capacité des réservoirs-tampon seront donc vraisemblablement des conditions importantes au développement du parc PV.

Pour absorber cette puissance excédentaire, nous ne comptons pas sur l'exportation, car on peut supposer que nos voisins européens disposeront de parcs PV équivalents pour couvrir leur propre consommation.

4.6 Structure annuelle de consommation

Le niveau de production des centrales de base (sauf fil de l'eau) peut être programmé sur quelques jours. Il devra être optimisé en fonction de la production PV prévisible et la disponibilité des réserves hydrauliques. La capacité totale des réservoirs hydrauliques de la Suisse s'élève actuellement à environ de 8'500 GWh (18% de la consommation 1995). Les lacs sont pleins au mois de septembre (fonte des neiges), ils sont exploités durant l'hiver et épuisés à fin mars.

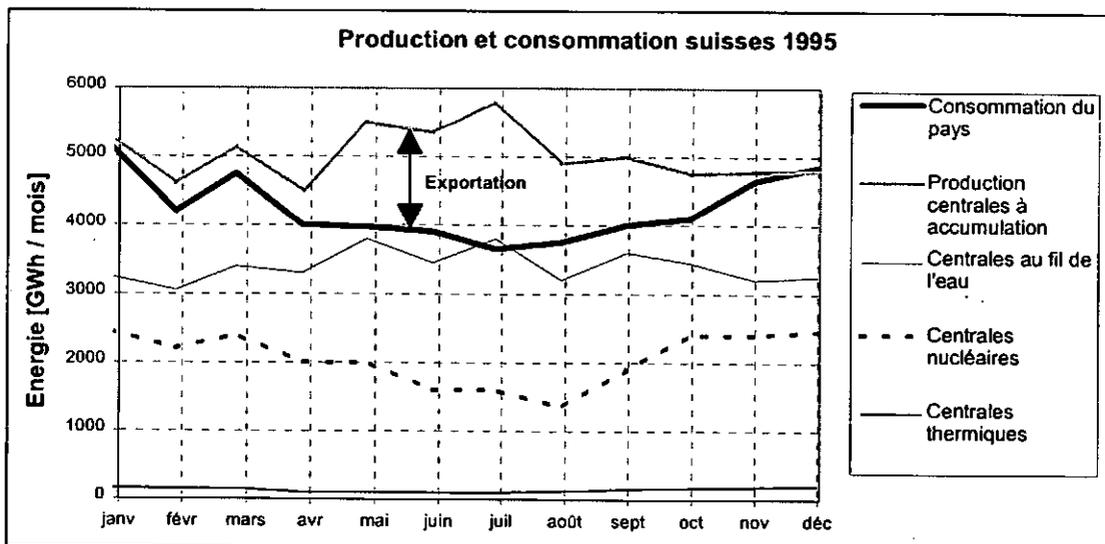


Fig. 8. Consommation et production suisses en 1995

La fig. 8 montre l'évolution de la consommation et de la production annuelles en Suisse. Contrairement aux pays voisins qui ont opté pour le chauffage électrique des locaux, la dynamique de consommation électrique été/hiver n'est en Suisse que de 25% environ. Néanmoins, la période estivale correspond au minimum de consommation, et concorde aussi

avec une production hydraulique importante. L'utilisation estivale des centrales d'accumulation est actuellement largement dédiée à l'exportation.

La fig. 9 indique que la production photovoltaïque envisagée permettrait de couvrir la consommation suisse (actuelle) durant plus de 5 mois d'été, sans recours à d'autres sources que l'hydraulique. Malheureusement l'énergie PV estivale ne peut guère servir à économiser les réserves hydrauliques pour en prolonger l'usage durant l'hiver, puisque les barrages sont pleins dès fin septembre. Il reste donc un complément à trouver pour la période hivernale. Ce complément est parfaitement en phase avec les besoins de chauffage, il pourrait faire appel au gaz naturel (ou l'hydrogène stocké) avec une contribution importante de groupes chaleur-force ou piles à combustibles décentralisés.

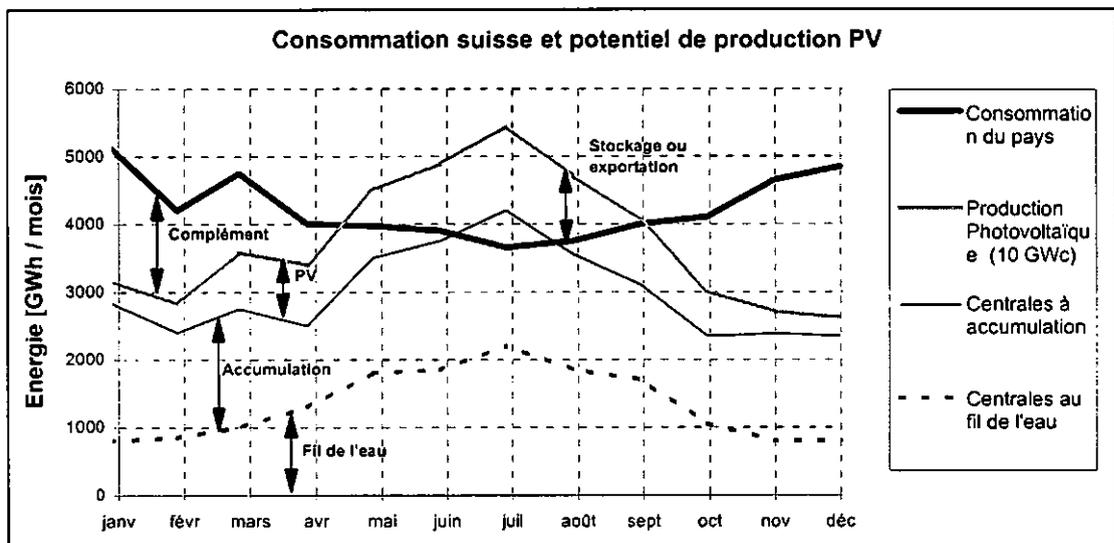


Fig. 9. Profil annuel de consommation et production solaire

4.7 Stockage

En conclusion de ce qui précède, la variabilité intrinsèque des apports solaires limitera probablement à terme la pénétration des filières solaires (et particulièrement photovoltaïque) dans les réseaux électriques, à des niveaux de 15-25 % selon les possibilités de stockage, tant en volume qu'en puissance instantanée.

Or les techniques de stockage de l'énergie électrique actuellement envisageables sont essentiellement :

- Le **pompage-turbinage**, technique éprouvée avec un rendement de plus de 70%, nécessite deux réservoirs à des niveaux d'altitude très différents (plus de 1000 m). Son emploi serait limité à un stockage à court terme (jour-nuit). Il ne peut contribuer au stockage saisonnier puisque les volumes de stockage disponibles sont déjà complètement remplis de manière naturelle à la fin de l'été. Dans ce cadre, la Suisse est favorisée par son potentiel unique, mais les volumes et puissances nécessaires sont encore à développer.
- L'**hydrogène**: le rendement de production par électrolyse est de l'ordre de 70%, et la restitution de l'électricité par piles à combustibles peut atteindre des efficacités de 50 à 60%. Avec les pertes intermédiaires, on ne peut guère espérer un rendement global du

cycle supérieur à 35%. Ce qui signifie que pour obtenir la même quantité d'électricité après stockage il faudra multiplier la puissance PV installée par un facteur 3 ! Néanmoins, dans l'optique d'un stockage saisonnier (utilisation hivernale), la chaleur résiduelle des piles à combustible pourrait être récupérée pour le chauffage des locaux. L'hydrogène pourrait être stocké à long terme et transporté sur de longues distances (production dans les régions désertiques tropicales et transport par pipe-lines), et pourrait également servir de carburant dans des véhicules électriques.

- Le stockage en **batteries chimiques** semble inadapté à l'échelle d'un réseau.

4.8 Gestion du réseau

En outre viennent s'ajouter des difficultés d'ordre technologique: la gestion du réseau électrique doit assurer un équilibre délicat, en adaptant à tout instant la production à la consommation. On mesure la difficulté d'y intégrer une source de production aussi diffuse, variable (météo, heure, lieu) et incontrôlable (difficile de "couper" la production du fait de la décentralisation).

D'autre part, par rapport à la distribution relativement centralisée actuelle, la décentralisation peut engendrer des transports de puissance importants de manière transversale dans le réseau, nécessitant le renforcement des lignes de distribution en fonction de la densité des producteurs raccordés, et dimensionnés pour les puissances nominales de crête.

Ces remarques ne concernent pas les pays très chauds, où la production solaire est parfaitement en phase avec les besoins de climatisation. Dans cette situation le développement du PV est particulièrement adapté et atteindra très rapidement le seuil de rentabilité, dans la mesure où il permettra de soulager certaines lignes de transport. La pénétration d'un parc photovoltaïque pourrait y être beaucoup plus important (30 à 40% ?).

4.9 Le développement industriel

Le développement de la filière PV est nécessairement dépendant des possibilités technologiques et industrielles. Or l'industrie photovoltaïque n'en est encore qu'à ses débuts: la production mondiale 1996 est de 90 MWc. Elle a progressé de 15% par an durant la dernière décennie. La table 6 indique les conditions et possibilités de croissance du marché mondial à l'horizon 2010 [10].

Croissance nécessaire :		... pour atteindre en 2010 un marché mondial de:			
Croissance annuelle du marché	Croissance investissement de production	Ventes annuelles	Puissance installée cumulée	Emploi dans le secteur PV	Conditions
% / année	% des ventes	MWc/an	MWc	Employés	
15%	7.2%	630	3'900	152'000	Marché usuel, développement spontané
20%	9.3%	1'240	6'300	261'000	Élimination de barrières du marché (techniques, institutionnelles, économiques)
25%	11.1%	2'380	10'200	453'000	Stimulation très forte du marché (financement public)
30%	12.8%	4'460	16'700	783'000	Saut technologique et dans les coûts de production

Table 6. Etude économique du marché mondial du PV (programme ALTENER)

Soulignons qu'à court terme déjà, une pénurie de matière première (Si purifié et plaquettes silicium) menace, et s'amplifierait au-delà d'une production de panneaux cristallins de 100 MWc/an d'après certains auteurs. Il est en effet communément admis que les technologies en couches minces ne seront pas accessibles massivement avant 2010.

Pour la Suisse, la fig. 10 trace l'évolution possible à moyen terme, sous diverses hypothèses de croissance, et en considérant une durée de vie des installations de 25 ans. Avec une croissance optimiste, mais raisonnable de 20% par an, la barre des 10 GWc envisagée dans le scénario ci-dessus pourrait être atteinte en 2036. Un prolongement de la croissance actuelle de 15% nous mènerait en 2048, alors qu'une croissance modérée de 10% ne permettrait pas à la filière de "décoller" avant la moitié du siècle prochain.

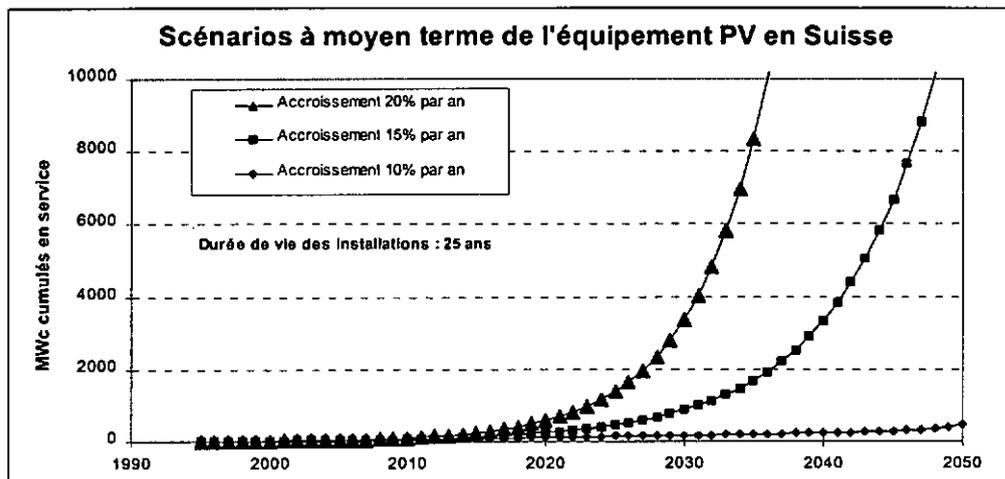


Fig 10. Scénarios de développement pour la Suisse

4.10 Centrales solaires dans l'espace

Le photovoltaïque terrestre est donc très fortement pénalisé par sa variabilité et son facteur d'utilisation. Proposé dès 1968, le concept de centrale solaire spatiale fait l'objet de nombreuses études (réf. [11]). Il s'agit de placer en orbite géostationnaire une station qui capterait l'énergie solaire en permanence et transmettrait l'énergie sur terre par faisceau micro-ondes (fig 11). Les études portent sur des unités de grande puissance: surface de captation de 10x5 km², produisant 5 GW (la consommation suisse en 1995). La transmission des micro-ondes a déjà été expérimentée à petite échelle, et peut atteindre une efficacité de 70% à 80%.

Les avantages d'un tel dispositif sont nombreux:

- Le rayonnement extraterrestre hors atmosphère est de 1360 W/m².
- Le facteur d'utilisation sera proche de 100%: la production assurera les besoins de base (ruban); le satellite ne passera dans l'ombre de la Terre que 3 semaines par an, aux équinoxes, avec une durée maximale de 72 minutes par jour.
- Les structures des panneaux PV et de leurs supports peuvent être très légères: ils ne sont pas soumis aux problèmes de gravité, vent, pluie, grêle, corrosion ou vandalisme que rencontrent les installations terrestres.
- L'antenne de réception occupera une surface au sol de 10x15 km². La transmission est insensible aux conditions météo et la densité de micro-ondes n'excédera pas 230 W/m², soit le quart du rayonnement solaire, au centre de l'antenne. Le rayonnement à la périphérie de l'antenne (1 W/m²) ne devrait poser aucun problème de santé. La technologie de l'antenne est simple et s'accommode de situations géographiques variées.

- Le coût pourrait se situer entre 1200 et 3500 \$/kWc, et devenir compétitif avec toutes les autres technologies de production d'énergie connues. Les frais d'exploitation et de maintenance seraient très faibles. La durée de vie envisagée est de 30 ans, mais il n'y a aucune raison de penser qu'elle ne puisse être prolongée.

Au titre des inconvénients, on peut citer:

- Les études ne font pas mention du coût énergétique de production et de lancement de la centrale. Le passage d'une orbite basse à l'orbite géostationnaire est actuellement coûteux du fait que le combustible nécessaire doit être lui-même monté en orbite basse. Une solution élégante consisterait à 'utiliser l'électricité, également transmise par faisceau micro-ondes à partir de l'espace.

De telles centrales pourraient voir le jour dès les années 2030, et contribuer fortement à l'approvisionnement de la planète en énergie électrique dans la seconde moitié du siècle prochain.

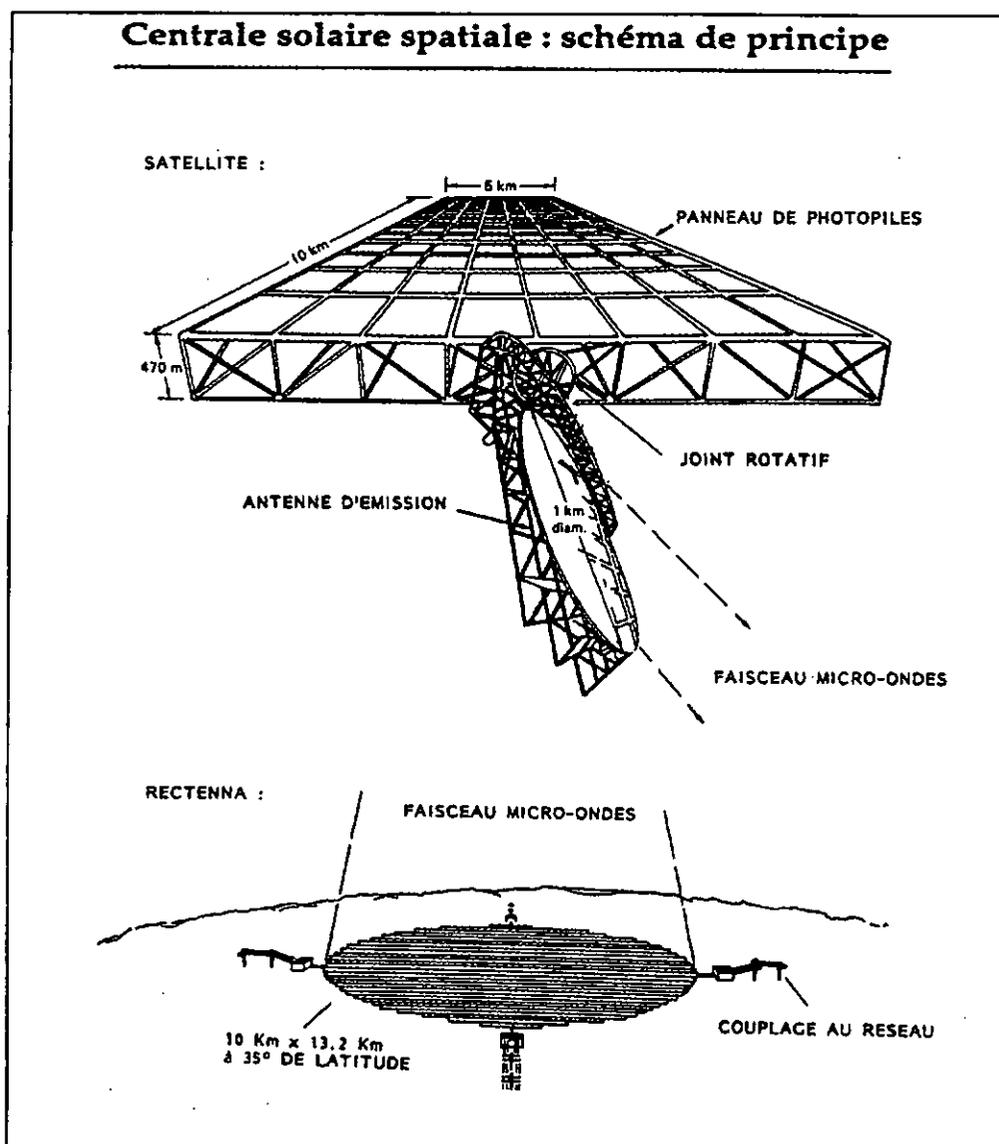


Fig 11. Centrale solaire spatiale: schéma de principe (réf [11])

5 Conclusion

L'utilisation de l'énergie solaire suscite de grands espoirs pour l'approvisionnement énergétique - en particulièrement en électricité - pour le siècle prochain dans une perspective de développement durable. La technologie photovoltaïque, développée depuis plus de 30 ans est le candidat privilégié de la production d'électricité. Mais son développement massif est encore limité par la jeunesse de la filière et des prix élevés.

La production mondiale de panneaux PV atteint 90 MWc en 1996, dont la plus grande partie est actuellement destinée à ses usages spécifiques, soit l'alimentation de systèmes isolés, aussi bien pour l'habitat que pour des systèmes industriels (télécommunications, protection anodique, etc). Dans ce créneau l'énergie photovoltaïque est une solution le plus souvent compétitive, qui présente de nombreuses qualités (simplicité de mise en œuvre, robustesse, longévité, souplesse d'utilisation).

Dans les pays en voie de développement, deux milliards d'êtres humains sont encore privés d'électricité. L'implantation de prestations électriques (photovoltaïques), même de très petites puissances, en zones rurales non desservies par les réseaux est une condition essentielle de développement. Dans ce cas la notion de service rendu prime sur la notion de quantité d'énergie distribuée. Une fourniture quelques Watts (par rapport à notre consommation de 770 W/personne dans les pays industrialisés) produit déjà une amélioration du cadre de vie appréciable (éclairage, information par la radio ou la télévision).

Enfin, nous avons esquissé les possibilités et les limites d'un recours massif au photovoltaïque pour la production de masse de l'électricité, en concurrence avec d'autres sources conventionnelles dans les réseaux. L'énergie solaire est une énergie diffuse, et variable dans le temps et dans l'espace. En conséquence, les systèmes photovoltaïques, même de forte puissance installée, ne peuvent fournir qu'une quantité d'énergie limitées (facteur d'utilisation de l'ordre de 10%), et pas forcément en phase avec la consommation.

Du fait de la souplesse d'utilisation du PV et de sa possible décentralisation, les surfaces nécessaires ne manquent pas. Mais la pénétration du réseau est étroitement dépendante des possibilités de stockage, et ne pourra guère dépasser 15 à 25% dans les régions de moyennes latitudes. D'ici à la moitié du siècle prochain, un autre facteur limitant sera la capacité de développement industriel pour satisfaire la demande. Les coûts, encore nettement supérieurs aux coûts de l'énergie classique, ne devraient pas atteindre un seuil de compétitivité (pour la connexion au réseau) avant les années 2010.

Des solutions plus radicales quant à l'approvisionnement en électricité de la planète se dessinent avec les projets de centrales solaires photovoltaïques. Ce concept s'affranchit des principaux inconvénients du photovoltaïque terrestre (facteur d'utilisation proche de 100%, insensibilité à la météo, production en ruban), et pourrait atteindre des coûts compétitifs avec les autres sources d'énergie connues.

Références

1. Camani, S. Rezzonico, TISO, Programme de recherche photovoltaïque 1996. Rapports annuels 1996. OFEN, Avril 1997.
2. SOFAS, Etude de marché 1996 (Zürich, juillet 1996).
3. IEA - International Energy Agency - Photovoltaic Power systems in selected IEA member countries, Survey report, March 1997.

4. Mohammed Berdai, Vincent Butin, PPER – Programme Pilote d'Electrification Rurale Décentralisée, Royaume du Maroc, Juillet 1994.
5. Chabot, ADEME - Electrification rurale: méthodes et outils d'analyse.
6. Systèmes Solaires no 120, Juillet/août 1997 (Thème Energie-Environnement-Développement)
7. Mermoud: PVSYST: logiciel pour systèmes photovoltaïques. Logiciel. GAP/CUEPE, av. de la Jonction, 1205 Genève.
8. Annuaire statistique de la Suisse, 1997. Office Fédéral de la Statistique.
9. Nowak, M. Gutschner, Approach to calculate and analyse the solar-yield-differentiated PV potential on Buildings in Switzerland. Programme de recherche photovoltaïque 1996. Rapports annuels 1996. OFEN, Avril 1997.
10. Statistique Suisse de l'Electricité (1995), OFEN, Bulletin ASE/UCS, no 8, 1996.
11. Derrick et al: Solar Photovoltaics to the Year 2010: A Plan For Europe. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 23-27 October 1995, Nice, France.
12. Deschamp et A. Dupas: Energie dans l'Espace. Systèmes Solaires n° 67/68, mars/avril 1991.
13. John K. Strickland: Advantages of Solar Power Satellites for Base Load Electrical Supply Compared to Ground Solar Power. Solar Energy, vol 56, pp 23-40, 1996.

Les modules photovoltaïques Evaluation et prospective

Alain Ricaud

CYTHELIA. Expertise et Conseil.

3, place de la gare de Lozère, F - 91120 Palaiseau

e-mail : amricaud@asi.fr

Résumé

Les modules solaires photovoltaïques proviennent d'une technologie fiable et éprouvée. Directement dérivés de l'ère spatiale à la fin des années 60, ils ont petit à petit envahi le champ des applications terrestres et jouent un rôle majeur dans l'alimentation électrique de sites isolés où l'autonomie du système est rendue nécessaire par des contraintes économiques, environnementales, ou de sécurité.

La question qui reste d'actualité est celle du déploiement de cette filière et des modalités de sa diffusion massive. En particulier, se fera-t-elle de façon volontariste, poussée par l'amont à travers l'aide à la recherche et la baisse des coûts de production d'une technologie donnée, grâce à des méthodes de standardisation (stratégie de type volume-prix), ou s'opèrera-t-elle de façon plus diffuse et plus naturelle tirée en aval par la spécialisation des produits visant chaque niche de marché spécifique en utilisant les technologies les mieux adaptées ?

Cet article essaie de donner des éléments de réponse en décrivant l'actuelle segmentation du marché mondial et son évolution prévisible pour les cinq prochaines années. On y explique la bonne adéquation de la technologie du silicium cristallin aux segments de l'électrification des villages isolés et des applications professionnelles, ainsi que la meilleure adaptation de la technologie des films minces au marché de la micro-puissance d'intérieur, de la minipuissance d'extérieur et au marché émergent de l'intégration à l'architecture.

Les principaux fabricants de modules photovoltaïques sont brièvement décrits dans le contexte de leur taille, culture et technologie. Les volumes de produits vendus ainsi que leur prix de vente unitaire sont récapitulés pour les 24 dernières années, permettant de calculer un facteur d'apprentissage, paramètre clé contribuant à l'évaluation des baisses de coûts prévisibles dans le futur proche.

Introduction

A l'inverse des énergies fossiles, notre mère nature a généreusement et équitablement pourvu les nations en énergies renouvelables. Le gisement solaire est même plus favorable dans les zones intertropicales, économiquement pauvres, et depuis relativement peu de temps, l'électricité photovoltaïque est reconnue comme une source d'énergie crédible aux yeux des décideurs des grands organismes de financements internationaux. En théorie elle répond à des besoins sans limites puisque encore aujourd'hui, deux milliards d'individus n'ont pas l'électricité.

Cependant, depuis près de vingt ans, la plupart des projets solaires dans les pays en développement, peinent à se mettre en place, le plus souvent pour des raisons socio-

économiques d'éducation, de formation à la maintenance, de coût et de logistique des financements.

Au milieu de nombreuses réussites, les échecs remarquables de certains programmes d'aide en Afrique, ne démontrent pas nécessairement l'inadéquation de la solution solaire dans les pays dépourvus de réseau; ils tendraient plutôt à prouver que l'accélération du développement des énergies renouvelables doit passer d'abord par nos pays industrialisés et nos modes de vie. Lorsque nous prenons les pays en développement pour des terrains d'expérience de technologies dont nous ne savons que faire, ceux-ci nous répondent que nous serions bien avisés de tester ces techniques et d'en élargir l'usage d'abord chez nous-mêmes.

Sachant que le segment de l'habitat isolé représentera plus de 50 % du marché mondial en 2000, en plus des programmes de R&D pour abaisser le coût des modules, il faudra résoudre le problème crucial du stockage qui n'a jusqu'à présent été traité qu'à travers les accumulateurs électro-chimiques, technique qui a bien peu évolué depuis le début du siècle.

Quant aux systèmes connectés au réseau électrique, les capteurs photovoltaïques installés en façade ou en toiture sont encore loin de la compétitivité économique (0.30 à 1 Euro /kWh). A vue de chercheur, l'horizon de compétitivité avec les sources traditionnelles apparaît en 2010; à vue d'industriel, en 2020 Prenant le relais des américains et des allemands, les politiques japonais ont bien compris le message, eux qui viennent de lancer un programme quinquennal de 70 000 toits solaires dont 10 000 en 1997, représentant 37 MW installés, subventionnés à hauteur de 140 millions d'Euro.

En France métropolitaine et dans les pays industrialisés en situation d'indépendance énergétique et qui possèdent un réseau couvrant tout leur territoire, il n'y a pas de nécessité économique immédiate de pousser la solution solaire. Celle-ci n'est rentable qu'en sites isolés; à cause de leur rareté, et des faibles puissances mises en jeu, leur équipement sera assez vite saturé. C'est le cas de la politique actuelle de la France qui s'emploie à équiper les DOM-TOM et les écarts en métropole.

Entre l'ambition trop grande du programme japonais et la taille modeste des réalisations françaises, par l'étendue de ses applications et la diversité des services rendus, l'électricité photovoltaïque n'a pas fini de nous étonner. La pénétration sélective de certaines niches de marché a permis de maintenir une progression constante de la qualité, de la durée de vie et des coûts du matériel, ce qui permet aujourd'hui d'envisager avec confiance la phase d'industrialisation et de diffusion massive dès la fin du siècle.

1 Le marché :

1.1 La segmentation actuelle et future du marché :

La Fig.1 illustre le volume des ventes mondiales des cellules et des modules photovoltaïques, leur prix unitaires et les revenus engendrés pendant la décennie 90. La projection pour les années à venir est établie suivant le scénario de base "business as usual" où aucun support politique significatif ne vient aider le développement de cette industrie. Cependant, depuis bientôt un an, nous savons que le programme japonais du NEDO devrait augmenter ces chiffres d'au moins 30 % par an, ce qui risque de créer de sérieuses perturbations sur les prix des modules, dans la planification à court terme des implantations d'usines, et dans la disponibilité en silicium de base.

Nous avons divisé le marché en six catégories. Les trois premiers segments sont représentatifs d'un vrai marché avec des clients solvables; en 1990 ils comptaient pour 24 MW (50 % du volume) et 140 MEuro (60 % des ventes). Les trois derniers segments représentent les marchés subventionnés pour des raisons variées; en 1996, ils représentaient encore 56 MW (60 % du volume) et 180 MEuro (50 % des ventes).

Segment de marché	Période Produits	1990			1996			2002		
		MW	\$/W	MS	MW	\$/W	MS	MW	\$/W	MS
Grand public intérieur < 1Wp	Montres, horloges, calculatrices, gadgets	4	14	56	4	13.7	57	6	12.7	76
Grand public extérieur < 50Wp	Applications auto, lampes de jardin, alarmes, sécurité	8	7	56	12	6.1	72	26	5.0	130
Professionnel isolé 1 Wp à 10 kWp	Telecom, telemetrie signalisation, environnement	12	5.9	71	19	5.3	101	42	4.2	178
Habitat isolé 100 Wp à 10 kWp	Pompes, irrigation dispensaires, éclairage	18	5.7	103	42	4.4	183	138	3.1	430
Connexion réseau 1 kWp à 10 kWp	Toitures, façades privées et publiques	2	5.5	11	10	4.0	40	35	2.6	90
Centrales solaires > 50 kWp	Compagnies d'électricité	2	4.7	9	3	4.0	12	16	2.6	41
Volume des ventes	MWp	46			90			263		
Prix moyen unitaire	\$/Wp		6.6			5.2			3.7	
CA annuel	MS			306			465			945
Volume cumulé	MWp	240			636			1695		
CA cumulé	MS			2100			4160			8580

Silicium mono et poly cristallin	
Silicium amorphe et autres films minces	

Scenario: croissance 20 % /an

Fig.1- Actuelle et future segmentation du marché mondial des modules photovoltaïques.

Le segment des produits grands publics à usage intérieur (en général, des cellules et modules de puissances inférieures à 1 Wc), principalement basé sur la technologie du silicium amorphe, a ralenti la croissance extrêmement rapide qui l'avait caractérisé pendant la décennie 80. Il s'agit essentiellement d'un marché de substitution, les photopiles venant en remplacement des piles. Nous faisons l'hypothèse d'un volume constant pendant la décennie accompagné d'un léger tassement des prix de vente et un remplacement progressif du marché saturé des calculatrices par les montres, horloges, les jouets et la domotique. La pile au lithium est devenu le concurrent principal dans ce segment.

Le segment des produits grand public à usage extérieur (modules de puissance inférieure à 50 Wc), dont la moitié utilise la technologie du silicium cristallin, a une croissance moyenne de 15 % par an et verra progressivement les technologies films minces se substituer aux photopiles traditionnelles pour des raisons évidentes de meilleure intégration permise par la plus grande flexibilité de taille, de forme et de tension. Il s'agit souvent d'améliorations de produits existants en les rendant autonomes.

Le segment des applications professionnelles isolées (essentiellement le marché des télécommunications; aide à la navigation fluviale, maritime, aérienne; signalisation et sécurité routière; protection cathodique; telemetrie; environnement...) a eu une croissance solide et constante de 15 % par an et reste le marché le plus stable et le plus sérieux encore aujourd'hui. L'introduction prématurée des modules en couches minces dans ce secteur très pointilleux sur

la qualité, a laissé des traces et une réputation de non fiabilité qui n'est plus justifiée aujourd'hui.

Le segment de l'habitat isolé (typiquement des installations allant de 100 Wc à 10 kWc pour le pompage, le froid, la ventilation, l'irrigation, l'éclairage, la santé...) presque entièrement basé sur les photopiles traditionnelles, a une croissance de l'ordre de 25 % en moyenne avec des hauts et des bas dépendant des programmes publics d'aide au développement rural. Ce segment représentait 40 % du marché global en 1990, 47 % en 1996 et en représentera probablement 54 % en l'an 2000. Les obstacles à une dissémination plus rapide des modules dans ce marché ne sont plus d'ordre technologique mais d'ordre socio-économique [1].

Le segment des bâtiments connectés au réseau (toitures et façades photovoltaïques) était quasi-inexistant il y a cinq ans. D'après plusieurs études de marché, c'est un segment qui devrait croître à un rythme supérieur à 30 % par an dans les pays où la législation encourage l'installation de compteurs réversibles [2]. Il est évident que les pays les plus favorisés sont ceux dont la consommation de pointe est en phase avec le gisement solaire ("Sun-belt aux USA") [3]. La France n'est pas dans ce cas, mais on peut toujours envisager une généralisation du conditionnement d'air qui nous viendrait d'Amérique.

Le segment des centrales solaires dont la croissance très aléatoire dépend des programmes d'expérimentation des "utilities". La production centralisée a dès le début des années 80, été reconnue aux USA comme le meilleur moyen de baisser les coûts des composants en les standardisant. Les compagnies italiennes, allemandes, suisses et espagnoles ont mis en oeuvre des programmes de démonstration similaires de 1 à quelques MWc qui n'ont eu surtout pour effet que de démontrer que le courant continu du photovoltaïque devait être manipulé avec précautions ...

La question reste entière de savoir si l'énergie solaire photovoltaïque représentera un jour une part significative de la production d'électricité en Europe. Et si pour certains pays comme la Suisse, la réponse est oui, le sera-t-elle à partir de centrales solaires de grandes tailles ou à partir d'une multitude diffuse de producteurs/consommateurs privés reliés par les réseaux existants; le sera-t-elle à partir de modules à courant continu ou de modules à courant alternatif ?

1.2 Les applications fonction des performances en coût et en rendement des modules:

La Fig. 2 est une représentation graphique de la segmentation décrite ci-dessus où le rendement des modules figure en abscisse et leur coût par m² en ordonnée. Pour bien faire ressortir le rôle du coût de l'installation, on l'a porté en négatif sur l'échelle des ordonnées. On détermine ainsi des nuages de points par type d'application dont la pente moyenne représente le coût des modules installés par m² tels que la demande du marché l'impose.

On démontre ainsi par exemple, que pour atteindre un objectif de coût de 2 Euro/Wc installé dans le cas d'une centrale solaire, un module dont le rendement serait inférieur ou égal à 10 % devrait être gratuit. Pour cette application il est donc inutile de développer des technologies dont le rendement ne pourrait pas dépasser 10 % (c'est encore aujourd'hui le cas pour le silicium amorphe). Un module de rendement 15 % devrait coûter 100 Euro/m² (resp. 200 Euro/m² pour un module de 20 % de rendement).

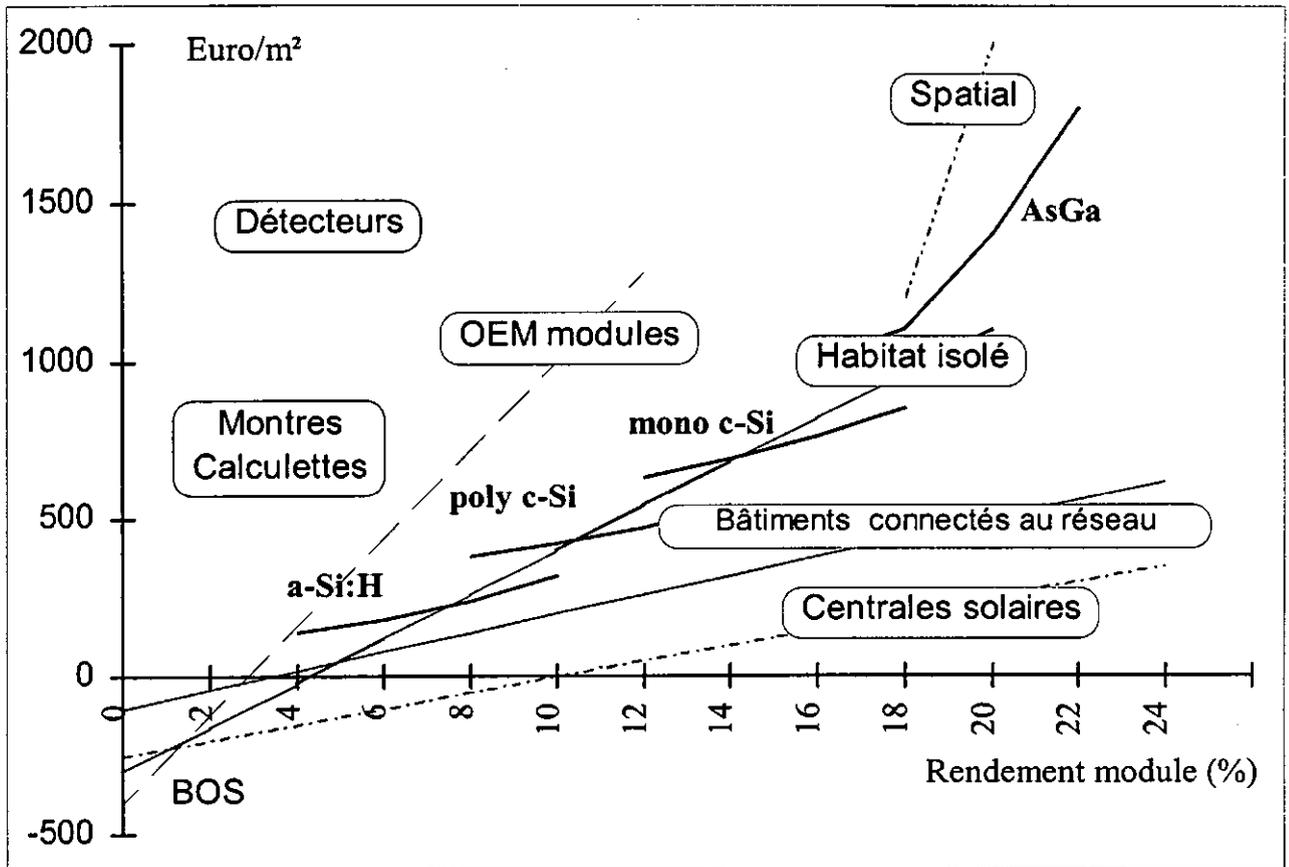


Fig.2 : Coût des modules installés en fonction de leur rendement

En ce qui concerne les modules intégrés aux façades des immeubles ou aux toitures, il est clair que les structures de support étant déjà payées, le coût d'installation (l'ordonnée à l'origine) est considérablement réduit. Pour un même objectif de coût d'électricité on peut donc se permettre d'avoir des modules plus chers que dans le cas des centrales solaires. Un module cristallin avec un rendement de 15 % pourrait donc coûter 325 Euro/m² et il est intéressant de noter que la viabilité économique des modules au silicium amorphe n'est plus hors d'atteinte (180 Euro/m² pour un rendement de 10 %).

Dans un avenir proche, l'utilisation de modules multi-fonctionnels qui joueraient le rôle de tuiles, de matériaux de construction au même titre qu'un double vitrage (barrière sonore, isolation thermique), d'éléments décoratifs, de stores vénitiens ou de capteurs thermiques, permettra de soustraire à leur coût d'installation le coût du matériau auquel ils se substituent. De plus, l'électricité étant produite sur le site d'utilisation, elle devrait être revendue au réseau non pas au tarif offert aux centrales de production, mais au prix qu'achètent les utilisateurs. Le plus simple est donc de faire tourner le compteur dans les deux sens au même tarif [7].

Concernant les installations professionnelles isolées telles que les relais hertziens, un coût d'installation de 150 Euro/m² est fréquent y compris dans les pays industriels, mais il peut atteindre 300 Euro/m² dans certaines zones très isolées d'Afrique. L'objectif de 4 à 8 Euro/Wc installé peut être atteint par les photopiles traditionnelles mais reste dissuasif pour les modules en films minces, surtout à cause du coût du transport. Dans ce dernier cas cependant, où le critère de choix n'est pas tant la densité de puissance par unité de surface, mais par unité de poids, les modules souples ultra légers dont disposent certaines firmes (ITFT-procédé 3M, USSC-procédé Sovonics) peuvent reprendre l'avantage sur les produits traditionnels.

Il existe une multitude d'options prix/rendement/qualité pour les petits modules dans les domaines des applications professionnelles et grand public de petite puissance où ils sont intégrés par les fabricants eux-mêmes dans leurs propres boîtiers. On y trouve des objets aussi divers que les calculettes, les montres, les sonnettes de portes, les lampes de poche, les détecteurs de présence, les lampes de jardin, les toits ouvrants d'automobiles, pour le grand public. Et les clôtures électriques, l'instrumentation scientifique, les parc-mètres urbains, les téléphones d'urgence autoroutiers, les casques à soudeuse, les paratonnerres, etc...pour les professionnels. Au-dessous de 5Wc la performance des produits n'est plus déterminée par la densité de puissance (le rendement), pas plus que par le prix par Wc. Elle est principalement définie par la flexibilité de l'outil de production, les considérations esthétiques, la capacité d'intégration, et le prix par unité de surface. Ces critères font que les photopiles en films minces sont mieux adaptées à ces marchés que les photopiles traditionnelles.

1.3 Service final et structure du coût des applications photovoltaïques:

L'expérience a montré que pour le client final, le service rendu et la fiabilité du système sont de loin plus importants que le coût du kWh. Dans toutes ces applications, les critères de viabilité économique du système solaire seront liés au nombre d'heures d'éclairage, de télé, aux litres d'eau potabilisée, aux litres de lait maintenus au froid. Il s'ensuit que l'optimisation économique de l'ensemble de la chaîne panneaux solaires, batteries, appareils électroménagers, jusqu'au service rendu, doit être particulièrement soignée.

Pour une pompe solaire d'1kWc installée au Sahel dont la durée de vie estimée est de 15 ans et qui produit 30 m³ d'eau par jour, avec une hauteur manométrique totale de 20 m, le coût du m³ d'eau pompée est 25 % moins cher avec un système solaire (0.36 Euro/ m³) qu'avec un système diesel (0.48 Euro/ m³) [4]. Il est intéressant de noter au passage que l'eau potable coûte en France entre 1 et 2 Euro/ m³, soit 3 à 6 fois plus cher qu'au Sahel !... Et que dire de l'eau minérale en bouteille que nous payons au détaillant 230 Euro/ m³ ?

On peut également comparer le prix de revient des épandeurs d'insecticide portables. Avec des piles non rechargeables, il en coûte au paysan du Niger environ 30 F par jour; avec un système solaire de 6 Wc associé à des accus rechargeables, dont la durée de vie est estimée à 5 ans, il en coûte seulement 0.15 F / jour, soit 200 fois moins.

Ces deux exemples éloquentes font bien ressortir la compétitivité des systèmes solaires en site isolé, lorsqu'on les compare au diesel ou aux piles. Il font aussi apparaître la nature particulière de la structure du coût: lorsqu'un client-utilisateur achète un système solaire, c'est comme s'il payait à l'avance sa consommation des 20 prochaines années.

Le coût actualisé d'un système solaire se répartit en 90 % d'investissement pour 10 % de fonctionnement, alors que pour un système diesel le ratio est plus proche de 50-50. Compte tenu du faible niveau de vie des populations dont on parle, la structure de son coût est le principal obstacle au développement du solaire dans les pays pauvres. Aussi longtemps que les banques locales seront réticentes à faciliter les emprunts indispensables - de la même façon que le système bancaire français, sous l'impulsion des pouvoirs publics avait généralisé les prêts aux particuliers pour encourager l'accession à la propriété de maisons individuelles dans les années 50 - le solaire ne décollera pas, pas plus d'ailleurs que l'activité domestique, agricole et artisanale qu'il pourrait entraîner. Sans énergie, les énergies s'étiolent... Les populations rurales migrent alors à la périphérie des villes, ajoutant aux problèmes récurrents de chômage, désœuvrement et délinquance, déjà insolubles dans de nombreuses métropoles...

1.4 Films minces contre silicium cristallin et coûts d'installation:

Il a été dit que les films minces convenaient bien aux photopiles de petites dimensions et que cette complémentarité laisserait le champ libre au silicium cristallin pour les grandes surfaces. Dans cette partie, nous apportons la démonstration que dans certaines applications de puissance, les photopiles en films minces de grande surface peuvent déjà être compétitives en face des meilleurs modules au silicium cristallin.

La partie supérieure de la Fig. 3 est une analyse de coûts comparés pour quatre technologies différentes (silicium monocristallin à haut rendement, silicium polycristallin standard, CdTe et a-Si:H). Il s'agit de coûts totaux englobant le coût usine (direct + indirect), le coût des ventes et du marketing et les frais généraux et administratifs. Compte tenu de sa part très importante dans ces filières en plein développement, la recherche et développement est toujours comptée à part; elle n'est donc pas incorporée ici. Les coûts sont ici exprimés en Euro/Wc.

On note que c'est la filière a-Si:H (américaine) qui a les plus faibles coûts en Euro/Wc. Mais voyons si elle garde l'avantage pour des systèmes installés ?

La partie inférieure de la Fig.3 compare le coût des kWh produits par ces modules dans deux types d'applications volontairement choisies sans stockage et dans des zones d'ensoleillement similaires: une façade de building à Phoenix, Arizona et une pompe solaire à Bamako, Mali. Ce que nous définissons par coût installé est le champ de panneaux avec toute son infrastructure, transport et installation; cela exclut les onduleurs et les pompes.

Le coût du kWh d'électricité dépend:

- du coût du KWc installé lu (en Euro/ kW),
- de l'irradiance annuelle dans le plan des modules E (exprimée en kWh/kWc.an, ou en d'autres termes, le nombre d'heures d'équivalent plein soleil par an),
- du coefficient d'actualisation Ka qui est relié au taux d'intérêt t et à la durée de vie des installations n, exprimée en années par la formule: $Ka = t(t+1)^n / [(t+1)^n - 1]$
- du coût annuel de maintenance exprimé en pourcentage de l'investissement total Km (en général inférieur à 2%),
- du coefficient de productivité Kp (pouvant varier de 60% pour un système cristallin avec batteries à 90 % pour un système amorphe connecté au réseau). Ce coefficient dépend de la réponse spectrale des modules, de leur coefficient de température, et de l'efficacité globale de la gestion de l'énergie à travers régulateurs, batteries et onduleur.

Le coût actualisé de l'électricité produite peut alors s'écrire sous la forme simplifiée [4]:

$$C(\text{Euro/kWh}) = I_u \cdot (K_a + K_m) / E \cdot K_p$$

Technologie	Silicium	crystallin	Films	minces
Meilleur produit disponible	Mono c-Si	Poly c Si	Cd Te *	a-Si:H
Plaquettes / OTC (Euro/m ²)	177	123	23	23
Rend de production (%)	96	92	88	90
Coût cellules (Euro/m ²)	200 :	100 ·	100	58
Rend de production (%)	80	91	86	93
Surface module (m ²)	0.63	0.75	0.72	1.20
Encap/ finition (Euro/m ²)	138	127	69	55
Rend de product(%)	97	97	98	98
Rend de prod. composé (%)	82	89	88	92
Coût module (Euro/m ² net)	569	367	213	143
Rendemt des cellules (%)	17.58	12.44	7.65	5.36
Facteur de foisonnement	0.86	0.89	0.95	0.95
Rendemt des modules	15.12	11.07	7.26	5.10
Coût module (Euro/W net)	3.76	3.32	2.93	2.82
Puissance module (W)	95	83	52	61
Coût usine module (Euro)	359	275	153	172

Deux applications sans batterie	Coût d'installation (Euro/m ²)			
Façade connectée au réseau	62	58	59	52
Coût modules installés (Euro/W)	4.17	3.84	3.75	3.82
Pompe isolée (Euro/m ²)	290	281	283	263
Coût modules installés (Euro/W)	5.68	5.86	6.83	7.97
Durée de vie (années)	20	19	17	16
Taux d'intérêt (%)	6	6	6	6
Ka (%)	9	9	10	10
Coût de maintenance (% inv)	5	5	5	5
Irradiance (kWh/kWc.an)	1800	1800	1800	1800
Kp (coef de productivité %)	75	75	80	85

Coût de l'électricité (Euro/kWh)	Mono c-Si	Poly c-Si	Cd Te	a-Si:H
Façade connectée au réseau	0.42	0.39	0.38	0.37
Pompe isolée	0.58	0.60	0.69	0.77

* Le coût de fabrication du CdTe est une extrapolation du Pilote.

Fig. 3 Photopiles cristallines contre photopiles en films minces pour deux types d'application (en haut: comparaison des coûts de production pour 4 technologies, en bas: coût de l'électricité pour deux applications sans batterie)

Utilisant les techniques de fabrication les plus sophistiquées (dérivées des travaux de Martin Green de l'Université de New South Wale, Australie), certains fabricants sont capables de produire des modules commerciaux dont le rendement de cellule atteint 17.6 % et le rendement de module 15.1 %. Ces modules sont bien entendu plus chers à produire (570 Euro/m²) mais en termes de coût par Wc ils sont assez proches des modules traditionnels (3.8 Euro/Wc comparé à 3.3 Euro/Wc). Les modules au silicium amorphe sont 4 fois moins chers à produire au m² mais trois fois moins performants. Il en résulte qu'ils sont les meilleurs candidats dans les applications où le coût d'installation est modeste (50 Euro/m² pour certaines façades), et à l'inverse, les modules cristallins à haut rendement sont le meilleur choix dans le cas du pompage au Mali (coût d'installation pouvant atteindre 300 Euro/m²).

Les modules au Cd-Te sont inclus ici pour démontrer que cette technologie qui détient à la fois les promesses de simplicité de fabrication, de coût modérés (160 à 240 Euro/m²) et de rendement moyen (8%) sera bientôt capable d'entrer en compétition avec le silicium polycristallin. Leur coût de production est ici une extrapolation de ce qui est connu au niveau des pilotes existants. La société BP Solar a décidé de transférer à San Fransisco dans l'ex usine de APS sa technologie Cd Te développée à Londres.

L'un des enseignements que l'on peut tirer de cette comparaison, c'est que le prix d'un module une fois installé peut atteindre dans certains cas trois fois son prix sortie usine. Et nous n'avons pas montré ce qu'il serait avec des batteries d'accumulateur comme c'est le plus souvent le cas. Les batteries restant très chères, il n'est pas rare que les modules ne représentent pas plus de 20 % du prix total dans certaines offres. En d'autres termes, même si les modules étaient vendus au prix de la moquette, ce qui représenterait un formidable exploit technologique, les systèmes de petite puissance en sites isolés resteraient aux alentours de 12 Euro/Wc.

1.5 Comment répartir les efforts:

De l'analyse de la segmentation du marché et de cette brève étude de coûts, on peut déduire les grands axes des travaux à conduire par segment:

- le segment des produits grands publics requiert la souplesse dans l'outil de production et le dialogue permanent avec les fabricants des produits ainsi équipés, les intégrateurs (OEM).
- le segment des applications professionnelles isolées requiert des modules standards où priment la qualité, la fiabilité, et le respect des normes en vigueur; le métier d'ensemblier échappera petit à petit à la profession photovoltaïque, les professionnels de chaque application s'appropriant peu à peu leur savoir faire en systèmes complets.
- la baisse espérée du coût des modules n'est pas le facteur déterminant de la pénétration du marché des villages isolés; cela devient de plus en plus un métier de monteurs de projets. Les paramètres principaux restent le montage financier, l'installation locale et les particularités socio-culturelles.
- c'est le segment de l'intégration à l'habitat et de la connexion au réseau qui bénéficierait le plus rapidement de la baisse des coûts des modules; il nécessite néanmoins un dialogue permanent avec les architectes et les professionnels du bâtiment et une grande flexibilité dans les gammes de produits.
- c'est enfin le segment des centrales solaires qui bénéficiera le plus de l'augmentation du rendement des modules et de la standardisation des composants. Ce sont les raisons pour lesquelles ce segment se développera en dernier.

2 L'industrie:

2.1 Les principaux protagonistes:

Dans la Fig.4, parmi 34 compagnies impliquées dans la production de modules photovoltaïques, nous avons sélectionné les 18 majors représentant 80 % du marché en volume et nous les avons regroupés par région. Nous donnons aussi une indication de leur production cumulée depuis qu'ils existent. Siemens Solar Industries (SSI) est le leader

incontesté avec 20 % de part de marché en 1996. Cette solide position a été durablement établie par Arco Solar qui détenait 19 % des ventes cumulées jusqu'à 1990. Si l'on considère SSI comme une compagnie américaine (filiale de Siemens USA), il ne reste plus que trois compagnies d'importance aux USA, après un rude processus de concentration durant les années 80. Solarex, une filiale d'AMOCO (pétrole) et d'ENRON (gaz), qui célèbrera cette année son 24 ème anniversaire, reste un solide challenger dont la réputation s'est établie sur sa technicité, l'étendue de sa gamme, la qualité de ses produits et la fidélisation de ses distributeurs.

Compagnie / Rang / Ventes cumulées sur 24 ans (1973-1996)											
Zone de production / Pays d'origine											
USA	Rg	MW	Europe	Rg	MW	Japon	Rg	MW	RdM	Rg	MW
Siemens SI	1	126	BP Solar	5	40	Sanyo	3	68	CEL	10	16
USA / USA			Espagne- Australie -USA / UK			Japon / Japon			Inde / Inde		
Solarex	2	75	Eurosolare	8	20	Kyocera	4	53	BHEL	16	7
USA-Australie / USA			Italie / Italie			Japon / Japon			Inde / Inde		
ASE	6	38	Photowatt	9	19	Sharp	7	21			
USA / Allemagne			France / Canada			Japon / Japon					
Solec	11	15	Helios Tech.	12	14	Hoxan	13	9			
USA / Japon			Italie-Inde / Italie			Japon / Japon					
Astropower	14	9	Isophoton	15	7	Matsushita	17	6			
USA / USA			Espagne / Espagne			Japon / Japon					
			NAPS France	18	6						
			France / Finlande								

 silicium cristallin  films minces

Fig. 4 Les 18 majors détenant 80 % du marché des modules.

En Europe, le champ de bataille où opéraient douze protagonistes au début des années 80 en a laissé six encore en vie, mais le processus de restructuration n'est pas terminé. Après Eurosolare-Anit en Italie, les allemands ont essayé d'unir leurs efforts en regroupant dès 1994 Telefunken, Nukem, et Phototronics dans le groupe ASE (100% filiale de Nukem depuis Juillet 96) qui a racheté les actifs et la technologie de ruban de MOBIL Solar aux USA et qui, depuis que l'industrie allemande est moribonde, opère désormais sous le nom de ASE America. Il en est de même pour Siemens Solar qui n'a plus d'activité industrielle en Allemagne. Il semblerait que cette situation profite à la société Photowatt dont le nouvel actionnaire ATS (Automation Tooling Systems, société canadienne de Toronto) qui, en étroite partenariat avec le systémier français Total-Energie voit son activité doubler en 1997.

Le Japon continue d'offrir à ses industriels un environnement plus stable, notamment par le support long terme du programme Sunshine du NEDO et aussi par un marché captif plus adapté. Après une période d'essai favorable de deux ans, un soutien sans précédent à l'intégration des panneaux en toiture des résidences privées a été annoncé pour les cinq prochaines années. En 1997, il est prévu 37 Mwc d'installations subventionnées au Japon en sus des prévisions de vente mondiales de 93 Mwc dont plus de la moitié à travers le marché non subventionné. Les autorités japonaises font le pari que seul un programme d'une telle

envergure sera à même de précipiter la baisse des prix qui permettrait de changer d'échelle. Nous savons d'expérience (centrales solaires aux USA au début des années 80, puis grands projets allemands au début des années 90), qu'une telle politique ne peut se justifier que dans la durée.

Le reste du monde est dignement représenté par l'Inde où les privatisations récentes ajoutées à un support déterminé du pouvoir central en faveur des énergies renouvelables, devraient conduire à une très forte croissance de ce secteur.

Les firmes impliquées dans la course du photovoltaïque doivent pour y rester, détenir cinq cartes gagnantes:

- l'indépendance technologique.
- les capacités financières.
- un réseau mondial de distribution / installation.
- l'environnement industriel.
- des équipes compétentes.

A notre connaissance, aucun des majors ne détient pour l'instant les cinq cartes gagnantes, mais certains d'entre eux en détiennent quatre... surveillons les, ils feront sûrement partie des sept ou huit survivants des années 2010 !

Il y a cinq types principaux de filiation chez les majors:

- les compagnies nationales (en fort déclin depuis quatre ans).
- les compagnies pétrolières ou chimiques (en décroissance naturelle).
- les compagnies du secteur électronique (en croissance surtout au Japon).
- les sociétés indépendantes (en croissance suite aux restructurations)
- les "utilities" (tout juste émergentes) *secteur public*.

Il est surprenant de constater que l'industrie du verre s'est montré un investisseur très prudent jusqu'à une date récente. A part quelques exceptions telles que Flachglass (Allemagne) du groupe Pilkington, qui investissent timidement dans les façades photovoltaïques, les grands groupes verriers, fidèles à leur tradition de prudence, sont restés sur la réserve. On notera avec d'autant plus d'intérêt la collaboration entre Corning et SSI dans la filière CIS.

La plupart des majors ont incorporé les films minces dans leurs programmes de développement, mais il est intéressant de constater que ceux qui détiennent à la fois le savoir faire silicium cristallin et les produits en films minces, hésitent encore à introduire ces derniers sur le marché...

2.2 La production mondiale par région:

La Fig. 5 résume 24 ans de production par région et par technologie et donne les résultats de 1996 [5]. Incontestablement, les USA maintiennent leur position de leader avec 40 % de la production mondiale. L'Europe reperd du terrain par rapport au Japon à présent fortement tiré par son programme national de toits solaires.

Globalement, les 89 MWc vendus en 96 ne représentent que 9 % d'augmentation par rapport à 95; depuis trois ans la croissance moyenne s'est établie à 15%, chiffre relativement satisfaisant dans un environnement économique mondial où la croissance est quasi-nulle.

Période	1996 Ventes (MW)			
	e-Si	films minces	total	part
USA	38	2	40	44%
croissance 96/95	13%	43%	14%	
EUROPE	16	2	19	21%
croissance 96/95	-14%	9%	-11%	
JAPON	15	6	21	24%
croissance 96/95	35%	-22%	10%	
RdM	6	3	9	11%
croissance 96/95	10%	500%	49%	
TOTAL MW	75	14	89	100%
croissance 96/95	9%	12%	9%	

Période 73-96: 24 ans de ventes cumulées (MW)				
Technologie	e-Si	films minces	total	part de marché
USA	238	20	258	39%
part de marché	92%	8%		
EUROPE	138	19	157	24%
part de marché	88%	12%		
APON	79	118	197	30%
part de marché	40%	60%		
RdM	43	5	48	7%
part de marché	89%	11%		
TOTAL MW	498	162	661	100%
part de marché	75%	25%		

Fig.5- Production de modules photovoltaïques par région et par technologie

2.3 Les canaux de distribution:

Le marché s'organise: en effet, pour un total mondial de 89 MWc de cellules et modules vendus en 96,

30 MWc furent vendus à des assembleurs (34 %, sans changement),

23 MWc à des distributeurs (26 %, en croissance),

15 MWc à des fabricants de produits (17 %, en croissance),

11 MWc aux clients finaux (12 %, en décroissance),

et les 10 MWc restant (11 %, en diminution) furent vendus par des chaînes de magasins.

2.4 Historique des volumes de ventes et des chiffres d'affaire:

La Fig. 6 représente les volumes des ventes et les chiffres d'affaire annuels (sortie usine) de la seule activité de la vente de modules. Pour avoir une idée du chiffre d'affaire global du photovoltaïque mondial, il faut multiplier ces données par environ un facteur trois. La courbe du volume des ventes résume vingt ans de croissance ininterrompue avec différents taux de croissance. A l'époque des pionniers où les programmes gouvernementaux de démonstration représentaient une part importante des ventes, la croissance annuelle composée tournait autour de 66% (période 1977-83). Durant les trois années suivantes, les ventes ne crurent que de 12 % par an; elle furent précédées par une anticipation malencontreuse des capacités de production, qui induisit des licenciements et des restructurations massives au milieu des années 80, ainsi qu'un effet désastreux sur les prix de vente moyen conduisant à une diminution du chiffre d'affaire entre 85 et 86. Depuis 86, le développement exponentiel a laissé place à une croissance quasi-linéaire plus représentative des marchés réels, avec un ralentissement en 91, accompagné à nouveau d'une saturation des chiffres d'affaire dûe à une lutte féroce sur les prix de vente unitaires.

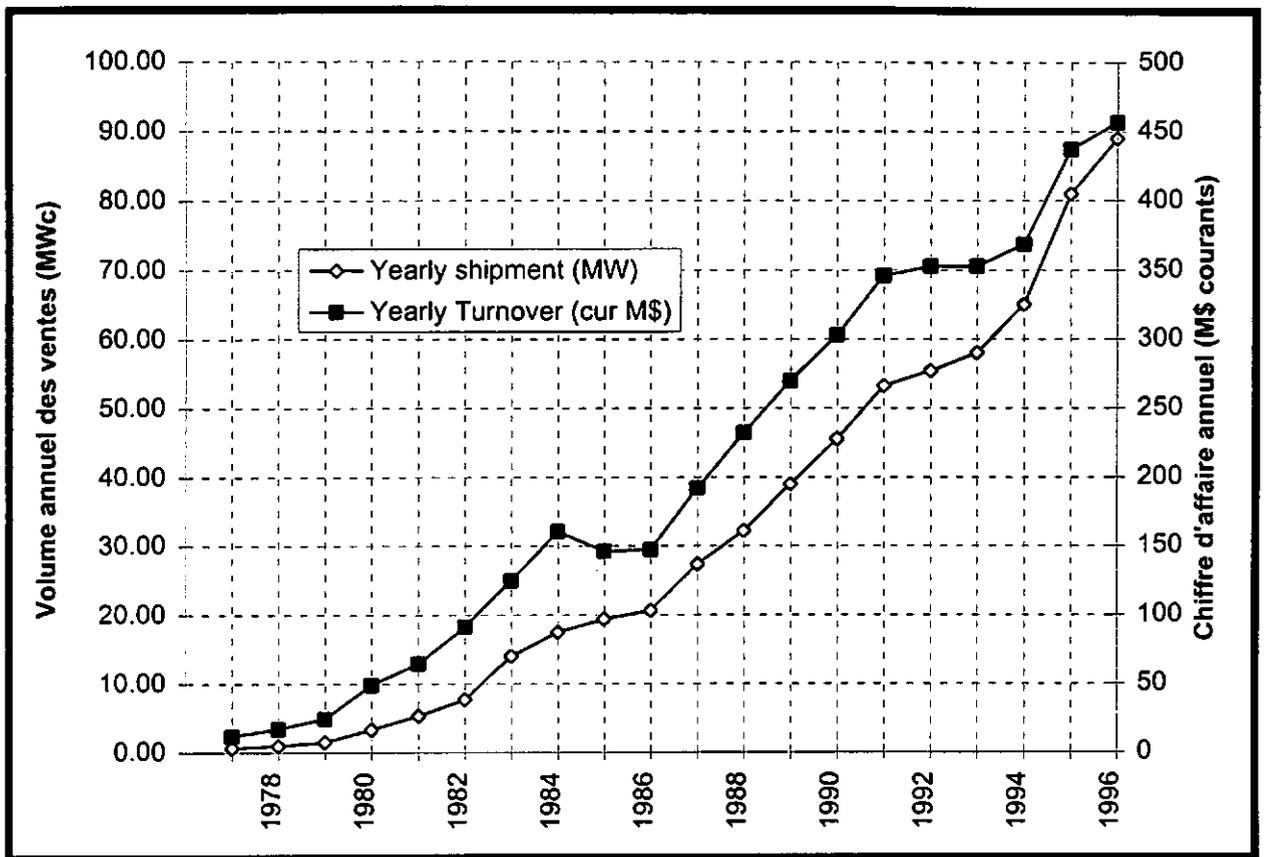


Fig.6 : *Volume des ventes (MWc) et CA annuel (M\$ courants), modules photovoltaïques seulement.*

Concernant les ventes de 1996, l'année a été très contrastée; après un démarrage atone, le second semestre a été précurseur des soubresauts que va vivre l'industrie mondiale en 97. Dans une croissance des ventes mondiale de l'ordre de 9%, la société Photowatt (avec 2.6 MW) apparaît au dixième rang , derrière SSI (17 MW, stable), Solarex (10,8 MW, en croissance de 14%), Kyocera (9,1 MW, +49%, dynamisé par le programme du NEDO), BP Solar (8,5 MW, +18%, qui vient de vivre 5 ans de croissance formidable), Sharp (5 MW, +25%), Sanyo (4,6 MW de silicium amorphe, en nette régression -10%), Solec (3,5 MW, + 35%, aussi dopé par le marché japonais), ASE America (3 MW, +100%, qui avec la technique de ruban rachetée à Mobil Solar, profite largement de l'arrêt des activités de la DASA en Allemagne) et Astropower (2,8 MW, +12%, le "spin-off" de l'Université du Delaware, qui avec sa technique de silicium sur céramique, gagne lentement mais sûrement du terrain depuis 4 ans).

Si l'on en croit certains analystes [6], l'industrie photovoltaïque a toujours été en surcapacité de production (avec un taux d'utilisation minimum de 40 % en 85 et un maximum de 61 % en 92); l'anticipation de la demande ayant toujours été trop optimiste et c'était jusqu'à ce jour l'une des raisons de la non rentabilité de cette industrie. Il semblerait que le programme japonais vienne brutalement renverser cette tendance. Il est d'ores et déjà acquis que les usines tourneront à pleine capacité en 1997.

2.5 Courbe d'apprentissage:

La Fig. 7 montre sur une échelle Log/Log, l'évolution historique du prix des modules de puissance en monnaie constante, en fonction du volume des ventes cumulées. En faisant certaines hypothèses, le comportement passé permet d'élaborer les tendances du futur.

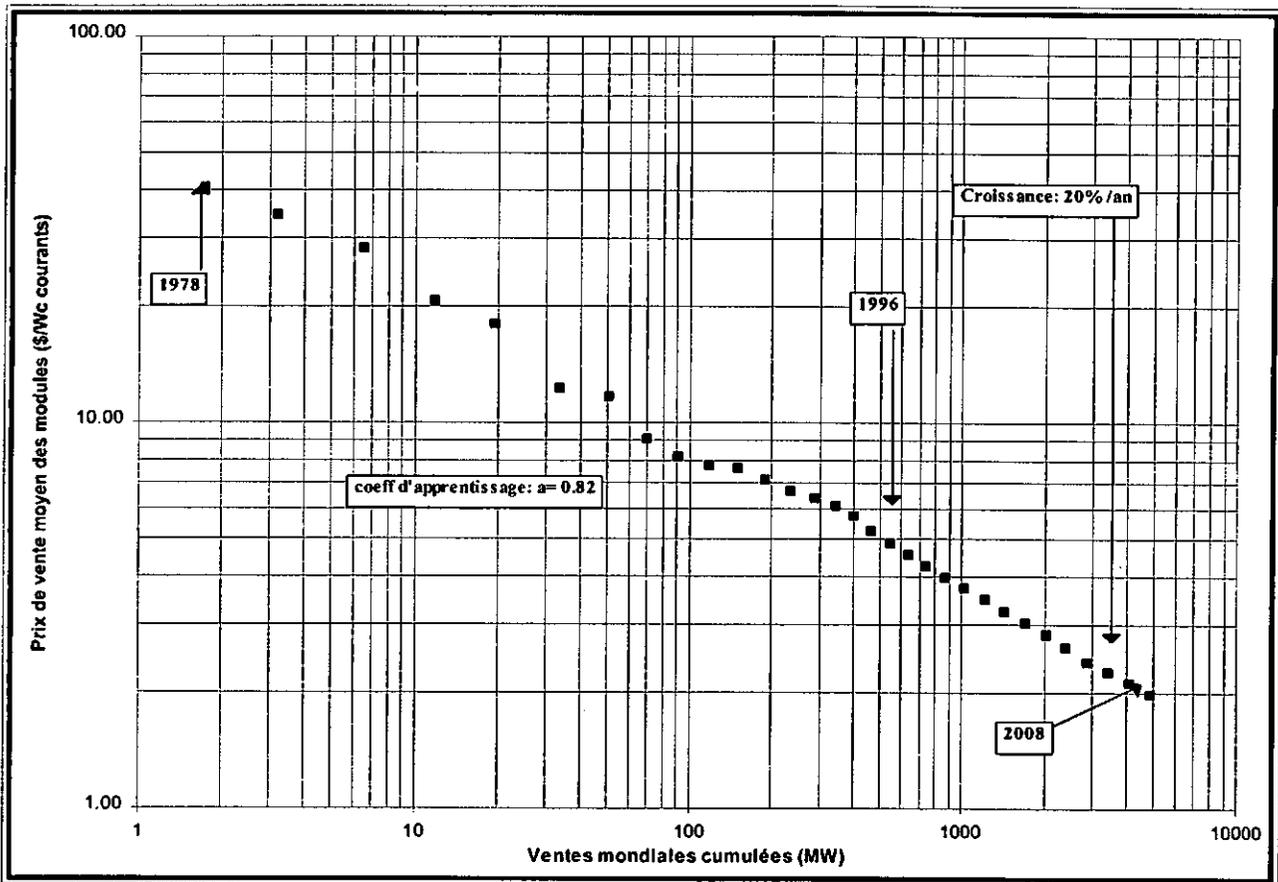


Fig.7 : courbes d'apprentissage

La formule classique est utilisée: $\ln (P1/P0) = (\ln a / \ln 2) \cdot \ln (V1 / V0)$ où a est le coefficient d'apprentissage, P le prix de vente unitaire et V le volume des ventes cumulées.

A proprement parler, la théorie de la courbe d'apprentissage s'applique à la productivité du travail humain, tout au plus à l'évaluation des coûts directs. Il faut donc rester prudent dans son usage pour prédire des évolutions de prix: elle ne prend pas en considération les variations du coût de l'énergie auxquelles cette industrie est très sensible, les périodes de récession entraînant la guerre des prix, ni les profits à regagner; elle ignore l'implantation de nouvelles technologies (en particulier elle ne dit rien sur les effets perturbateurs que vont provoquer l'entrée en production de trois nouvelles usines de modules en films minces aux USA).

Dans l'industrie électronique, le coefficient d'apprentissage est égal à 0.79; nous avons ici utilisé un coefficient d'apprentissage de 0.82 avec deux scénarios de croissance:

- le scénario "business as usual", associé à une amélioration lente de la situation économique générale, donnerait une croissance moyenne de 10 % pour les 15 prochaines années. Suivant ce scénario, le volume des ventes serait de 242 MWc en l'an 2008, le chiffre d'affaire 690 million d'Euro, et le prix de vente moyen des modules en monnaie constante (référence 1990) serait de 2.00 Euro / Wc.

- un scénario plus optimiste, qui résulterait de politiques plus volontaires - telle que l'initiative japonaise récente - donnerait lieu à une croissance moyenne de 20 % par an. En l'an 2008, le volume des ventes atteindrait alors 900 MWc, les ventes cumulées 5 415 MWc, le chiffre d'affaire annuel 2 milliards d'Euro et le prix de vente moyen serait de 1.52 Euro /Wc.

A ce point de la prospective, il n'est sans doute pas inutile de rappeler qu'au début des années 80, le département américain de l'énergie ambitionnait d'atteindre un prix de vente moyen de 0.70 \$/Wc en 1986 !... Un tel volontarisme n'était alors tempéré par aucune expérience. De façon semblable, dans les années 70 les analystes de l'industrie électronique se trompaient systématiquement dans leurs prédictions sur les prix unitaires et les volumes, ...mais les chiffres d'affaires (produit de l'un par l'autre) se révélaient toujours justes ! Dans l'industrie, les réductions des coûts procèdent d'un lent processus résultant de nombreux facteurs tels que la concurrence, la pénétration des segments de marché, la productivité des usines, l'ingénierie des procédés, l'automatisation, etc... Elles ne peuvent être proclamées ni par la communauté scientifique, ni par les politiciens; ces derniers ont cependant un rôle important d'incitation et doivent contribuer en amont par les sauts technologiques et en aval par les programmes nationaux à grande échelle.

2.6 Taille des modules et rentabilité:

En plus de l'effet d'apprentissage, nous avons remarqué des réductions de coût liées au changement d'échelle des modules. Dans le domaine des couches minces, l'expérience montre que le coût variable par unité de surface des produits se trouve réduit de 19 % chaque fois que double la surface des dits produits. C'est l'une des raisons de la course aux plus grands modules.

En outre, sachant que l'industrie des films minces est deux fois plus gourmande en capital que celle des photopiles traditionnelles, les capacités de production doivent être plus importantes pour mieux absorber des amortissements proportionnellement plus élevés et les coûts variables doivent être plus faibles. Deux raisons supplémentaires pour favoriser les modules de grandes tailles.

Ces deux derniers arguments sont aussi les raisons pour lesquelles il y a un double risque à vouloir pénétrer trop tôt le marché avec des produits en films minces: si la taille de l'usine est trop petite, le point mort est au-dessus de la capacité de production et ne peut jamais être atteint; si l'usine est trop grande, les coûts fixes ne peuvent pas être absorbés par le volume limité qu'impose le marché. A ce titre, les usines de production de photopiles traditionnelles sont mieux adaptées que les usines de photopiles en films minces car elles peuvent être agrandies par tranches de 1MWc.

Des études de marché ont montré que pour les petits modules destinés aux applications de micro-puissance, leur prix de vente par unité de surface est diminué de 28 % chaque fois que double leur surface unitaire. On notera que ce coefficient de réduction étant supérieur à celui de la réduction des coûts vu plus haut, les marges relatives croissent quand diminue la taille des modules; par conséquent, les producteurs de petits modules ont avantage à se placer dans les niches de la micro-puissance.

Ces arguments apparemment contradictoires expliquent en partie pourquoi la technologie des films minces hésite entre ... gigantisme aux USA, ...niches de micro-puissance au Japon, et ... "wait and see" en Europe.

References

1. Hill R., Guimaraes L. and Lorenzo E., Proc.10th ECPVSEC, April 1991, Lisbon, pp.1361-1366, Kluwer Academic Publishers.
2. Cadoneau G., Proc.11th ECPVSEC, Oct. 1992, Montreux, pp. 1014-1018, Harwood Academic Publishers.
3. Jack L. Stone & R.W. Taylor, NREL, Proc.11th ECPVSEC, pp.1423-1426.
4. Cours UNESCO "Electricité solaire pour les zones rurales et isolées", Bernard Chabot, Paris Juillet1991.]
5. PV News, Vol 13, N° 2, Feb. 1994.
6. "Solar Flare", Strategies Unlimited, Nov. 1993.
7. Façades et toitures photovoltaïques. Systèmes solaires N° 115, Sept. 96.

Le programme photovoltaïque de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN)

Stefan Nowak, Chef de programme
c/o NET Nowak Energie & Technologie SA
Waldweg 8, 1717 St. Ursen
e-mail: stefan.nowak.net@bluewin.ch

Introduction

Le programme photovoltaïque de l'OFEN comporte deux parties techniques (programme de recherche ainsi que projets pilotes et démonstration), une promotion directe des installations (subventions) ainsi que diverses activités de promotion indirecte (information, formation, marketing, etc.). Dans les derniers secteurs un lien existe avec le programme Energie 2000. Le programme photovoltaïque de l'OFEN fait partie du domaine „solaire actif“ de la section des énergies renouvelables. Pour ce résumé, on se limitera à la description des parties techniques du programme.

Le programme de recherche et développement (R&D)

Telle une installation photovoltaïque, le programme R&D photovoltaïque compte trois secteurs techniques, un secteur consacré aux outils d'aide à la conception et à l'analyse ainsi qu'à d'autres applications en général, enfin un dernier secteur dans lequel l'échange d'informations et la coopération internationale figurent au premier plan. Dans l'optique d'une réduction des coûts, on attache beaucoup d'importance aux considérations globales en matière d'installations et au transfert des connaissances à la pratique. L'orientation et la stratégie du programme ont été définies dans le "Concept 1996-1999" [52]; la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) les a approuvées. Les domaines d'application visés sont les systèmes raccordés au réseau et intégrés au bâtiment (application principale) et de nouvelles solutions pour les systèmes autonomes (application limitée dans son extension possible).

Les objectifs du programme, qui se situent au niveau du système énergétique dans son ensemble plutôt que simplement ses composants, sont les suivants:

- Solutions avec une réduction des coûts
- Efficacités améliorées
- Solutions industrielles
- Temps de remboursement améliorés
- Compétence

Les cinq secteurs du programme sont les suivants:

Cellules: L'effort principal porte sur les cellules au silicium en couches minces, avec plusieurs substrats possibles. Les critères d'évaluation comprennent notamment le rendement, les coûts et les possibilités de réalisation au plan technique. Les cellules cristallines minces sont étudiées à l'Institut Paul Scherrer. Dans le cadre de projets essentiellement internatio-

naux, on suit l'évolution d'autres techniques de couches minces. Le développement de cellules nanocristallines à colorant se poursuit en collaboration avec l'industrie.

Les centres de compétences se situent à l'Institut de Microtechnique de l'Université de Neuchâtel, à l'Institut Paul Scherrer, à l'EPFL et à l'EPFZ.

Modules et intégration au bâtiment : Les produits et les systèmes pour l'environnement construit figurent au centre des préoccupations, en tant qu'application principale visée. Ce faisant, on s'efforce de considérer les systèmes globalement, c-à-d technique de montage comprise, et de mettre au point les solutions industrielles correspondantes. A court terme, c'est là qu'on peut s'attendre aux réductions de coûts les plus substantielles.

Pour les modules photovoltaïques, c'est le TISO à Lugano qui s'occupe en premier lieu de ce domaine. Le centre de compétence public pour l'intégration architecturale est pris en charge par le Laboratoire d'Energie Solaire (LESO) de l'EPFL. Plusieurs bureaux d'ingénieurs et des entreprises industrielles sont également actifs dans ce domaine.

Technique des systèmes : Bien que cette technique soit déjà bien avancée, il existe aussi un gisement de réduction des coûts important, de par l'emploi de composants éprouvés et optimisés. Les éléments-clés de ce secteur sont les onduleurs, les systèmes enfichables, les considérations relevant de la sécurité, l'assurance de la qualité et les normes correspondantes.

L'Ecole d'Ingénieurs de Berthoud est le premier centre à mentionner pour la partie électrique de ce secteur.

Projets et études divers : Les aides à la conception et l'étude des obstacles non techniques servent à assurer les arrières et à accélérer le développement du marché du photovoltaïque. On recherche par ailleurs des synergies avec d'autres formes d'utilisation.

Coopération internationale : C'est l'un des piliers de tout le programme, qui se prolonge dans tous les secteurs. La Suisse est très active aussi bien dans le programme photovoltaïque de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) que dans le programme d'énergie de l'UE baptisé JOULE-THERMIE.

Dans chaque secteur du programme, il existe des contacts réguliers et suivis entre les participants aux travaux, bien sûr d'autant plus étroits que la collaboration dans le cadre d'un projet particulier est effective. Ceci est vrai tout spécialement quand les capacités nécessaires à la réalisation d'un projet se complètent judicieusement, p.ex. entre les Hautes écoles ou les Ecoles d'ingénieurs, d'une part, et les bureaux d'étude ou les industriels, d'autre part. Au niveau de la Direction du programme, la coopération avec les offices compétents de l'administration et avec l'économie électrique est excellente.

La coopération internationale est l'une des composantes essentielles du programme photovoltaïque; ces dernières années, elle a pu être encore renforcée. Le programme AIE "Photovoltaic Power Systems (PVPS)", opérationnel depuis plusieurs années, est caractérisé par une collaboration étroite au sein des divers secteurs d'activité et par un nombre croissant de résultats. Parallèlement, la participation au programme JOULE de l'UE a pu être renforcée lors de la dernière mise au concours. Cette coopération internationale apporte la preuve de la qualité supérieure et durable de la recherche suisse en matière de photovoltaïque et permet à notre pays de se maintenir en bonne place sur la scène internationale. Les nombreux contacts personnels qui se créent par là-même conduisent aussi de plus en plus fréquemment à des formes bilatérales de coopération.

Dans de nombreux secteurs de la recherche suisse en matière de photovoltaïque, le transfert à la pratique des connaissances acquises est continu et de plus en plus intense; c'est tout naturel, car cette recherche est proche des applications et revêt une importance stratégique pour les intéressés. Ce transfert se manifeste dans les applications par la concrétisation de solutions éprouvées, d'une part, et par un intérêt croissant de l'industrie, notamment dans les secteurs de l'électrotechnique et de l'industrie du bâtiment, d'autre part. Les moteurs de cette évolution sont aussi bien les réductions de coûts réalisables que les marchés potentiels identifiés. On trouve toujours plus fréquemment sur le marché des produits prêts à la production industrielle; on trouve ici comme jusqu'ici les onduleurs, auxquels s'ajoutent progressivement les composants à intégrer au bâtiment et ceux de la technique des installations électriques. D'autres facteurs favorables aux applications de haute qualité sont l'assurance de la qualité, les aides à la conception, l'expérience acquise sur une large base et l'information.

Les projets pilote et démonstration (P&D)

Les points forts des activités suisses P&D sont axés sur les institutions chargées de la formation - des écoles des métiers de l'électricité aux installations des Hautes écoles - et sur l'intégration du photovoltaïque au bâtiment.

En 1996 par exemple, sept installations PV du programme P&D, d'une puissance totale de 127 kWp, ont été construites. Citons celle de 20 kWp de l'Ecole d'ingénieurs de Buchs SG, un projet combiné photovoltaïque / protection contre le soleil de la Ville de Winterthour et l'installation de 52 kWp „Gare solaire de l'Ecole professionnelle de Lucerne“. La Suisse romande compte également plusieurs installations P&D récentes comme une installation hybride PV-thermique de 7 kWp à Domdidier, une installation de 6 kWp en silicium amorphe sur l'Institut de Microtechnique à Neuchâtel ou une installation avec des éléments de toits plats à l'EPFL.

Dans l'ensemble, neuf installations PV d'une puissance totale de 422 kWp ont été mesurées en 1996 dans le cadre du programme P&D et les résultats dépouillés. Les résultats des mesures de longue durée effectuées sur sept autres installations dans le cadre du projet P&D des Nord-Ost Schweizer Kraftwerke (NOK) sont analysés selon les directives européennes. Le programme de mesure dans les écoles des métiers de l'électricité a fourni à ce jour au total 289 mois de mesures dépouillées relatives à 17 installations PV d'une puissance totale de 176 kWp. Ces données sont transférées à la base de données internationale de l'AIE, dans le cadre de la contribution de la Suisse à la Tâche 2 du PVPS.

Références

1. Forschungskonzept Photovoltaik 1996 - 1999, S. Nowak, BEW, Septembre 1996.
2. Rapport de synthèse du programme de recherche photovoltaïque 1996, OFEN, Avril 1997.
3. La recherche énergétique relevant des pouvoirs publics en Suisse, OFEN, 1997.
4. Photovoltaic Power Systems in selected IEA member countries - the second of a series of survey reports, IEA PVPS, March 1997

Annexe : statistique du photovoltaïque en Suisse

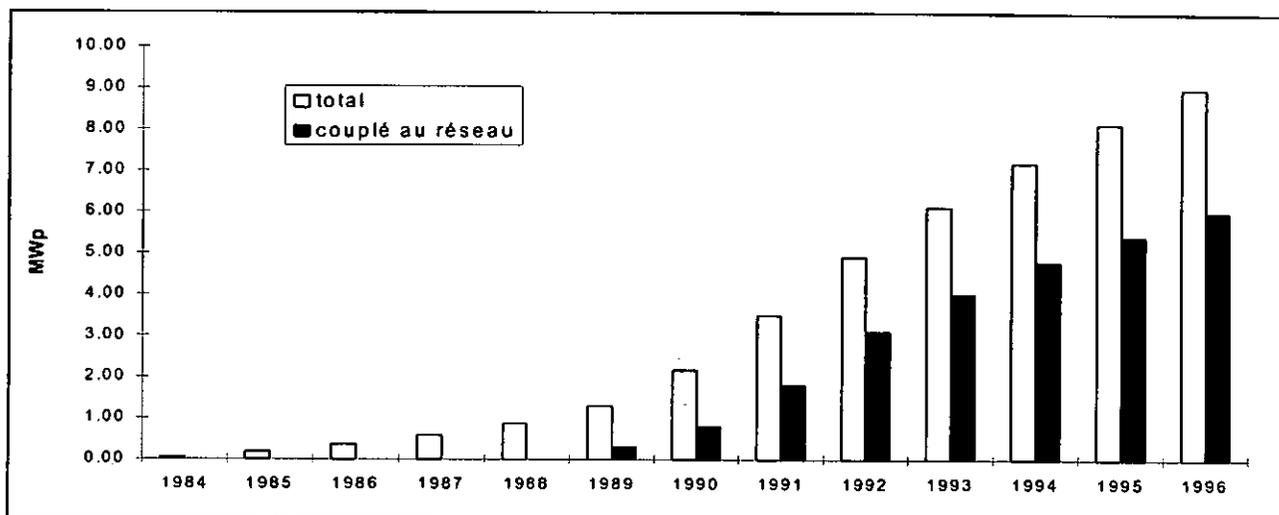


Fig.1 : Evolution de la puissance installée, total et sur réseau (valeur en fin d'année).

Année	Nombre d'installations	Puissance installée [MWp DC]	Production d'énergie [MWh]	Production d'énergie spécifique [kWh / kWp]
1989	60	0.3		
1990	170	0.8	400	
1991	380	1.8	1100	
1992	490	3.1	1800	801
1993	600	4.0	3000	810
1994	680	4.8	3500	800
1995	740	5.4	4000	815
1996	820	6.2	4700	825

Fig.2 : Statistique énergétique du photovoltaïque en Suisse (installations couplées au réseau).

L'électrification rurale avec des systèmes photovoltaïques en Bolivie

Javier Gil Quiroga
Empresa Consultora P.A. & Partners
Torres Sofer, Oficina 502 - Cochabamba - Bolivia
e-mail : javier@pa.cnb.net

1 Introduction

Dans les régions rurales de la Bolivie, environ 3 000 000 de personnes, soit 600 000 familles et près de 8 000 services publics (écoles, hôpitaux, etc.), ne possèdent aucun service pour accéder à l'électricité. Le manque de ressources économiques repousse, dans l'avenir, les perspectives d'extension des réseaux de distribution d'électricité.

La possibilité d'utiliser l'électricité est étroitement liée à la qualité de vie et devient une condition pour le développement d'une région ou d'un pays. De plus, elle permet de satisfaire les besoins fondamentaux, tels que la cuisson d'aliments, l'illumination, le chauffage et la réfrigération. Elle est également indispensable pour assurer des processus productifs, ainsi que pour l'irrigation et la santé.

Il est rare que les régions rurales des pays non-industrialisés jouissent de conditions favorables pour satisfaire leurs besoins énergétiques grâce aux ressources modernes et commerciales tels que l'électricité, le gaz naturel ou les dérivés du pétrole. Ceci est dû à la non disponibilité de ces ressources, par manque de possibilités économiques ou de financements.

Le manque d'électricité et l'insuffisance de ressources d'énergie, créent, pour l'habitant rural, des obstacles dans son quotidien, dans le rendement de son travail, dans son accès aux loisirs, à l'information, à la santé et à l'hygiène. Ces inconvénients s'ajoutent, en conséquence, aux autres causes qui provoquent l'exode vers les villes. Cela provoque souvent une croissance incontrôlable des zones urbaines, la dégradation de l'environnement et une baisse générale de la qualité de vie.

Dans les régions rurales de la Bolivie, le bois reste la source principale d'énergie. On estime que la surface boisée du pays souffre d'une perte annuelle de environ 100 000 ha, due à l'exploitation irrationnelle et à l'expansion des frontières agricoles. La déboisement à des fins nettement énergétiques contribue pour 15% à cette perte. On estime que le temps utilisé pour la cueillette du bois à brûler est d'environ 1.3 journées par mois et par famille. Dans les régions les plus déboisées ce taux augmente de deux journées de travail par semaine et par famille.

2 Description générale de la Bolivie

Aspects géographiques

La Bolivie est un pays sans accès à la mer, situé au centre de l'Amérique du Sud, entouré par le Chili et le Pérou à l'ouest, par l'Argentine et le Paraguay au sud et par le Brésil au nord et à l'est. Sa surface totale est de 1 098 581 km², ce qui équivaut à la superficie de la France et de l'Espagne réunies.

Sur le territoire, il y a trois régions climatiques très différentes : les plaines amazoniennes tropicales, les vallées montagneuses, et le haut plateau andin entouré par des cordillères:

- La région des plaines amazoniennes se trouve à l'est du pays, à une altitude inférieure à 500 m sur le niveau de la mer. C'est la région des forêts tropicales humides et des vastes plaines, riche en faune et en flore. De grands fleuves, affluents des bassins de l'Amazone et du Pilcomayo, traversent la région. La température moyenne annuelle se situe entre 22 et 25° C. La surface totale de cette région équivaut à 59% du territoire national.
- Les vallées montagneuses, appuyées sur les flancs des cordillères, forment une bande qui traverse le centre du pays. Le climat est tempéré et chaud, avec des températures situées entre 18 et 25° C. L'altitude moyenne est de 2 500 m. sur le niveau de la mer. Cette région occupe 13% de la surface totale du pays.
- Le haut plateau se trouve à l'ouest du pays. L'altitude moyenne est de 3 500 m sur niveau de la mer. Sa surface est de 307 000 km², ce qui représente 28% du territoire de la Bolivie. Le plateau est entouré par les Cordillères Occidentale et Orientale où s'élèvent quelques-unes des plus hautes montagnes de l'Amérique du Sud. Sur le haut plateau se trouve le lac Titicaca qui s'étend sur 8 100 km². La température annuelle moyenne dans la région des hauts plateaux est dans l'ordre de 10°C.

Aspects Socio-démographiques

Population: En 1996, la population de la Bolivie atteint 7 588 392 habitants, 60.3 % de la population habite les villes et 39.7% les régions rurales. En 1992, le 57.5% de la population habitait les villes et 42.5 % habitait à la campagne. En 4 ans on a assisté à un processus accéléré d'urbanisation: 68.5 % de la population est concentrée sur les grandes villes de l'axe La Paz-Cochabamba-Santa Cruz, le 31.5% restant est réparti sur les six autres départements.

Entre 1995 et 2000, le taux de croissance de la population sera de 2.3% par an. La densité démographique est passée de 5.8 habitants par km² en 1992, à 6.9 en 1996. Le département qui connaît la plus grande densité est Cochabamba, avec 24.7 hab/km², suivi par La Paz avec 17.1, Chuquisaca avec 10.4 hab/km², Tarija avec 9.5, et enfin Oruro avec 7.1. Les autres départements ont une densité inférieure à la moyenne nationale: Potosí avec 6.2, Santa Cruz avec 4.3, Beni avec 1.5, et Pando avec 0.8 hab/km².

Education: D'après le recensement de 1992, le taux d'analphabétisme du pays, pour la population âgée de plus de 15 ans, est de 20%. Ce taux baisse à 8.9% dans les villes et augmente dans les campagnes à 36.5%. Il y a plus d'analphabètes chez les femmes (27.8%) que chez les hommes (11.8%). Dans tout le pays, le taux de scolarisation, pour les personnes âgées de 6 à 19 ans, est de 74.3% (76.5% pour les hommes et 72.1 % pour les femmes). En 1993, l'infrastructure éducative comprenait 11 878 écoles, dont 10 485 appartenaient à l'Etat et 1 393 à des institutions privées. Approximativement 22% de ces infrastructures se trouvaient dans les villes et 78% à la campagne.

Santé: Le taux de mortalité infantile entre 1995 et 2000 est de 65.7 pour mille. Pendant la période précédente (1990-1995), ce taux atteignait 75.1 pour mille. Aussi, entre ces deux périodes, l'espérance de vie est passée de 59.3 à 61.4 ans. En 1996 l'espérance de vie a atteint 60.8 ans. En 1995, le pays comptait 2 262 établissements de santé, avec 11 326 lits au total. A peu près 89% de ces établissements appartenait au système public de santé et 11% au système de Sécurité Sociale. Seulement 23.2% de la population bénéficie d'un système de Sécurité Sociale (1 721 605 personnes).

Services: En 1992, 54% des foyers étaient connectés à des réseaux de distribution d'eau potable (81.1% dans les villes et 19% dans les campagnes). Le 43% des foyers possèdent des sanitaires (63% dans les villes, et 17% dans les campagnes). Approximativement 55% des foyers reçoivent l'électricité (87% dans les villes, et 19 % dans les campagnes).

Revenu: En 1992, le revenu par habitant par an était d'à peine 800 \$US par an. C'est l'un des plus bas de l'Amérique du Sud. Ce revenu est de \$US 1 400 dans les villes et de 300 \$US en moyenne dans les régions rurales, il faut souligner qu'il existe une grande dispersion de cette variable. Une autre indication des différences entre milieu urbain et rural est le taux de pauvreté: 52.6% dans les villes et 95.2% à la campagne.

3 Caractéristiques de la consommation et de l'offre d'énergie dans les régions rurales de la Bolivie

L'énergie en Bolivie.

Le pays possède plusieurs sources d'énergie. Celles-ci comprennent les carburants traditionnels (bois, déchets agricoles, fumier), les ressources hydroélectriques (avec un potentiel estimé à environ 18 000 MW, dont seulement 300 MW sont actuellement exploités), et les combustibles d'origine fossile (réserves estimées de pétrole: 24 Mtoe ; de gaz naturel: 3.8 tcf).

L'énergie solaire est abondante dans une grande partie du territoire. Le potentiel énergétique éolien n'est pas assez connu, mais dans certaines régions il est considéré comme un potentiel intéressant (Santa Cruz et le sud du haut plateau).

Le secteur électrique comprend environ 785 MW installés. Un 38% de la production d'électricité est générée dans des usines hydroélectriques (300MW). Le restant, soit 62% (486 MW), est généré par des turbines à gaz et diesel. La dispersion de la population dans un territoire très vaste et une géographie souvent accidentée, sont à l'origine de beaucoup de problèmes et augmentent le coût de distribution d'électricité.

Les figures 1 et 2 présentent les principales caractéristiques de la production d'énergie primaire, ainsi que la consommation finale, pour l'année 1994.

Il existe un fort déséquilibre entre la production d'énergie primaire et la consommation d'énergétiques. Par exemple, la production de gaz naturel équivaut à 68% de la production d'énergétiques, mais seulement à 11% de la consommation.

Le gaz occupe le troisième rang des réserves énergétiques, après la biomasse et l'hydraulique. Presque un 45% du gaz est brûlé à son origine avec les effets nocifs correspondants sur l'environnement. Néanmoins, cette situation changera avec le projet d'exportation de gaz au Brésil.

Il est intéressant de noter l'énorme importance de la biomasse dans la matrice énergétique de la Bolivie. En effet, elle représente 30% de la consommation d'énergie du pays et occupe le deuxième rang après les dérivés du pétrole.

Le pétrole occupe le dernier rang des réserves, cependant en ce qui concerne la demande il dépasse le 50% du total de la consommation, mais sa production est inférieure à 17% de la production totale d'énergie. Ces déséquilibres s'expliquent en partie par la politique de

fixation des prix menée par le gouvernement et par l'absence d'actions qui conduiraient à une utilisation plus rationnelle de l'énergie.

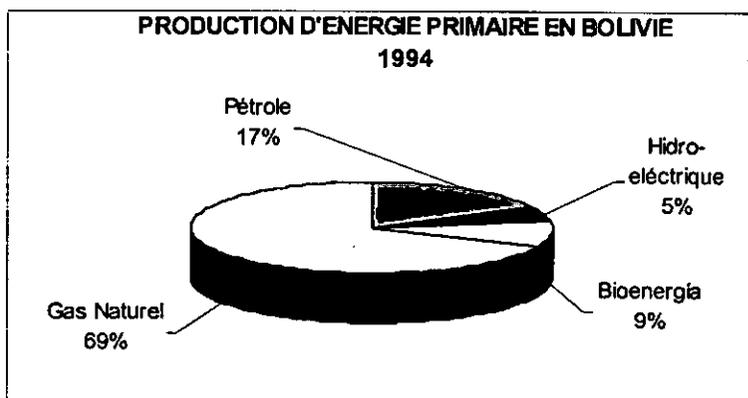


Figure 1. Production d'énergie. Source : SNE.

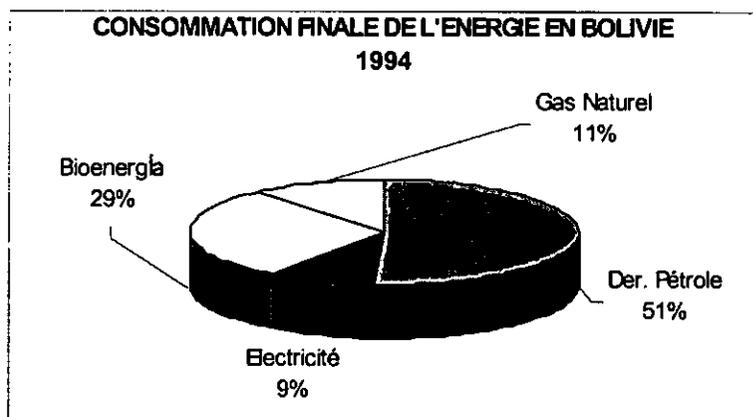


Figure 2. Consommation d'énergie. Source : SNE.

En ce qui concerne la consommation par secteurs, la consommation domestique et commerciale représente un 38% de la consommation totale. Une partie importante de la consommation domestique provient de la biomasse, particulièrement dans les régions rurales.

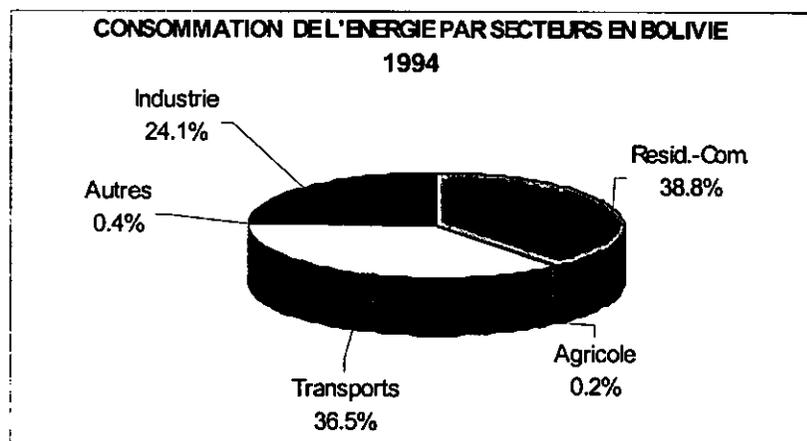


Figure 3 : Consommation d'énergie par secteur. Source : SNE

Les transports consomment 36.5% du total. Ils consomment, évidemment, surtout des dérivés du pétrole. Le secteur industriel consomme le 24% du total. Le secteur agricole et d'élevage, se trouvant en général dans les régions rurales, ont une consommation d'énergie commerciale insignifiante (à peine 0.2%). Ceci confirme que presque toute l'énergie consommée dans l'agriculture provient de sources traditionnelles telles que la traction animale et humaine.

Sources énergétiques et consommation dans les zones rurales.

La principale source d'énergie du monde rural est la biomasse (bois, charbon résidus végétaux, fumier). Dans ces régions, la consommation est approximativement la suivante : 78% pour la biomasse (63% en bois, 15% en fumier), 16% pour les dérivés du pétrole (principalement en gaz propane liquide et 3% en kérosène), 2% pour l'électricité, et 4% pour les autres sources. Ceci démontre que le secteur rural satisfait ses besoins en énergie par l'exploitation de la biomasse.

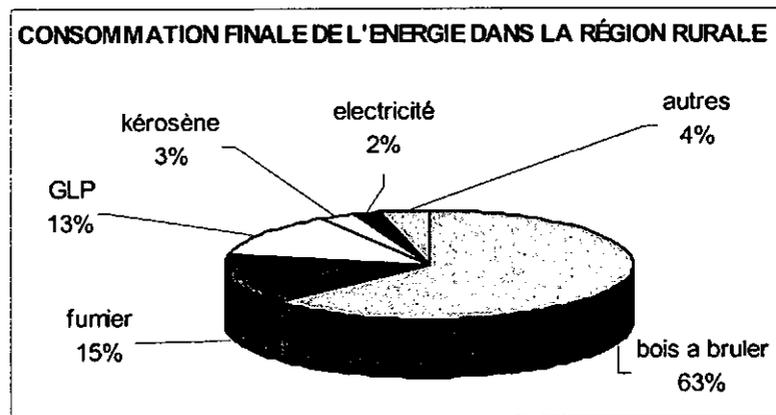


Figure 4 : Consommation d'énergie dans la région rurale. Source : SNE.

En ce qui concerne l'usage de l'énergie consommée dans les régions rurales, les moyennes sont : de 89% pour la cuisson d'aliments, de 5% pour l'éclairage, de 4% pour l'eau chaude, et de 2% pour les autres besoins.

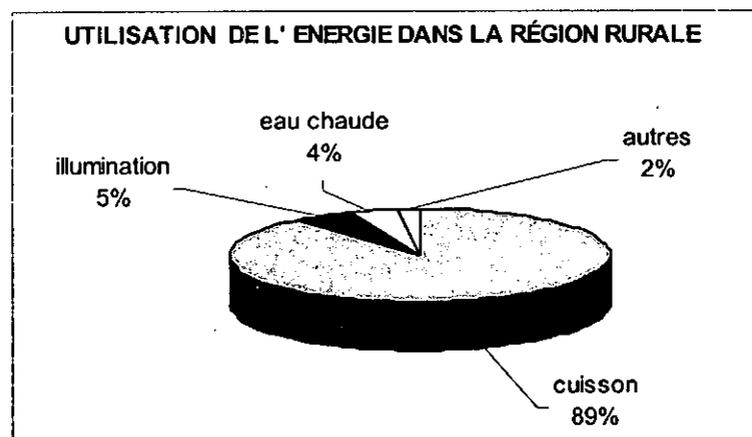


Figure 5 : Utilisation finale d'énergie dans la région rurale. Source : SNE

Dans les communautés dispersées des vallées, 91% de la demande d'énergie est satisfaite par le bois. Dans les hauts plateaux du nord, la demande est couverte à 53% par le fumier. Pour satisfaire la demande exigée pour la cuisson des aliments, 96 500 tonnes de bois et 263 000 tonnes de fumier sont utilisés par an.

Demande potentielle d'électricité dans les régions rurales.

Dans les régions rurales l'usage de batteries sèches est très répandue. Des piles sont utilisés pour l'éclairage, pour les postes de radio, et pour les magnétophones. Dans certaines régions, on utilise aussi des piles pour générer de la lumière lors de certaines tâches productives, telles que l'irrigation et le labourage, ceci spécialement dans les régions chaudes où ces travaux doivent être effectués pendant la nuit, à cause de la chaleur pendant la journée.

Quand des foyers ruraux sont branchés sur un réseau électrique, l'énergie consommée n'atteint guère plus d'1kWh par jour. L'électricité est surtout utilisée pour l'éclairage (4 à 6 heures par jour) et pour les loisirs (4 à 6 heures de radio et/ou TV par jour). Quand les foyers n'ont pas accès à un réseau, ils ont la même demande d'énergie pour à peu près les mêmes usages. Ils doivent alors avoir recours à d'autres technologies, d'une qualité de service inférieure et à un coût trop élevé.

Pour satisfaire ces demandes d'illumination et communication, les foyers ruraux utilisent les sources d'énergie suivantes: bougies, kérosène pour allumer des lampes de qualité variable, piles sèches et batteries de démarrage. La quantité et l'usage de consommation dépendent des revenus et du prix des sources d'énergie. Les prix varient selon la situation des foyers par rapport aux centres urbains. Il est donc très difficile d'avancer des affirmations exactes sur la consommation et les coûts de l'énergie.

Néanmoins, dans tous les groupes, il y a une demande en éclairage d'au moins 4 heures par jour. Les foyers très pauvres satisfont ce besoin avec une lampe unique, qui consomme très peu de kérosène et fournit une faible lumière. D'autres foyers, plus favorisés, utilisent des lampes réglables, munies d'une protection en verre. Les plus riches ont des lampes à pression qui offrent plus de lumière et un rendement de conversion plus élevé, mais qui consomment aussi plus de kérosène. Les bougies sont utilisées dans tous les foyers car elles sont facilement transportables.

4 Potentiel de l'énergie solaire en Bolivie

La situation géographique de la Bolivie et ses caractéristiques climatiques font que l'énergie solaire représente une ressource importante et abondante. La région des hauts plateaux appartient au 5% de la surface terrestre recevant le plus fort ensoleillement de la planète (> 7.5 kWh/m²/jour). Presque tout le territoire national jouit d'un potentiel énergétique solaire très élevé et rares sont les régions qui n'en bénéficient pas.

L'abondance de soleil en Bolivie fait que son utilisation peut avoir un rayon d'action très large. En effet, par rapport à toutes les autres sources d'énergie connues, le soleil a le plus vaste rayon d'action. Pour cette raison, entre autres, l'énergie solaire devrait être une composante fondamentale de la matrice énergétique rurale et même nationale, surtout à moyen terme.

Actuellement, on utilise l'énergie solaire principalement pour la déshydratation de produits agricoles (avec des moyens traditionnels ou des techniques améliorées), pour certaines cultures (serres solaires), pour le chauffage d'eau, et pour la génération d'électricité au moyen de panneaux solaires.

En général, on peut dire qu'en Bolivie, l'offre moyenne d'énergie solaire annuelle est d'environ 6 kWh/m²/jour, avec des variations saisonnières inférieures à 40%.

Information disponible

L'information sur l'ensoleillement sur le territoire du pays reste encore trop faible. Néanmoins, lors des dernières années on a mesuré l'intensité solaire et on a recueilli des données de 23 stations météorologiques réparties dans différentes zones géographiques (Programme d'Energie Solaire, Universidad Mayor de San Simon). Une grande partie de l'information concernant l'ensoleillement provient de corrélations établies à partir de mesures d'heures d'ensoleillement. Seulement quelques stations ont les moyens de mesurer directement la radiation horizontale. En effet, seules les stations des grandes villes et des aéroports ont des radiomètres et pyranomètres.

C'est pour cette raison que la précision d'une partie de l'information, surtout celle qui est estimée à partir d'heures d'ensoleillement, est de l'ordre de 15%.

Caractéristiques de l'ensoleillement en Bolivie

D'un point de vue astronomique, l'ensemble de la surface territoriale de la Bolivie reçoit entre 11 (solstice d'hiver) et 13 heures (en été) d'ensoleillement journalier.

Le comportement caractéristique de l'ensoleillement, incident sur une surface horizontale, peut être apprécié pour les trois régions climatiques dans la figure 6.

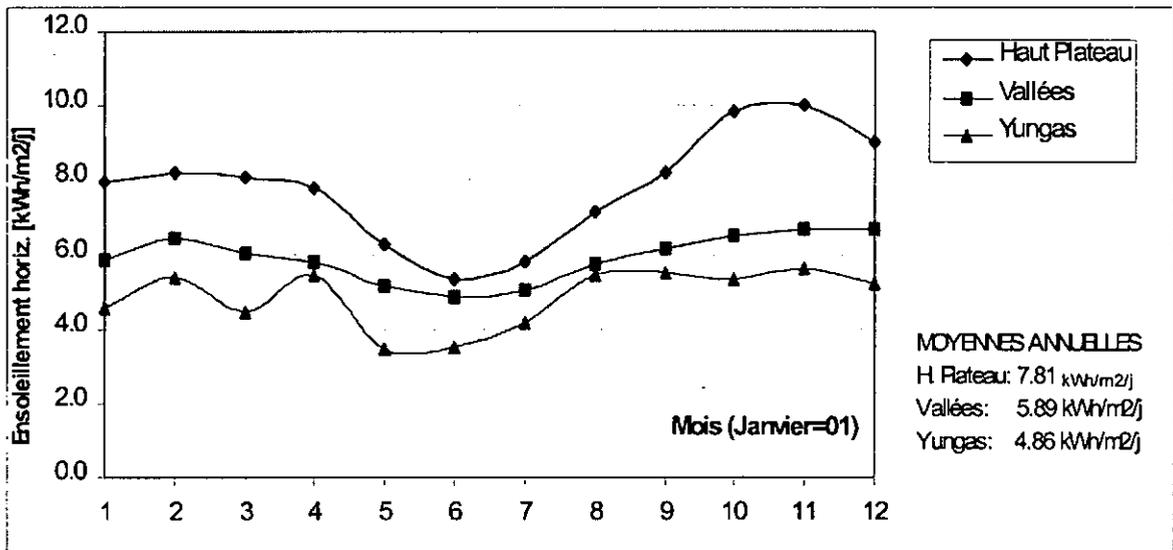


Figure 6. Variation mensuelle de l'ensoleillement journalier sur plan horizontal (moyennes journalières mensuelles). Source: SNE.

5 Potentiel d'application des systèmes photovoltaïques en Bolivie

L'électrification fondamentale

Les foyers ruraux et en particulier ceux qui n'ont pas accès aux réseaux électriques, exigent généralement, une demande énergétique qui est petite en comparaison à celle des foyers urbains. Le besoin le plus important est celui pour la cuisson des aliments. Du point de vue des politiques énergétiques, la demande pour la cuisson - qui s'exprime par une grande demande de bois, de fumier et, en général, de biomasse - reste le problème énergétique fondamental. Ce besoin doit être satisfait de manière prioritaire par les personnes affectées et

par l'environnement aussi touché. Ce besoin ne peut être résolu par l'utilisation de l'électricité photovoltaïque. Un projet qui se limiterait à distribuer des systèmes à énergie solaire se heurterait à des problèmes, car il ne tiendrait pas compte du contexte général des besoins ruraux. Une évaluation erronée des priorités de l'habitant rural conduirait à des mesures trompeuses.

La demande énergétique des foyers ruraux va plus loin que la satisfaction des besoins pour la cuisson des aliments et le chauffage, et elle n'est pas moins légitime du point de vue socioculturel. Il existe aussi une demande de quelques heures d'éclairage nocturne, mais aussi pour les loisirs, l'éducation et l'information télévisuelle ou radiophonique. C'est cette faible consommation énergétique qui pourrait être satisfaite par l'électricité solaire. Et c'est justement le volume réduit de la demande et son caractère "consumentiste" (non productif) qui rendent la coûteuse livraison de courant alternatif par réseau moins probable.

Donc, on entend par «électrification fondamentale», la satisfaction des demandes minimales d'électricité pour l'éclairage, loisirs, éducation et information, par le moyen d'un système de distribution d'électricité.

L'électrification en Bolivie et les systèmes photovoltaïques

Dans les régions proches du réseau d'électricité interconnecté national, l'extension du réseau est encore le moyen le plus utilisé pour l'électrification rurale. Pour beaucoup de communautés, cette option est encore la plus économique. Néanmoins, les accidents géographiques et la dispersion de la population font qu'une grande partie du territoire se trouve dans un état trop "décentralisé" pour pouvoir être connectée rationnellement au réseau.

Auparavant, des petites communautés ont produit leur propre électricité à l'aide de générateurs diesel. Ces systèmes exigent généralement un investissement relativement faible pour ce qui concerne l'achat et l'installation. Mais, ils ont des coûts élevés d'opération et d'entretien. Souvent, ces coûts n'ont pas pu être assurés par les usagers. De plus, la gestion de ces systèmes (opération, conservation, encaissement des tarifs, fourniture du combustible, etc.) a, dans une grande majorité de cas, échoué à cause de facteurs divers (culture, type d'économie, etc.). Dans le passé, même avec des prix subventionnés pour le diesel, le coût du transport du combustible jusqu'aux générateurs, a provoqué des tarifs élevés et une fourniture irrégulière d'énergie pour les usagers. Avec la libération des prix du diesel, l'arrivée de ce combustible jusqu'aux régions éloignées deviendra encore plus chère.

On peut donc affirmer que l'ancienne politique d'électrification rurale a été un échec avec les caractéristiques suivantes:

- des coûts d'investissement élevés (extension des réseaux) qui ont provoqué une augmentation de la dette extérieure,
- une très basse consommation (moins de 1kWh/jour), des facteurs de charge inférieurs à 0.2 et des pertes élevées (entre 15 et 50%) dues à des raisons techniques et autres.
- des revenus insuffisants pour couvrir les coûts continuels d'opération et de conservation, ce qui a provoqué un entretien peu satisfaisant des systèmes.

Pour ces raisons, plus de 70% des coopératives rurales d'électrification boliviennes ont disparu ou ont fait faillite.

Les systèmes photovoltaïques, permettant la génération décentralisée et autonome de l'électricité, et en exigeant un service minime pour leur opération et leur conservation, deviennent, dans ce contexte, des sources adéquates pour fournir de l'électricité aux régions éloignées des réseaux de distribution d'électricité et d'énergétiques commerciaux conventionnels.

Néanmoins, leur coût d'investissement élevé rend nécessaire une utilisation stratégique. Celle-ci est déterminée par l'échelle de l'utilisation et par la nature des charges à satisfaire. On doit prendre en considération deux aspects avant de choisir un système électrique à énergie solaire : la quantité de l'énergie requise, et les conséquences de l'emploi de l'énergie dans la vie de l'utilisateur.

Ceci dit, il est évident que la technologie photovoltaïque trouve son plus grand potentiel d'application dans l'électrification fondamentale domestique au sein des régions rurales qui n'ont pas de possibilités de connexion avec le réseau national.

Nombre d'utilisateurs potentiels, puissance installable.

Comme on l'a déjà signalé, le revenu moyen dans les régions rurales est de 300 \$US par an, et il peut être aussi bas que de 60 \$US/an dans certaines régions. Ce montant est employé par l'habitant rural, en général, pour l'acquisition des biens nécessaires à son subsistance.

Si on tient compte du coût typique d'un système photovoltaïque domestique, on s'aperçoit facilement de l'impossibilité économique d'accès d'un paysan dans des termes moyens généraux. Cependant, étant donné la diversité qu'on trouve dans le secteur rural, il existe des couches qui ont une capacité d'achat d'un système photovoltaïque.

Des estimations indiquent que, entre 7 000 et 18 000 unités familiales ont des possibilités d'accès à un système photovoltaïque dans l'immédiat. La puissance installée estimée se trouverait entre 370 kWp et presque 1 MWp.

Les projections indiquent la possibilité de couvrir pour l'an 2000 toute la population urbaine et un 60% de la population rurale avec des services d'énergie et d'électricité conventionnels. Dans le cas hypothétique que ces prévisions soient accomplies, et en tenant compte de l'accroissement de la population, il resterait quelques 1 800 000 personnes (350 000 familles) sans accès aux services d'électricité. Cet ensemble constituerait l'univers d'utilisateurs potentiels de systèmes photovoltaïques. La quantité d'utilisateurs réels dépendra étroitement de l'évolution de politiques de financement.

Autres utilisations potentielles des systèmes de production d'électricité par énergie solaires en milieu rural.

En Bolivie, les systèmes d'électricité à énergie solaire peuvent avoir d'autres usages qui ne sont pas moins stratégiques et importants. Ils servent à activer des systèmes de: communication, pompage d'eau, réfrigération sanitaire, désinfection d'eau, dans le milieu éducatif et pour des systèmes communaux de distribution d'électricité.

Compétitivité de la génération photovoltaïque centralisée face à la génération hydroélectrique, la génération à gaz naturel, et la génération électrique thermosolaire.

A court terme, les grandes centrales photovoltaïques et thermiques solaires ne sont pas compétitives face aux centrales hydrauliques ou thermiques à gaz naturel. En effet, le pays

possède actuellement un potentiel important pour l'exploitation de ces ressources avec des coûts plus bas qu'avec les technologies solaires.

C'est seulement dans les cas de demandes relativement modestes et dans les régions rurales dispersées où les technologies solaires et en particulier la photovoltaïque deviennent économiquement compétitives.

6. Obstacles à l'électrification avec des systèmes photovoltaïques.

Malgré la volonté et l'engagement du gouvernement bolivien avec l'électrification rurale, demeurent présents une série d'obstacles qui empêchent l'Etat d'atteindre son but d'électrifier 60% des régions rurales, prévu pour l'an 2001. On calcule que pour électrifier la totalité des régions rurales, on aurait besoin de plus de mille millions de dollars US, pour les prochains trente ans.

Institutions de financement

A l'échelle nationale, il y a un grand besoin de sources de financement pour le développement rural en général et pour l'électrification en particulier. Ces ressources pourraient se rendre disponibles pour l'électrification si le secteur privé pouvait être mobilisé afin d'augmenter les ressources déjà mises en place par l'Etat. Cette année, plus de 300 projets d'électrification rurale ont été identifiés. La majorité d'entre eux envisagent une expansion du réseau ou des petits systèmes de génération à gaz ou diesel. Certains proposent des énergies renouvelables. Des 65 millions de dollars US nécessaires, quinze seulement sont disponibles (fonds des gouvernements départementaux ou de la «Participation Populaire»).

Les institutions boliviennes de financement se sont montrées totalement inactives pour l'électrification rurale. En pratique, les banques se limitent à financer une gamme limitée d'investissements aux entreprises qui ont un lourd passé de crédits et qui possèdent un grand capital de base. Les taux d'intérêt sont élevés (18-24%), les périodes de remboursement sont brefs (3-4 ans) et les exigences de garantie sont importantes (200%). Ces conditions posent des obstacles au financement de l'électrification rurale par les banques.

Les institutions financières n'ont pas d'expérience sur le rendement technique et économique de systèmes basés sur des énergies renouvelables. Elles auraient besoin d'une assistance technique, d'un renforcement de ses capacités et, éventuellement, de capitaux pour pouvoir s'engager dans le financement de ce type de projets.

Coût élevé du capital. Obstacle du coût initial.

Dans plusieurs cas, quand on tient compte du cycle de vie des projets, l'électrification rurale décentralisée trouve dans les énergies renouvelables une option moins chère que les options conventionnelles. Mais, le coût du capital ou le coût initial des systèmes microhydroélectriques, photovoltaïques ou éoliens sont souvent plus élevés que ceux qui sont nécessaires pour les alternatives conventionnelles. Ceci fait que les communautés rurales pauvres ne choisissent pas l'option des énergies renouvelables. En outre, si l'on tient compte des obstacles posées par les institutions financières, les foyers pauvres se trouvent dans l'impossibilité d'assumer les coûts du capital nécessaire pour payer un équipement à énergie renouvelable. La mise en place d'un fond rotatif associé d'assistance technique au secteur financier, pourrait faciliter le financement et démontrer une viabilité commerciale à long terme.

Obstacles techniques: le problème de la qualité des systèmes et de ses composantes.

Les projets démonstratifs ont prouvé que les systèmes à énergies renouvelables peuvent fonctionner convenablement pendant des longues périodes de temps. Néanmoins, jusqu'à présent il y a eu un manque de normes solides pour garantir la qualité et adéquation des composantes, systèmes ainsi que leur installation. Ceci est le cas en particulier pour les installations photovoltaïques. Il n'y a pas, non plus, les capacités pour vérifier que les installations soient réalisées en accord à certaines normes ou standards de qualité.

En conséquence une grande partie des installations ont été faites de façon peu professionnelle. Le résultat immédiat est que ces installations éoliennes ou photovoltaïques souffrent d'une mauvaise réputation auprès de la population rurale, qui se désintéresse de ces systèmes.

Il est donc indispensable d'accélérer le développement de normes, de codes et de procédures de garantie de la qualité en ce qui concerne les composantes des systèmes ainsi que leur installation.

Limitation des ressources humaines.

Les limitations des ressources humaines sont aussi un obstacle important pour l'électrification rurale décentralisée avec des énergies renouvelables. La population rurale ne connaît pas les principes d'opération de ces systèmes; elle ignore comment ils sont construits, quels sont les besoins nécessaires à leur conservation et leurs coûts habituels. En outre, les entreprises mixtes (Etat-privé) et les autres institutions nécessaires à la mise en route de projets sont très peu connues. Il sera nécessaire d'identifier et d'éduquer le personnel technique et de gestion pour pouvoir mettre en place convenablement les systèmes à énergies renouvelables.

7 Politiques et stratégies actuelles de l'état visant à répandre les systèmes photovoltaïques

Nouvelle structure du secteur énergétique.

Les réformes structurelles, que l'Etat vient de mettre en place, dans l'économie et dans le secteur énergétique en particulier, visent à une distribution efficace des ressources économiques et énergétiques. Ces réformes redéfinissent le rôle de l'Etat et le conduisent vers un modèle plus décentralisé. Elles cherchent à créer un climat favorable à la participation du domaine privé dans un contexte macro-économique.

Une des premières mesures prises était le Décret Suprême No. 23660 d'octobre 1993, qui a réorganisé le pouvoir exécutif et a créé le Ministère du Développement Durable et de l'Environnement. C'est la première fois qu'un gouvernement donne autant d'importance à ces deux priorités du développement.

Les principales mesures prises en relation avec le secteur énergétique sont: la loi sur les hydrocarbures, la loi sur l'électricité, la loi sur l'environnement, la libéralisation des marchés, et la capitalisation des entreprises de l'Etat.

Les lois sur les hydrocarbures et l'électricité établissent des normes pour encourager l'initiative privée à tous les niveaux de l'industrie énergétique. La libéralisation des marchés réduit les interventions de l'Etat, établit la libre concurrence et permet que les prix des produits énergétiques soient définis par l'offre et la demande.

La loi sur l'environnement favorise les projets incluant des énergies renouvelables par rapport à ceux qui sont basés sur des énergies conventionnelles.

La Loi de Capitalisation des entreprises de l'Etat cherche à ce que le secteur privé devienne le moteur de la croissance. Cette loi permet qu'une partie des propriétés de l'Etat soit cédée à des entreprises privées en échange de capitaux, en vue d'un essor de nouvelles entreprises mixtes (49% Etatiques-51% privées). Les entreprises les plus importantes déjà capitalisées sous cette loi sont: la régie des pétroles (YPFB), la compagnie nationale d'électricité (ENDE), l'entreprise nationale de télécommunication (ENTEL) et la compagnie nationale des chemins de fer (ENFE).

Toutes ces réformes impliquent également des réaménagements institutionnels au niveau de l'Etat, en vue de fortifier sa capacité à fixer des politiques, à établir des normes et à maintenir la concurrence des marchés.

Il est logique qu'au sein d'une économie de marché, les entreprises privées utilisent des critères de rentabilité afin d'amoindrir les risques. Dans le domaine rural, où le pourcentage de pauvreté est assez élevé, il est peu probable de trouver des projets totalement rentables. Mais c'est précisément sur ce point que le gouvernement doit établir des mécanismes pour faire en sorte que le domaine privé participe à la mise en place de structures énergétiques. Des aides financières aux composantes non-rentables des projets, comme par exemple pour les coûts de diffusion, seraient donc nécessaires. Si des mécanismes de ce type ne sont pas mis en place, il est probable que 42% de la population bolivienne reste exclue du marché énergétique.

En bref, la vie économique du milieu rural se heurte à de multiples obstacles sociaux, économiques, organisationnels et géographiques qui entravent le développement. La modernisation énergétique de la communauté rurale exige donc certaines conditions qui doivent être garanties par l'Etat.

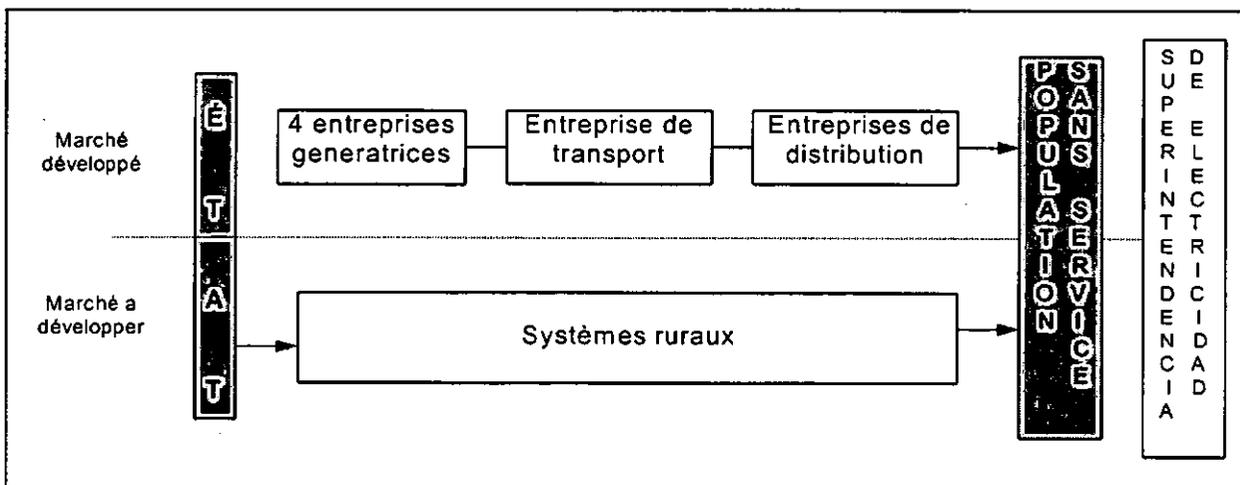


Figure 7. Situation actuelle du secteur électrique en Bolivie.

La figure 7 schématise la situation dans le domaine de l'électricité. On peut voir qu'il y a deux blocs bien différents: d'une part il y a le marché développé (urbain), déjà libéralisé, et d'autre part le marché rural traditionnel qui a besoin de transformations dont l'élan doit venir nécessairement de l'Etat.

Loi de Décentralisation Administrative et Loi de «Participation Populaire».

La loi de «Participation Populaire» a été promulguée le 20 avril 1994. Elle établit des gouvernements municipaux avec une juridiction territoriale, et reconnaît juridiquement les communautés indigènes, paysannes et urbaines. La loi transmet aux gouvernements municipaux, de plus de 5000 habitants, des responsabilités dans les domaines de la santé, de l'éducation, des routes, de l'irrigation locale et des ressources naturelles. Pour répondre à ces responsabilités, la loi distribue également 20% des revenus de l'Etat central aux gouvernements municipaux et établit des mécanismes de contrôle social. En 1995, plus de 20 dollars US par habitant ont été transmis aux municipalités. Ces gouvernements locaux identifient et accordent des priorités à leurs propres projets qu'ils peuvent maintenant mettre en marche grâce à leurs propres ressources, sans avoir à attendre - comme auparavant - l'action du gouvernement central.

La protection de l'environnement.

Lors des dernières années, la Bolivie a pris d'importantes mesures en faveur du développement durable, de la conservation des ressources naturelles et de la protection de l'environnement. La Loi de l'Environnement du 21 avril 1992 établit des normes, pour l'évaluation des répercussions d'un projet déterminé sur l'environnement. Cette évaluation est un instrument fondamental pour l'analyse de faisabilité des projets.

On estime que si tous les foyers ruraux éloignés du réseau électrique, avaient accès à l'électricité fournie par des énergies renouvelables, le potentiel d'épargne de CO2 serait de 665 000 T en vingt ans.

La stratégie pour l'énergie rurale en Bolivie.

Le gouvernement a élaboré une Stratégie Nationale pour l'Énergie Rurale qui vise à augmenter la disponibilité d'énergie, diminuer la forte pression sur l'environnement et activer les marchés d'énergie en milieu rural. Cette stratégie favorise les projets durables et cherche à fortifier les services de base ruraux en leur fournissant de l'énergie.

La stratégie comprend trois axes fondamentaux :

- Le cofinancement par des fonds privés (commerciaux ou non) associés à des ressources de l'Etat. Dans plusieurs cas, les projets d'énergie rurale n'ont pas une rentabilité financière, mais ils ont des répercussions sociales importantes. L'Etat financera la composante sociale (les études d'identification et de formulation en feront partie) et le secteur privé participera dans les composantes rentables.
- L'élargissement de la base technologique en introduisant les énergies renouvelables dans la matrice énergétique rurale.
- La gestion de la demande, par l'établissement de normes pour évaluer si les conditions sont favorables pour satisfaire la demande. Cette évaluation doit être négociée avec la population bénéficiaire et les priorités doivent être établies avec elle. Cette démarche vise à vérifier, en se basant sur les conditions concrètes, que l'énergie est un facteur réel de développement. Cette méthode contourne l'hypothèse qui avance que l'énergie amène automatiquement le développement. Les mécanismes de discussion, au niveau des microrégions et des régions, permettent la connaissance précise de la fin des usages de l'énergie et l'anticipation des effets sur le développement des communautés rurales. En

bref, la demande d'énergie doit être pensée en fonction des autres demandes et besoins tels que les routes, l'éducation, la santé, l'irrigation etc., et surtout en fonction des ressources économiquement disponibles.

↓ ***Actions et instruments concrets mis en place par le gouvernement en vue de faciliter l'accès à l'énergie pour les populations rurales.***

En vue de faciliter l'accès à l'énergie pour les populations rurales, l'Etat est en train de mettre en place les actions et instruments suivants :

- Le Règlement pour l'Electrification Rurale du 31 juillet 1997, établit les bases de l'électrification rurale en définissant clairement l'organisation institutionnelle, les responsabilités des acteurs, et la structure financière de l'électrification rurale.
- Des normes, des instructions et des indications complémentaires pour faciliter et orienter la mise en place de projets d'électrification rurale.
- Des mécanismes de financement soumis à l'Etat, mais gérés par le domaine privé, pour l'investissement dans des projets d'énergie rurale.
- Un Plan Indicatif d'Electrification Rurale, qui propose une orientation pour les investissements publics et privés.
- Le Système d'Information sur l'Electrification Rurale (SIER), qui sert de mécanisme pour l'acquisition, la systématisation et la diffusion de l'information. Cette information peut être utilisée par les différentes branches du gouvernement et par le domaine privé (entreprises, ONG, sociétés anonymes, institutions financières, etc.). Elle sert également à la coordination inter-institutionnelle et à la planification.
- Les plans régionaux et microrégionaux d'investissement pour la mise en place de projets d'énergie. Ces plans contiennent les demandes locales et les priorités établies par les préfectures et municipalités.

Néanmoins, ces actions et instruments ne seront pas concrétisés sans le développement du secteur privé, qui doit établir les organismes d'exécution et d'opération qui permettront de réaliser l'électrification rurale de façon durable et soutenable.

Les énergies renouvelables et les systèmes solaires en particulier sont des composantes fondamentales au développement des actions envisagées.

Finalement, il est nécessaire de remarquer que la planification doit être faite surtout au niveau local - du bas vers le haut - et doit prendre en considération l'utilisation productive de l'énergie et la formation de ressources humaines.

8 Etat actuel des applications des systèmes photovoltaïques

Développement de l'industrie. Production locale des composants.

Une connaissance accrue de la technologie photovoltaïque a produit pendant les dernières années une augmentation considérable du nombre d'installations électriques solaires. Les organismes internationaux de coopération ont favorisé ce développement. De plus les secteurs les plus nantis de la population rurale se sont tournés vers cette technologie et l'achètent dans le commerce spécialisé.

Auparavant, cette évolution était totalement dépendante de l'importation pour l'achat des articles nécessaires. Actuellement, une grande partie des composants des systèmes sont fabriqués dans le pays et les modules, uniquement, doivent être importés. Des batteries pour les systèmes photovoltaïques, des régulateurs de charge, des ballasts électroniques, des inverseurs et convertisseurs de voltage sont fabriqués en Bolivie.

L'industrie nationale (cinq entreprises environ) fabrique 80% des composantes des systèmes photovoltaïques. Le commerce local (trois entreprises importantes) met à disposition tous les éléments nécessaires. Le tableau 1 résume la disponibilité des composantes et leur origine.

COMPOSANTS	DISPONIBILITE	ORIGINE
Modules	✓	Importés
Batteries	✓	Importées et nationales
Régulateurs	✓	Importées et nationaux
Lampes	✓	Nationales
Convertisseurs / Inverseurs	✓	Importés et nationaux
Pompes	✓	Importées
Réfrigérateurs	✓	Importés
Accessoires	✓	Importés et nationaux

Tableau 1 : Disponibilité des composants des systèmes photovoltaïques en Bolivie

La figure 8 montre l'évolution des dernières années, de la puissance des systèmes photovoltaïques, mise sur le marché bolivien.

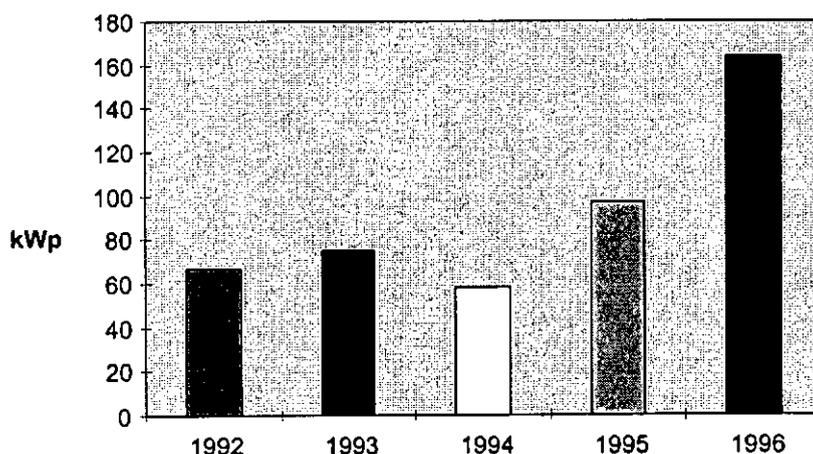


Figure 8. Evolution de la puissance photovoltaïque mise sur le marché.

On peut apprécier une considérable augmentation du nombre des systèmes installés. Ces chiffres prennent autant compte des systèmes installés par la coopération internationale, que ceux qui ont été installés dans les conditions du marché. Leur relation est de 50% environ.

Développement de normes de qualité.

Avec le but de garantir la qualité des produits et des installations, l'Institut Bolivien des Normes et Qualité (IBNORCA) coordonne l'établissement de normes pour les systèmes d'électricité à énergie solaire. Actuellement, il existe deux normes : «*Essais dans des conditions réelles pour la caractérisation des modules photovoltaïques. (modules en silicium poly- et monocristallin)*» («*Ensayos en condiciones reales para la caracterización de módulos fotovoltaicos (módulos de Silicio policristalino y monocristalino)*») et «*Essais pour mesurer la capacité et le rendement d'une batterie au plomb solaire.*» («*Ensayos para la medición de la capacidad y la eficiencia de una batería plomo-acido solar.*») La première norme a été approuvée et est en vigueur, pendant que la deuxième reste en évaluation.

Coûts moyens de référence d'un photovoltaïque domestique.

Le coût approximatif d'un système photovoltaïque domestique dans le marché bolivien est de 780 \$US (450 \$US pour le panneau de 50 Wp, 90 \$US pour la batterie, 70 \$US pour le régulateur de charge, 50 \$US pour deux ballasts, 30 \$US pour les câbles et accessoires, et 40 \$US pour l'installation).

Les résultats montrent que le module photovoltaïque représente la composante majeure en ce qui concerne les coûts du système pendant la première année, ceci en incluant l'installation du système.

Si l'on tient compte des coûts cumulatifs sur une période de 20 ans, la participation du module photovoltaïque diminue à 15-20 %. Les coûts pour le remplacement des batteries et pour la maintenance et réparation deviennent alors les facteurs les plus importants. La raison pour ce déplacement dans la distribution des coûts est la grande différence dans la qualité et fiabilité des différentes composantes.

Composante	Première année	20 ans d'opération
module	59 %	18 %
régulateur charge	9 %	6 %
2 ballasts	7 %	12 %
batterie	12 %	37 %
installation	9 %	3 %
maintenance/réparation	4 %	24 %

Tableau 2 : Participation des composantes dans les coûts d'un système photovoltaïque domestique.

9 Projets réalisés et en cours de réalisation

Le Projet Chimboata

Ce projet est une référence importante dans l'histoire de l'électrification rurale décentralisée en Bolivie. C'est un des premiers à avoir été mis en fonctionnement, à avoir utilisé un modèle de planification et à avoir pris en considération des aspects visant à rendre durables les systèmes.

Le projet s'adapte aux caractéristiques de la consommation, à la disponibilité de ressources locales et à la capacité de paiement des usagers. C'est-à-dire que le système s'équilibre en fonction des limites financières des usagers, qui obtiennent ainsi l'électricité nécessaire à l'éclairage et à la réception radiophonique. Les usagers améliorent ainsi leur qualité de vie.

Chimboata est une communauté située dans la Province Carrasco du département de Cochabamba. Cette communauté dispose de l'énergie électrique nécessaire à la satisfaction des besoins en éclairage et pour la réception de la radio; ceci grâce à un système photovoltaïque de 22Wp. Ce système est composé de deux modules en silicium amorphe de 11Wp, d'une batterie de 60Ah, d'un régulateur de charge de 2.5 A, de deux lampes de type TL de 8 W chacune et d'un adaptateur de tension pour le récepteur radio.

Les 50 systèmes installés à Chimboata fonctionnent sans problèmes importants, depuis 1994. Environ 10% des batteries ont dû être changées avant la fin de leur vie utile. Les mauvais fonctionnements au niveau des régulateurs (variations des points de fonctionnement) ont été très rares. Seulement deux modules se sont cassés à cause des effets thermiques et un autre à cause d'une décharge atmosphérique. Quatre lampes ont dû être changées parce qu'elles étaient arrivées au terme de leur vie utile. On n'a pas observé d'augmentation significative de la demande dans aucune famille.

En ce qui concerne la gestion, la Communauté a organisé un Comité de Panneau Solaires (CPS). Ce comité local prit en charge la coordination du processus d'installation et du paiement des crédits. Le personnel de la communauté qui prend soin de l'entretien des systèmes (changement de lampes, addition d'eau aux batteries, changement de fusibles, nettoyage, etc.) a reçu une formation pendant l'installation.

Les usagers ont reçu un crédit pour un délai de deux ans, avec un versement initial de un tiers du coût total du système, et des paiements annuels d'un tiers par an. On a choisi un régime annuel de paiements en tenant compte du calendrier des revenus de la région. En effet, la communauté de Chimboata cultive principalement du blé, qu'elle récolte une seule fois par an.

La répercussion de l'expérience de Chimboata a pu être évaluée par le nombre des communautés voisines qui ont présenté des demandes d'électrification. Depuis, deux communautés ont été électrifiées: Koluyo et Azul Kocha, où fonctionnent actuellement environ quarante systèmes additionnels. Au niveau de la communauté de Chimboata, il y a quelques répercussions dans l'amélioration de la qualité de vie: augmentation des heures de travail et diminution des maladies respiratoires et de la vue.

Malgré l'utilisation, à Chimboata, d'une méthode de planification qui aurait dû être appliquée aux niveaux de décisions municipales, départementales et nationales, la méthode n'a pas été mise en pratique systématiquement. En effet, à cause d'une décision de la préfecture du département, une ligne de moyenne tension, qui passerait dans le voisinage de Chimboata, est actuellement en cours d'installation. Néanmoins, les habitants de Chimboata ne semblent être

réellement intéressés par les possibilités de se brancher sur le réseau. Plusieurs personnes affirment qu'elles conserveront leurs systèmes solaires, car leurs demandes en énergie sont ainsi satisfaites.

Autres projets

Le projet Chimboata n'a pas été le seul projet mis en marche pendant ces dernières années. Mais aucun autre projet n'a été développé d'après le modèle de Chimboata. Voici un résumé de quelques autres projets et de leurs répercussions:

L'Agence Espagnole de Coopération Internationale a installé, de manière paternaliste, près de 1500 systèmes dans les hauts plateaux. Cette expérience a démontré que les dons ne servent ni à l'utilisateur ni au donateur. Malgré les probabilités de succès technologique du projet, les inconvénients d'une donation facile ne tardèrent pas à apparaître.

A l'autre bout du pays, dans le département de Santa Cruz, la Coopérative Rurale d'Électrification de San Julián et Brecha Casarave, a installé 1300 systèmes avec le soutien du National Rural Electric Cooperative Association (NRECA), tout en respectant un modèle de marché. Les usagers des systèmes, dont la Coopérative garde la propriété, payent un tarif fixe de sept dollars US par mois. La coopérative est responsable de la conservation des systèmes, du changement des batteries et de la résolution d'autres problèmes.

Dans un modèle similaire à celui de Chimboata (crédit aux usagers), la Coopérative Agricole Intégrale du Nord-est (COAINE), toujours avec le soutien du NRECA, a installé plusieurs systèmes dans la région des Yungas de La Paz. Contrairement au projet de Chimboata, l'institution qui opère le crédit est très liée aux usagers, car ceux-ci sont les propriétaires de la Coopérative. Ainsi, est facilitée la récupération du crédit.

La première expérience d'une municipalité avec les systèmes d'électrification solaire a été développée par la mairie de Tiquipaya dans le département de Cochabamba. Cette mairie, avec le soutien de l'Ambassade des Pays-Bas, a mis en place un projet pour les besoins en éclairage des salles de classe et des logements des maîtres d'école et des auxiliaires de santé. On a installé près de trente systèmes qui ont été achetés dans les conditions du marché local.

Finalement, il est important de noter la mise en place de projets du Fond d'Investissement Social (FIS) qui, dans ses projets d'infrastructure, a installé plus de 200 systèmes photovoltaïques dans des hôpitaux et des écoles répartis dans toute la Bolivie. Dans certains cas, le FIS a installé des systèmes pour pomper de l'eau. Le principal problème de ces systèmes est leur défaillance technique: ils ont été installés par les entreprises chargées de la construction des locaux. En outre, aucune instruction claire n'a été donnée par le FIS aux futurs usagers qui devraient assumer la gestion des systèmes.

10 Conclusions

Il existe un grand potentiel pour l'utilisation de la technologie photovoltaïque en Bolivie. La majeure application se centre sur les systèmes photovoltaïques domestiques pour la fourniture d'électricité fondamentale aux foyers ruraux qui ont une probabilité presque nulle d'être servis par les réseaux conventionnels.

Le potentiel estimé d'utilisation probable de systèmes photovoltaïques en Bolivie jusqu'à l'an 2000 atteint entre 12 MWp et 22 MWp. La demande immédiate est estimée entre 800 kWp et

1.2 MWp. Ces valeurs correspondent à des perspectives d'accomplissement ou non des buts d'électrification de l'Etat.

Le principal désavantage des systèmes photovoltaïques est le coût initial élevé, et le fait qu'une grande majorité des usagers potentiels ne peuvent pas affronter cette inversion, bien que celle-ci représenterait un épargne sur une période moyenne et aussi une amélioration de la qualité du service.

L'existence et l'application adéquate de lignes de financement, ainsi que l'intervention du secteur privé sont nécessaires pour l'établissement d'un marché, encore inexistant, dans les régions d'application des systèmes photovoltaïques. Dans ce contexte, le rôle qui sera joué par l'Etat au moyen de ses politiques d'impulsion et soutien au développement rural, en particulier dans le domaine énergétique, est déterminant.

Références :

1. Orellana R, M.E. Morales Udaeta, Los sistemas fotovoltaicos en la electrificación de comunidades rurales de bolivia, 4 años después de Chimboata, XV Conferencia Latinoamericana de Electrificación Rural, Santiago - Chile, 1997.
2. Fernández M, Rubén García, Uso de pilas comunes vs. Pilas recargables en el área rural. Una comparación técnico económica. Revista E&D número 3, Enero de 1993.
3. Biermann, F. Corvinus, T. Herberg, Electrificación básica de hogares rurales, Seccion 415 Energía y Transporte, GTZ, 1997.
4. Birhuett E., Estrategia de Energía Rural; bases para un desarrollo sostenido, Revista E&D número 6, Sept. de 1994.

CONTRIBUTION SPONTANÉE

Eaux usées et déchets organiques: matières premières pour la production de biogaz

Yves Membrez, ing. dipl. ETS/UTS, EUR-ING
"ENERGIE 2000 - Energie de la méthanisation"
c/o EREP SA
Chemin du Coteau 28, 1123 Aclens

La méthanisation, qu'est-ce que c'est?

Sous le terme de méthanisation, on entend la décomposition de matériel organique par des microorganismes en l'absence d'oxygène, c'est-à-dire dans des conditions anaérobies. Ce processus met en jeu plusieurs espèces bactériennes qui, ensemble, transforment les déchets organiques en biogaz.

Le biogaz se compose d'environ deux tiers de méthane, de près d'un tiers de gaz carbonique ainsi que de traces d'autres gaz. Les bactéries anaérobies sont des organismes remontant à des temps géologiques très anciens, qui se sont développées à une époque où l'atmosphère terrestre ne contenait pas encore d'oxygène. A l'exception de la lignine, qui donne au bois sa consistance, ces bactéries peuvent dégrader pratiquement tout type de matériel biogène. Etant donné que la majeure partie de l'énergie du matériel décomposé est contenue dans le méthane, les bactéries ne disposent que de très peu d'énergie pour se développer et se reproduire. De ce fait, la méthanisation – contrairement au compostage – ne génère pas d'énergie excédentaire sous forme de chaleur.

Contrairement au compostage où des champignons primitifs et d'autres organismes inférieurs participent à la décomposition des déchets organiques, la méthanisation, ou digestion anaérobie, est un processus exclusivement bactérien. Les bactéries anaérobies sont à l'aise dans l'eau ou dans un milieu très humide. C'est pourquoi les procédés de décomposition anaérobies conviennent particulièrement bien aux substrats détrempés ou humides, facilement dégradables. En ce sens, la méthanisation revêt une grande importance pour la valorisation de déchets organiques triés à la source.

Outre les déchets biogènes solides, les effluents chargés en polluants organiques provenant de l'industrie et de l'artisanat se prêtent particulièrement bien à une décomposition par méthanisation. Le traitement anaérobie se caractérise, dans la plupart des cas, non seulement par un bilan énergétique clairement positif, mais présente aussi l'avantage de générer moins de biomasse bactérienne et donc moins de boue. Jusqu'à une date récente, des processus aérobies ont, en général, été mis en œuvre pour l'épuration des eaux usées, complétés par un traitement anaérobie de la boue produite. Grâce au développement récent de processus anaérobies très performants, il est aujourd'hui possible et judicieux de faire précéder le traitement aérobie d'un processus de pré-épuration anaérobie.

Dans l'agriculture, la méthanisation génère non seulement de l'énergie, mais permet également de conditionner des engrais de ferme. La méthanisation est économiquement intéressante avant tout dans le cas de grandes installations capables de traiter non seulement des lisiers mais également d'autres déchets (légumes, déchets d'abattoir, etc.).

Biogaz à partir de déchets ménagers, d'effluents industriels et de résidus agricoles

Introduction

La décomposition anaérobie de matières organiques est un processus qui se prête particulièrement bien à la préparation et à la stabilisation de déchets organiques liquides ou solides. Se déroulant dans une enceinte fermée (appelée digesteur, fermenteur ou bioréacteur) et dans des conditions contrôlées, la méthanisation présente les avantages suivants par rapport au traitement aérobie:

- le carbone se décompose à 90% sous forme de biogaz;
- le biogaz génère une énergie de haute valeur sous forme de courant électrique et de chaleur;
- la production de boue est réduite;
- les émissions malodorantes sont minimales et faciles à capter.

Dans le cadre du programme Energie 2000, qui vise à encourager les sources énergétiques renouvelables, la production de biogaz est particulièrement importante. Le biogaz produit par la digestion anaérobie est convertible en courant électrique et en chaleur dans un couplage chaleur-force.

L'instrument politique: Energie 2000

Il y a sept ans, le peuple et les cantons ont accepté l'article constitutionnel sur l'énergie ainsi que l'initiative populaire exigeant un moratoire de dix ans pour la planification et la construction de nouvelles centrales nucléaires. Sur cette base, le Conseil fédéral a, en février 1991, lancé le programme E2000. Pour la première fois, des objectifs quantitatifs ont été fixés pour la production énergétique. Ces objectifs devront être atteints jusqu'en l'an 2000:

- stabilisation au niveau de 1990 de la consommation totale des énergies fossiles et des émissions de CO₂ en l'an 2000; réduction à partir de cette date;
- réduction de la croissance de la demande d'électricité durant les années quatre-vingt-dix et stabilisation de la demande à partir de l'an 2000;
- part plus importante des énergies renouvelables; les sources renouvelables devant apporter 0,5% de plus de production d'électricité et 3% de plus de production de chaleur en l'an 2000;
- augmentation de 5% de l'énergie hydraulique et extension de 10% des capacités des centrales nucléaires existantes.

Les parts de 0,5% d'électricité et de 3% de chaleur devant être apportées par des sources renouvelables correspondent respectivement à 300 GWh et à 3000 GWh.

Pour atteindre ces objectifs, des mesures pour la plupart non contraignantes doivent être prises par l'économie, les particuliers, les cantons et les communes. La Confédération soutient ces mesures par des activités de promotion, d'information et de développement (installations pilotes et de démonstration). A cet effet, un montant de 55 millions de francs est mis à disposition chaque année (initialement, il était prévu que ce montant puisse atteindre jusqu'à 180 millions par an).

Le programme d'accélération: énergie de la méthanisation

Le biogaz produit à partir de déchets organiques devra apporter 1/3 de l'électricité (50 GWh) et 1/30 (100 GWh) de la chaleur exigées pour les sources renouvelables dans le cadre d'Energie 2000. Une part de 60% de cette énergie proviendra d'une meilleure valorisation du gaz des stations d'épuration et des décharges. La production de 40 GWh de chaleur et de 20 GWh d'électricité devra être assurée par les nouvelles installations suivantes: digesteurs dans des exploitations agricoles (installations collectives, codigestion), installations permettant le prétraitement d'effluents industriels chargés en polluants organiques, fermenteurs destinés à méthaniser des déchets ménagers triés à la source. Pour atteindre ces trois derniers objectifs, une action dite d'accélération a été lancée dans le cadre d'Energie 2000: l'action «énergie de la méthanisation». Elle comporte aussi bien des activités de conseil technique que de relations publiques et de marketing social. Des spécialistes internes et externes au programme sont à disposition pour élaborer des analyses et des concepts de financement. Dans le but d'améliorer la situation du marché, des groupes d'intérêt sont constitués et des séminaires sont organisés.

Le soutien fourni dans le cadre de l'action d'accélération devra aboutir à la construction d'une trentaine de grandes installations de méthanisation permettant de produire chaque année les 40 GWh de chaleur et les 20 GWh d'électricité exigés.

Installations de méthanisation dans l'agriculture

Le nombre des installations dans l'agriculture a légèrement baissé au cours de ces dernières années, les installations mises hors service (lors de la passation de l'exploitation à la génération suivante) étant plus nombreuses que les nouvelles installations. En 1994 et en 1995, trois, respectivement deux nouvelles installations ont été construites, dont une installation collective pour la codigestion de déchets de légumes et de lisiers.

En 1995, **85 installations de méthanisation** continuaient à être exploitées dans l'agriculture, dont 35 avec un couplage chaleur-force.

Quatre installations pratiquent la digestion de fumier solide, toutes les autres sont alimentées en lisiers dont la teneur en matières sèches oscille entre 2 et 12%.

A quatre exceptions près, les installations alimentées en lisiers sont des digesteurs infiniment mélangés. Les installations les plus répandues sont dotées de cuves en béton enterrées ou hors-sol ainsi que de silos en matière synthétique renforcée de fibres de verre.

Les quatre autres installations sont des systèmes dits à accumulation. La fosse à purin étanche au gaz, isolée et chauffée, sert en même temps de cuve de fermentation.

Deux réacteurs sont des installations dites collectives qui appartiennent à deux ou trois agriculteurs. Dans un processus appelé codigestion, ces installations traitent non seulement des lisiers de bovins mais également des déchets de légumes.

Installations de méthanisation dans l'industrie

Dans le cas des **installations industrielles**, la digestion anaérobie sert exclusivement au prétraitement des eaux usées et vise une réduction des taxes d'épuration. Le biogaz récupéré est un produit supplémentaire bienvenu. Dans deux entreprises, il sert à la production d'électricité dans un couplage chaleur-force; dans toutes les autres entreprises, le biogaz est utilisé pour générer de la vapeur. Fin 1996, **on dénombrait 16 installations au total**. Toutes ces installations étaient exploitées par des industries du secteur alimentaire et du papier: 1

brasserie, 3 entreprises de l'industrie de la pomme de terre, 4 distilleries, 2 sucreries, 1 usine produisant de la farine animale, 2 papeteries/cartonneries, 1 fabricant de produits surgelés, 1 industrie laitière, 1 industrie des levures.

Tous ces systèmes sont des digesteurs dits à haut rendement, mettant en œuvre l'un des procédés suivants:

- lit de boue anaérobie à flux ascendant (UASB);
- contact anaérobie.

Dans 7 installations, la digestion anaérobie est suivie d'un traitement aérobie permettant de poursuivre la dégradation de la matière organique ainsi que l'élimination de l'hydrogène sulfuré. Dans l'usine fabriquant de la farine animale, la digestion anaérobie est suivie d'un processus de nitrification/dénitrification.

Traitement par digestion anaérobie de déchets ménagers triés à la source

Depuis 1993, on exploite en Suisse des installations permettant le **traitement par digestion anaérobie de déchets ménagers triés à la source**. Actuellement, ces installations sont au nombre de six. Leur capacité de traitement est de 1500 à 10000 tonnes par an (t/a). Le biogaz produit par ces six installations est valorisé dans des couplages chaleur-force. Dans deux de ces installations, le gaz est – avant tout en été – épuré, comprimé et valorisé comme carburant dans des voitures particulières et des camions. L'une des installations est un système pilote d'une capacité de 1500 t/a.

Suite au processus de digestion, la teneur en matières sèches est fortement réduite. Pour cette raison, l'eau est extraite mécaniquement par pressage. La matière solide fait ensuite l'objet d'un post-compostage pendant 2 à 3 semaines. La phase liquide est soit remise en agriculture comme fertilisant, soit utilisée comme moyen d'humidification pour le compostage, soit traitée pour permettre son rejet comme eau usée.

Valorisation du biogaz

La part de méthane du biogaz généré par digestion anaérobie est de 55 à 65%. Ce gaz se prête donc très bien à l'exploitation d'un couplage chaleur-force (CCF) ou peut être valorisé comme carburant dans un moteur Otto ou un moteur à deux combustibles (dual fuel).

Contrairement au compostage, la digestion anaérobie se caractérise par un bilan énergétique positif. Une tonne de déchets organiques fournit 100 m³ à 160 m³ de biogaz, soit environ 65 à 95 litres d'essence. Dans un couplage chaleur-force, on obtient 170 kWh d'électricité et 340 kWh de chaleur sous la forme d'eau chauffée à une température d'environ 70°C. Dans chaque installation, une part de 10 à 20% de l'énergie produite est autoconsommée par le processus de digestion. Le courant électrique est, pour l'essentiel, introduit dans le réseau. Selon une recommandation de l'Union des centrales suisses d'électricité, un prix moyen de 16 centimes est versé pour chaque kWh de courant électrique provenant d'une source renouvelable. Dans un réseau de chauffage, la chaleur peut aussi être utilisée pour chauffer des bâtiments à proximité.

Il n'est pas toujours possible de valoriser le biogaz dans un couplage chaleur-force. Notamment en été, la valorisation de la chaleur pose souvent des problèmes. Dans cette situation, il est donc judicieux d'utiliser le biogaz comprimé comme carburant. Les véhicules propulsés avec du biogaz se caractérisent par d'excellentes valeurs des gaz d'échappement. Selon le test de conduite EEC, ces valeurs sont réduites de moitié par rapport à des véhicules brûlant de l'essence. Pour la préparation, la compression et le stockage du gaz, une entreprise offre des systèmes prêts au montage, destinés aux voitures particulières et aux camions que l'on souhaite équiper d'un moteur à gaz (respectivement d'un moteur dual fuel).

Potentiel biogaz des déchets organiques en Suisse

Le gisement le plus important est constitué par les **déchets agricoles** (purins, fumiers, déchets de récoltes). En méthanisant la totalité de ces matières organiques, l'énergie récupérée serait de 10 PJ. On notera par comparaison que la consommation énergétique directe de l'agriculture suisse est de 9 PJ/an. Au début des années nonante, les scénarios élaborés par le groupe d'experts de la Confédération évaluaient à 2,6 PJ/an la contribution énergétique du biogaz agricole à l'horizon de l'an 2000. Pour atteindre cet objectif, 20000 installations auraient dû être construites dans des exploitations de plus de 20 unités gros bétail (1 UGB = 1 équivalent vache laitière). En 1995, une étude réalisée dans le cadre d'ENERGIE 2000 («*Biogasgewinnung auf Landwirtschaftsbetrieben und in der Intensivtierhaltung*») a mis en évidence que pour parvenir à la rentabilité économique, les installations agricoles de biogaz devraient être réalisées dans des exploitations de plus de 60 UGB (il y en a plus de 1400 dans notre pays) pratiquant la codigestion (méthanisation de déchets verts communaux ou de grandes surfaces en mélange avec des purins ou des fumiers). L'enquête réalisée auprès de ces exploitations a montré que près de 500 d'entre elles seraient intéressées par une installation de biogaz. Grosso modo, chacune de ces unités peut produire 130 MWh d'électricité et 260 MWh de chaleur par an, si le biogaz produit est valorisé par des couplages chaleur-force.

S'agissant des **déchets organiques ménagers** triés à la source et de ceux provenant de l'industrie, des grandes surfaces et de la restauration collective, une étude réalisée en 1994 sur mandat de l'OFEN et de l'OFEP («*Perspektiven zur Energienutzung biogener Abfälle in der Schweiz*») prévoit que jusqu'en l'an 2000 les dix plus grandes villes du pays (Bâle, Berne, Genève, Lausanne, Lugano, Lucerne, St-Gall, Winterthour, Zurich, Zoug), qui regroupent près de 38% de la population, auront mis en place une «*tournée verte*» (ramassage séparé des déchets organiques). Dans ces agglomérations, 80000 t/a de déchets organiques pourraient être traités par méthanisation, auxquelles s'ajouteraient 70000 t/a de déchets industriels, commerciaux et de restaurants. Une grossière approximation permet d'évaluer la production correspondante de biogaz de ces 150000 t/a à environ 15 Mio · m³ biogaz/an, ce qui en données brutes équivaut à 3,2 PJ/an.

Enfin, les **effluents liquides industriels** à forte charge organique (agro-alimentaire, industrie papetière et chimique), pour lesquels l'industrie se préoccupera de les pré-épurer sur leurs sites afin de réduire les taxes d'épuration, n'ont pas fait l'objet d'un inventaire précis. Une estimation réalisée à partir d'une étude effectuée en 1991 sur mandat de l'OFEN («*Vergärung biogener Abfälle aus Haushalt, Industrie und Landschaftspflege*») avance un potentiel biogaz théorique compris entre 2,5 et 3 PJ/an.

On voit donc en résumé que, même si ces estimations de potentiel doivent être appréciées

avec prudence, elles confirment l'importance du biogaz parmi les énergies renouvelables. Celle-ci se traduit dans les objectifs du programme ENERGIE 2000 qui prévoit un supplément de production de chaleur de 3000 GWh/a et de 300 GWh/a d'électricité à partir d'énergies renouvelables. La contribution attendue du biogaz (y compris gaz d'épuration et de décharge) est de 5% sous forme thermique (8% pour le solaire) et de 37% sous forme électrique (8% pour les systèmes photovoltaïques).

Sources:

«Energie de la méthanisation – classeur d'information». A WELLINGER et al., 1997. Linder Kommunikation AG, 8030 Zürich.

«Biogas Handbuch». A. WELLINGER et al., 1991. Verlag Wirz Aarau.

«Perspektiven zur Energienutzung biogener Abfälle in der Schweiz». INFRAS, 8002 Zürich. BEW/BUWAL, 2.8.1994.

«Vergärung biogener Abfälle aus Haushalt, Industrie und Landschaftspflege». ARBI, 8933 Maschwanden. BEW, Januar 1991.

POINT DE VUE

Une vision futuriste de l’approvisionnement en énergie au XXI^e siècle

Kim Gyr

Bd. St. Martin 7, CH-1800 Vevey

email: gyr.sucher.cater@span.ch

Vous n’avez pas le temps de lire ceci! Selon la revue Scientific American qui a écrite dans un numéro dédié à l’énergie en septembre 1990 “Si la consommation du pétrole et du gaz continuent à doubler chaque 15 à 20 ans, comme s’était le cas pendant le siècle en cours, le stock initial sera épuisé dans 30 à 40 ans”. Et, Il faut dire que, selon des professeurs à l’EPFL avec qui j’ai parlé, même sans brûler tous ces carburants à base de carbone notre chère atmosphère deviendra plus chaude et plus polluée. En plus, si on aimerait mettre un peu de pétrole à disposition du tiers monde, ou en garder pour la production des plastiques ça peut bien raccourcir ces délais. Et les puits de pétrole sont déjà entrain de se vider. Des guerres ont été disputées et seront à nouveau disputées pour les contrôler. A supposer que le procédé puisse être mis au point, l’énergie à partir de réacteurs à fusion nucléaire peut encore attendre 50 ans. Et, nous avons juste assez de pétrole et de charbon pour construire ce qui doit remplacer notre bon vieux carburant à base de carbone.

Que pouvons-nous faire pour remplacer tous ces carburants ?

En Europe et en Amérique du Nord, nos villes vieillissent rapidement. A une époque où l’économie est sur une pente glissante, il y a plus de criminalité et de corruption dans les villes décadentes qui furent autrefois de grandes civilisations. Les infrastructures qui huilent les rouages de notre va-et-vient se transforment en bus laids et grinçants et circulant sur des routes couvertes de nids de poules.

Des continents entiers vivent au rythme des sabres et des os. Est-il possible de résoudre en une fois les problèmes d’énergie, de conflits, de transports, de communication, de vie sociale, de crime, d’éducation et de renouveau ?

Ce qui suit est une modeste proposition. Elle m’est venue à l’esprit alors que j’étais en convalescence à la suite d’un arrêt cardiaque survenu lors d’un accident de voiture au Kenya en 1980. La plupart de mes idées me vinrent alors que, quotidiennement, je titubais, marchais et courais de mon lieu de travail à chez moi, ce qui représentait un total de 530km (ce fut alors mon premier job en Angleterre). Lorsque l’accident est survenu, j’étais entrain de déménager de Suisse en Angleterre. Ainsi, à l’âge de 28 ans, je redevais un enfant qui devait réapprendre à vivre et à marcher. J’espère simplement stimuler d’autres personnes pour aspirer à d’autres solutions qui permettraient de résoudre les problèmes mentionnés ci-dessus.

Je suggère que nous commençons par construire des villes linéaires/barrages à vent qui seraient perpendiculaires à la direction des vents dominants (du Nord au Sud). En Amérique du Nord et en Europe, le vent vient généralement de l’ouest. Si l’on commençait tout d’abord à créer de petites sections pour tester leur possibilité de convertir le vent en énergie, elles pourraient ensuite être reliées afin de construire également un réseau qui se dirige de l’est à l’ouest. Théoriquement et tant qu’il y aura des hommes sur terre, nous bâtirons sur la terre. A l’époque, nous avons déjà construit des barrages hydroélectriques pour augmenter la

production des moulins à eau, alors pourquoi ne pas utiliser cette forme de construction pour augmenter la récolte d'énergie à partir de turbines à vent existantes ?

Un mur de 10m² qui canalise son réservoir à pression vers une turbine à vent de 1m² devrait produire environ la même puissance qu'un moulin à vent dont la surface est de 10m² et cela avec des coûts d'entretien réduits grâce à sa plus petite taille.

Comme nous construisons de toute manière des murs, pourquoi ne pas les relier à des turbines à vent. Simultanément, nous devrions nous demander s'il existe d'autres utilisations pour une ville conçue de manière linéaire. La plupart d'entre nous qui avons visité de grandes villes sommes toujours contents de les quitter et de rentrer à la maison, où règnent la paix, le calme, l'air pur et la beauté du paysage. Pourquoi d'ailleurs existe-t-il des grandes villes ? Car, tout simplement, les grandes villes sont les seules places où l'on peut concentrer assez de personnes pour offrir un niveau culturel et artistique de qualité et permettre des échanges commerciaux rentables. Les frais de déplacement et les trajets du lieu de domicile au travail notamment sont diminués.

Mais la raison principale de l'existence de grandes villes est historique. Toutes les grandes villes étaient autrefois des villages qui ne cessèrent de s'agrandir.

Et voilà qu'en nous réveillant au matin du 1er juin 2050, nous tirons les rideaux sur la "A3 Cervin". Nous voyons des corbeaux qui dévalisent le maïs, notre maïs, qui pousse dans les champs, trois étages plus bas. Mon terrain, entouré de chaque côté par celui de mes voisins est équipé d'un "attrape-corbeau" muni d'ultrason. Il suffit de presser sur le bouton qui se trouve sur le rebord de la fenêtre pour le faire fonctionner. Je prends ensuite mon petit-déjeuner avec mes enfants, Thomas et Rébecca qui ont préparé des crêpes aux myrtilles. Ensuite ils iront chercher le corbeau, pris dans "l'attrape-corbeau" pour le repas du soir.

J'ai un rendez-vous à Bâle dans une heure, je rassemble mes affaires et prends l'ascenseur deux étages plus haut jusqu'à la station du Swiss Métro capable de rouler à 400 km/h. Son habitacle est transparent et me permet de voir les champs de mes voisins cinq étages au-dessous.

Notre ville linéaire appelée "le Cervin" suit des chemins sinueux, parfois le long des vallées formées de rivières et parsemées de lacs, parfois le long des crêtes, à la recherche d'endroits où la vitesse du vent est optimale. Swiss Metro lui-même se déplace sur un champ électromagnétique afin qu'il puisse être actionné par les différences de pression qu'il y a de chaque côté du "Cervin". Quand il n'y a pas de vent, il utilise les moteurs électriques linéaires pour se propulser.

Je vois des fermes qui passent rapidement et songe que l'un des avantages du concept d'une ville linéaire est qu'il offre à chacun la possibilité de se rendre facilement à la campagne. Il y a moins de crimes car chacun se sent plus libre et moins stressé que dans une grande ville. Il y a aussi moins de crimes car le tournant du siècle a vu le grand retour des valeurs familiales. Au début du siècle, il y avait, dans l'évolution des idées, une idée de "réincarnation génétique", c'est à dire que nous sommes tous la réincarnation de nos parents et que nos enfants sont notre propre réincarnation. Tant que nous élèverons bien nos enfants et que nous aiderons d'autres à le faire, nous aurons une place dans

l'éternité. Les moyens qui existaient pour limiter l'augmentation de la population fut mieux adopté par les couples, lorsqu'ils réalisèrent l'avantage de pouvoir offrir une meilleure éducation à leur enfant s'ils sont moins nombreux.

Le Swiss Metro ralentit et déjà je rassemble mes pensées et mes affaires avant de d'arriver à Bâle. J'appelle mes parents qui sont mes contacts à l'aide de ma montre/téléphone lorsque je réalise qu'ils sont déjà entrain de m'attendre dans le jardin à l'étage inférieur. Je prends le chemin sinueux à travers le jardin intérieur luxuriant et les retrouve assis sous un palmier à côté d'une chute d'eau. Les panneaux "Graetzel" (semi-transparents) qui servent de toit à la ville, empêche au soleil brûlant de l'été de briller et conserve l'énergie récoltée dans les volants d'inertie et dans les réservoirs d'hydrogène et d'oxygène provenant de l'électrolyse de l'eau.

Alors qu'ils boivent du thé aux herbes, moi je préfère une bonne bière fraîche. Ensemble nous buvons au futur - à l'énergie "autogénérée", en harmonie sociale (tous les hommes ne sont pas créés égaux, mais arrivent vivre ensemble), à la paix permanente dans le monde (les barrières religieuse sont tombées car chacun réalise qu'il a sa place dans l'éternité en élevant correctement ses enfants, en réalisant des travaux qui dureront, en développant et entretenant de bons rapport avec ses amis).

Santé !

Pourquoi ai-je décidé de présenter toutes ces idées dans un lieu public ? J'ai 44 ans et malgré mes efforts dans le monde académique, rien à ce jour n'a été concrétisé.

J'espère être arrivé à stimuler certaines personnes à penser aux possibilités de développer des énergies renouvelables, à partir de nos innombrables ressources qui existent sur notre terre, mais surtout tant que nous aurons assez de carburant pour construire ce qui remplacera notre carburant! J'ai développé le concept d'une ville linéaire il y a 15 ans suite à mon arrêt cardiaque; mon esprit était alors jeune, et directe comme un enfant. Je suis toujours convaincu que mon idée a de la valeur et j'aimerais y consacrer du temps pour prouver son utilité pour notre futur. Je suis entrain de

travailler de manière intensive sur un roman de sciences fictions qui explore toutes les idées mentionnées ci-dessus et bien plus. Y a-t-il quelqu'un qui aimerait faire part de ce projet? Je suis très intéressé à rencontrer des personnes/partenaires pour toujours plus approfondir ces idées. Veuillez me contacter.

PROGRAMME DE LA JOURNEE
30 Octobre 1997
Musée d'histoire naturelle CH-1208 Genève

9h30 **Bienvenue**, W. Weber, Institut d'Architecture Université de Genève et Cuepe

9h40 **Spécificité et potentialité des énergies renouvelables**

B. Lachal, Cuepe : spécificité des énergies renouvelables

B. Chabot, ADEME, France : potentialité des énergies renouvelables pour un développement durable

10h45 **Pause**

11h15 **L'évolution de l'utilisation des énergies renouvelables : l'exemple de l'agriculture et de l'habitat**

A. Reist, Station fédérale agronomique de Changins : l'agriculture

W. Weber, Cuepe : l'habitat

12h20 **Repas**

14h **La situation aujourd'hui et demain à partir des points de vue des acteurs du photovoltaïque**

A. Mermoud, Cuepe : les applications, aujourd'hui et demain

A. Ricaud, Cythelia, France : l'avenir de l'industrie photovoltaïque

S. Nowak, OFEN, St. Ursen : la politique de recherche et de développement en Suisse

J. Gil, P.A., Bolivie : la situation dans un pays du Sud

16h **Pause**

16h15 **Table ronde / débat : quelle place pour les énergies renouvelables au siècle prochain ?**

avec les orateurs de la journée et le public

LISTE DES PARTICIPANTS

Georges-Pierre ACKERMANN, Conseil de l'environnement, Ch. de la Montagne 114, 1224 Chêne-Bougeries
Bernard AEBISCHER, ETH - Energieanalysen, ETH - Zentrum, 8092 Zürich
Jacques AUDERGON, GEIMESA, Av. du Midi 13, 1700 Fribourg

Karine BACHMANN, Etudiante SES, Bd. Carl Vogt 102, 1211 Genève 4
Pierre BACHMANN, CUEPE, ch. Riondet 4, 1291 Commugny
Olivier BARDE, Bureau d'Ingénieurs, Case postale 1212, 1227 Carouge
Pierre BENOIT, SIG-Groupe Energies, Ch. Château-Bloch 2, 1221 Genève 2
Janine BERBERAT, Prés. Comm. Energie GC, Route de Troinex 48, 1256 Troinex
Bernard BEROUD, Ecole d'ingénieurs, Rue de la Prairie 4, 1202 Genève
Jean-Luc BERTHOLET, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Jean-Pierre BIESER, 1117 Grancy
Masha BOICHAT, CUEPE, Av. Bel-Air 16, 1225 Chêne-Bourg
Laurence BOISSIER, Office cantonal de l'énergie, Case postale 22, 1211 Genève 8
Jean-Pierre BOYMOND, Rue Louis Martel 24, F-74160 St. Julien en Genevois
Gisela BRANCO, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Reto CAMPONOVO, Amstein & Walthert, Rue Cendrier 24, 1201 Genève
Damien CATALDI, Etudiant SES, Bd. Carl Vogt 102, 1211 Genève 4
Bernard CHABOT, ADEME, route des Luciolles 500, F- 06560 Valbonne
Françoise CHAPPAZ, WWF - Genève, Villereuse 10, 1207 Genève
Jacques CHEVRIER, C.P. 3117, 1211 Genève 3
Bruce COHEN, CEE/ONU, Rue Butini 16, 1202 Genève
José COLLADOS, Commune de Meyrin, Rue des Boudines 2, 1217 Meyrin
Jean-Marc COTTIER, PROMES, rue Crespin 20, 1206 Genève

Adriana DAN, EPFL-LASEN, 1015 Lausanne
Luc DANLOY, Rue de la Prulay 54, 1217 Meyrin
Jacques DARIOLI S.A., EOS, CP 570, 1003 Lausanne
Louis DE CARO, Clinique de Genolier, 1272 Genolier
Roger DIAMOND, CERA, ch. Colladon 18, 1209 Genève
Jean-François DUPONT, EOS, Case postale 570, 1001 Lausanne

Roger EGLOFF, COPER, Rue Ancien Stand 38, 1820 Montreux

Jacques-Eric FELIX, SIG, CP 2777, 1211 Genève 2
Lionel FERRARI, Route d'Italie 60, 1800 Vevey
Christian FREUDIGER, Office cantonal de l'énergie, Case postale 22, 1211 Genève 8
Antoine FROMENTIN, EPFL-LASEN, 1015 Lausanne

François GAILLE, OFEL-El. Romande, CP 534, 1001 Lausanne
Peter GALLINELLI, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Myriam GARBELY, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Jean-Bernard GAY, LESO EPFL, 1015 Lausanne

Stéphane GENOUD, Exergy Consulting SA, Rue du Pont 11, 1204 Genève.
Javier GIL, P.A. Partner, Torres Sofer, Oficina 502, Cochabamba, Bolivia.
Catherine GRAF, Rue des peupliers 18, 1205 Genève
Jacques GUEZ, I.A.S., Rue de Champ Colomb 64, F - 01210 Ornex
Yaniss GUIGOZ, Etudiant SES, Bd. Carl Vogt 102, 1211 Genève 4
Kim GYR, Bd. St. Martin 7, 1800 Vevey

Pierre-André HALDI, EPFL, DGC-LASEN, 1015 Lausanne
Robert HAMWEY, AIE, Ch. de Conches 4, 1231 Conches-Genève.
Ernst HEER, ch. Tirelonge 16, 1213 Onex
Pierre-Henri HEIZMANN, Service de l'énergie, Chemin du Château-Bloc 19, 1219 Le Lignon
Catherine HEROLD, Rte du Gd. Lancy 109 C, 1212 Gd. Lancy
Pierre HOLLMULLER, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Stefan HUNZIKER, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Pierre-André IFF, Av. Adrien-Jeandin, 1226 Thônex
Pierre INEICHEN, GAP-Energie et CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Ghislaine JACQUIER, Rue Centrale 30, 1247 ANIERES
Michael JAKOB, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Claude-Alain JAQUET, Electricité Neuchâteloise SA, Les Vernets, 2035 Corcelles
Cédric JEANNERET, Arpège, Communication Cardinal Mermillod 36, 1227 Carouge
Maya JEGEN, Dép. science politique, Bl. Carl Vogt 102, 1211 Genève 4

Jean-Georges KAISER, Ingénieur, Ch. des Semailles 13A, 1212 Grand-Lancy
Georges KREBS, Vidollets 55A, 1214 Vernier

Bernard LACHAL, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Jean-Jacques LOEFFEL, Institut de physique théorique, BSP, Dorigny, 1015 Lausanne

Luis MARCOS, Etudiant EPFL, Vignettes 8, 1305 Penthaçaz
Massimo MARTIGNONI, Dip. finanze e economia, Viale S. Franscini, 6501 Bellinzona
Yves MEMBREZ, EREP SA, Ch. du Coteau 28, 1123 Aclens
Alain MERMOUD, Journaliste, C.P.153, 1225 Chêne-Bourg
André MERMOUD, GAP-Energie et CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Benoit MOLINEAUX, GAP-Energie, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
J.-J. MURALTI, Bureau technique, CP 1, 1218 Gd. Saconnex

Marco NONNI, c/o Bader, Rue des Bossons 2, 1213 Onex
Stefan NOWAK, NET AG Waldweg 8, 1717 St. Ursen

Eric PAMPALONI, GAP-Energie, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève
Michel PARRAT, Atelier d'architecture, Rue de Genève 150, 1226 Thônex
Jean PUTALLAZ, J. Putallaz ing.-conseil, Rue de Vermont 9A, 1202 Genève

Antoine REIST, RAC, Les Fougères, 1964 Conthey

Yves RENAUD, CERN, 1211 Genève 23

Alain RICAUD, Le Rivet, Allée du Levant 5, F - 38300 Bouroin-Jallieu

Gil RICHARD, SERISA TELEBAT SA, Ch. des Mûriers, 1 1170 Aubonne

Franco ROMERIO, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Jacques ROYER, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Heinz SCHIESSER, Les Renouvelables, La Mothe, 1431 Vugelles

Gérard SCHMID, Eau Secours, CP 57, 1216 Cointrin

Alain SEEMUELLER, Av. Massenet 25, 1228 Plan-les-Ouates

Oscar SINDAYIGAYA, Uni. du Burundi, BP 2700, Bujumbura, Burundi

Costantin SOUTTER, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Patrick TAFFE, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Christain TRACHSEL, Rue Charles-Perrier 7, 2074 Marin

Jean-Marc TSCHOPP, DTPE/OCEN, David Dufour 5, 1211 Genève 8

Alberto VELASCO, Quai Ch. Page 41, 1205 Genève

Gerrit VOSS, Maire de Plan-les-Ouates, Ch. de la Vendée 29, 1213 Genève

Willi WEBER, CUEPE, Av. de la Jonction 19, 1205 Genève

Philippe WIBLE, Ingénieur-Conseil, Rue du Temple 8, 1236 Cartigny