

L'électricité photovoltaïque

JEAN-MARC COTTIER

Les coûts d'installation nécessaires à la production d'énergie électrique photovoltaïque sont encore relativement élevés, ce qui entraîne un coût de production du kWh sensiblement supérieur au prix moyen de l'électricité en Europe.

Cette situation s'explique parfaitement si l'on compare la capacité de production du photovoltaïque en Suisse (de l'ordre de 8 MW) à celle des autres sources d'énergie (de l'ordre de 12 000 MW). On est en droit d'affirmer que le coût de production actuel de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque (environ 1 franc par kWh) est normal à ce faible niveau de production, et que tous les autres systèmes ont commencé par produire de l'électricité à des coûts comparables.

Dès lors, on peut envisager deux approches pour favoriser le développement de l'électricité photovoltaïque

Considérer les coûts de production des premières années d'exploitation comme normaux et les intégrer dans la gamme des coûts de production des autres énergies utilisées, comme cela avait été le cas de l'hydraulique, du thermique, du nucléaire à leurs débuts. Il en résulterait une augmentation négligeable du coût moyen du kWh, du fait des petites quantités photovoltaïques injectées au début, mais l'effet sur le marché permettrait le développement d'une production de courant électrique d'origine renouvelable, aussi sûre et aussi favorable à l'environnement que l'électricité hydraulique.

Laisser le photovoltaïque se développer en dehors des grands systèmes de distribution de l'électricité et laisser les lois du marché lui ouvrir, petit à petit, les « niches économiques » dans lesquelles il devient progressivement compétitif.

Sauf exception, les grandes régies de production et de distribution d'électricité ont refusé jusqu'à présent d'entrer en matière sur une production de courant photovoltaïque rétribuée à son coût de revient et « moyenne » avec l'ensemble de la production des autres sources d'énergie.

Dans certains pays, comme la Suisse, les distributeurs ont même adopté une attitude assez paradoxale, consistant à reconnaître l'intérêt qu'il y a à développer le photovoltaïque et le droit de l'utilisateur à en consommer, à condition que ce dernier soit prêt à supporter la totalité de son coût de production ! Cette attitude discriminatoire par rapport au financement du développement des autres formes d'énergie appelle deux remarques :

Le succès des « clubs de consommateurs », particulièrement en Suisse alémanique, a démontré le niveau relativement élevé de la conscience écologique des consommateurs par rapport à celle des producteurs.

La preuve de la fiabilité du système a pu être apportée, et la seule opposition des distributeurs qui soit encore acceptable est celle du coût de production élevé, dont ils sont entièrement responsables.

Fort heureusement, pour éclairer ce sombre tableau, on relèvera que, dans les pays où la distribution de courant électrique n'est pas un quasi-monopole d'État, la sensibilité aux problèmes d'environnement peut être plus élevée. Sous la pression politique, le plus souvent, certains distributeurs d'électricité ont adopté des tarifs de reprise du courant d'origine renouvelable qui tiennent compte des coûts de production : nous citerons les villes de Berthoud en Suisse et d'Aix-la-Chapelle en Allemagne. Le résultat, c'est que la ville de Berthoud est la seule commune de Suisse où les objectifs du programme Énergie 2000 sont d'ores et déjà atteints !

LA TECHNIQUE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule solaire est insérée par laminage entre une plaque de verre et une feuille de matière synthétique, ou entre deux plaques de verre. La lumière pénétrant dans le matériel semi-conducteur de la cellule est transformée en courant par l'effet photoélectrique. La qualité de la cellule solaire détermine le rendement du module, c'est-à-dire la proportion d'énergie lumineuse transformée en énergie électrique.

Les panneaux photovoltaïques réunissent des cellules qui produisent chacune du courant continu à une tension de 0,5 Volt environ. Branchées en série, elles délivrent ensemble une tension utilisable de 12 V environ (ou un multiple de 12 V). Ce courant continu peut être utilisé directement en utilisant du matériel adapté à ce type de courant. Il peut aussi être stocké dans des batteries, dont la tension est adaptée à celle des panneaux.

Il est aussi possible de convertir ce courant continu en courant alternatif à 230 V monophasé ou 400 V triphasé, qui peut être envoyé dans le réseau de distribution ou utilisé sur place par des équipements électriques standards. On trouve sur le marché des convertisseurs à très haut rendement.

Le laminage protège pendant des décennies les cristaux de silicium très sensibles, de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur, des influences mécaniques et météorologiques. Aujourd'hui, environ 99 % des cellules solaires sont faites de silicium, lui-même extrait de sable siliceux.

Les cellules de silicium cristallines (monocristallines et polycristallines) ont un haut rendement (14 à 18 %), mais leurs coûts de production sont élevés.

Le rendement des cellules au silicium amorphe est inférieur (5 à 8 %) mais leur coût de production est moins élevé. La production exige aussi moins d'énergie, d'acides, de solvants et de matière. Ce type de cellules est très répandu pour les petits appareils (montres, calculatrices de poche, etc.) mais elles sont aussi utilisées sur les toits.

Les « cellules Graetzel » (du nom de leur inventeur, physicien de l'EPFL) sont constituées d'oxyde de titane et d'un colorant. Ces composants sont bon marché et non toxiques. La lumière y est « piégée » par le semi-conducteur, ce qui imite la photosynthèse. Le rendement de ces cellules en laboratoire a atteint jusqu'à 11 % et leur coût de production est bas. Mais la production de cellules Graetzel est encore loin d'être au point. Le problème réside notamment dans l'étanchéité du module, soumis à la corrosion. Les expériences ont porté jusqu'ici sur des cellules de très petites dimensions ; il faut encore compter plusieurs années de recherche pour espérer développer une production industrielle en série.

Notons encore que cette énergie doit être consommée pour être utile. Un panneau photovoltaïque éclairé présente une différence de potentiel (tension) entre ses bornes mais, si aucun usager n'est connecté, aucun courant ne circule et la puissance délivrée est nulle. En envoyant le courant dans le réseau de distribution, on assure l'utilisation de toute l'électricité produite.

SITUATION DU PHOTOVOLTAÏQUE EN SUISSE

Les deux approches concernant le développement du photovoltaïque évoquées ci-dessus ne sont pas incompatibles, mais complémentaires. En effet, la première s'adresse aux régions disposant déjà d'un réseau de distribution d'électricité, la deuxième concerne les régions écartées à faible densité de population.

Il est évident que la Suisse devrait connaître un développement du premier type, alors qu'un pays à population dispersée développera en priorité des systèmes isolés. Cela ne veut pas dire que les mini-réseaux ne puissent ensuite être interconnectés pour augmenter la fiabilité et la capacité d'intégration du système, et déboucher finalement sur un réseau national.

En Suisse, l'approche du réseau a bénéficié de l'aide de nombreux programmes de démonstration et notre pays occupe une place de choix dans le domaine de la technique et de l'expérience des systèmes photovoltaïques avec injection dans le réseau. Malheureusement, le manque d'engagement des distributeurs d'électricité n'a pas permis de créer les conditions-cadre favorables au développement d'une industrie photovoltaïque qui permette de réduire les coûts de production.

Pour le moment, les professionnels de l'électricité photovoltaïque en sont donc réduits

à développer leur marché du côté des installations isolées où ils sont déjà compétitifs ;

à essayer de provoquer eux-mêmes des conditions-cadres plus favorables à l'éclosion du marché du photovoltaïque injecté dans le réseau ;

à pratiquer le lobbying auprès des Chambres fédérales, en commun avec les autres acteurs de la scène solaire suisse, pour essayer de faire entrer dans les faits les décisions historiques du peuple suisse de septembre 1990 (moratoire nucléaire, programme Energie 2000).

Parmi les démarches de la première catégorie, nous pouvons citer le programme « Électrification rurale en Suisse » de la PROMES (Association des professionnels romands de l'énergie solaire), dont l'objectif est d'obtenir une évaluation économique préliminaire avant toute décision d'électrification rurale. La PROMES a pris pour modèle des accords analogues en France ¹. Sa démarche a rencontré un écho favorable auprès du Service fédéral des améliorations foncières, qui intervient dans le financement de l'électrification des sites isolés. Du côté des électriciens, l'Union suisse des centrales électriques se retranche derrière le fait « qu'elle n'est pas l'EDF » et qu'elle ne peut jouer un rôle comparable dans le schéma présenté. Elle est toutefois prête à participer, au moyen de son fonds de recherche PSEL, à une première étude de marché actuellement en préparation. Cette initiative n'a donc malheureusement pas abouti.

Dans la deuxième catégorie d'actions, citons le standard CYRUS élaboré par le groupe Greenpeace-SOFAS-PROMES, standard qui concerne les génératrices solaires couplées au réseau ². L'introduction de ce standard en Allemagne et en Autriche a eu pour effet un décollage du marché des installations pour maisons familiales (2 kW). En Allemagne, la mise au concours de ce standard a conduit à un abaissement des prix pouvant atteindre 40 %, ce qui a entraîné un triplement des demandes de subventions et des engagements d'achats pour près de 4000 unités en 1996. La mise au concours dans notre pays du standard CYRUS pour des installations de 2 et de 5 kW a permis de susciter des offres pour des installations de 2 kW à 11,05 fr./W et de 4 kW à 10,55 fr./W.

Dans la troisième catégorie, on parlera de l'action de Swissolar et du Groupe de travail pour les énergies renouvelables aux Chambres fédérales, qui soutiennent une politique énergétique digne de ce nom, et dont les résultats n'ont pas été négligeables dans l'année écoulée :

¹ Accords de coopération sectorielle passés entre l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et EDF (Électricité de France).

² Voir Systèmes solaires « Cyrus ». une vue d'ensemble des installations photovoltaïques standardisées les plus avantageuses ; Zurich, Greenpeace Solarprojekt, 1997.

Au cours de la session de décembre 1996, les Chambres ont étoffé le budget 1997 de la Confédération en accroissant de 4 millions de francs les montants destinés à la promotion des agents renouvelables. Ainsi, des contributions aux investissements peuvent à nouveau être versées pour l'énergie solaire, et non plus seulement pour le chauffage au bois déchiqueté.

Un programme de « contributions promotionnelles de la Confédération aux installations solaires » a été lancé en février 1997 grâce à ces nouvelles ressources. Il prévoit une aide financière de 50 à 117 francs par m² de capteur solaire thermique et de 3 francs par Watt pour les générateurs photovoltaïques.

Un programme d'investissements axé sur la promotion de l'utilisation rationnelle de l'énergie et sur les énergies renouvelables, d'un montant de 64 millions de francs, a été soumis au Conseil fédéral par le conseiller fédéral Moritz Leuenberger, et lancée en avril 1997.

En juin 1997, le Conseil national a accepté une proposition de redevance incitative sur les énergies non renouvelables, mais il n'a pas été suivi par le Conseil des États qui l'a balayée par 25 voix contre 3. Il faudra donc attendre la votation relative aux deux initiatives « solaire » et « énergie-environnement ».

Le 24 septembre 2000 deux initiatives ont été soumises au peuple suisse, qui avaient comme objectif de créer des conditions favorables à une mise en place rapide des énergies renouvelables. Si le principe était clair, les trois objets soumis à l'approbation du souverain l'étaient moins et, comme l'a dit le Conseiller Fédéral Leuenberger, le public a eu quelques difficultés à comprendre la rhétorique fédérale. La campagne musclée d'EconomieSuisse ridiculisant les énergies renouvelables a donc atteint son but, malgré un soutien de 46.6% des votants.

Un nouveau programme fédéral de politique énergétique succédant à Energie 2000 a été lancé le 30 janvier 2001. Dans le cadre de SuisseEnergie la Confédération souhaite "orienter la maîtrise de l'énergie dans le sens du développement durable" et menace de taxes potentielles si les objectifs de réduction de CO₂ ne sont pas atteints d'ici 2010.

MARCHÉ ACTUEL ET POTENTIEL

Le marché suisse du photovoltaïque est de l'ordre de 1 MW par année. Ce chiffre avait augmenté jusqu'en 1992 pour atteindre 1,4 MW, puis il est redescendu en 1995 aux alentours de 1 MW ³. La production du parc photovoltaïque a atteint 5680 MWh en 1995. La productivité moyenne annuelle des installations est de 800 kWh/kWp, passant de 1100 pour les meilleures à 500 pour les plus mauvaises.

Les perspectives de marché à court terme dépendent malheureusement de la politique énergétique conduite par l'OFEN, qui fluctue au gré des pressions politiques et de l'état des caisses de la Confédération. Cependant, au printemps 1997, la situation se redresse légèrement par rapport aux deux dernières années. Le nouveau programme de contributions promotionnelles de la Confédération entraîne une augmentation sensible du nombre de réalisations, et des actions commerciales de grande envergure comme celle de Greenpeace (systèmes CYRUS) devraient permettre un abaissement des coûts de production des générateurs photovoltaïques.

³ Les chiffres pour 1996 sont disponibles dans l'étude de marché périodique de la SOFAS (*Markterhebung* 7990. Sa traduction par la PROMES est disponible au secrétariat romand de Swissolar.

L'avenir du photovoltaïque est aussi lié à l'avenir du marché de l'électricité, qui va subir de profonds bouleversements. La libéralisation des prix de l'électricité, à partir du 1er janvier 1998, aura des effets indirects sur l'environnement.

Il est probable que dans un premier temps la baisse des prix entraîne un déplacement de la consommation d'énergie pour produire de la chaleur, les hydrocarbures cédant du terrain devant le courant électrique très bon marché; avec un effet bénéfique pour l'environnement à l'emplacement de consommation. En revanche, cette chute des prix entraînera un relâchement des économies d'énergie qui avaient réussi dans une certaine mesure à stabiliser la consommation. Sous l'effet de la concurrence, et en l'absence de facturation des coûts indirects, c'est le courant des vieilles centrales thermiques des pays d'Europe centrale et orientale qui sera le plus compétitif, et les centrales produisant des énergies renouvelables seront défavorisées.

À plus long terme, les entreprises électriques se trouveront devant un problème économique lorsqu'elles devront renouveler leur parc de centrales. En effet, dans un régime de forte concurrence, sans protection et sans secours de l'État, les bailleurs de fonds s'intéressent de très près au rendement global de leur investissement. D'une part, en l'absence de monopole, les entreprises électriques n'auront aucune garantie de débouchés ; d'autre part, les investisseurs s'intéresseront davantage à certains coûts indirects qu'il ne sera plus possible de laisser régler par l'État (on l'a vu en Angleterre lors d'une tentative de privatisation de certaines centrales nucléaires, qui n'ont pas trouvé preneur). Il est probable que, par nécessité, les entreprises électriques s'intéresseront alors à nouveau aux petites unités de production et aux technologies décentralisées.

Ce bilan serait mince pour le développement de l'énergie photovoltaïque si la libéralisation ne donnait pas une chance supplémentaire aux usagers sensibles aux questions d'environnement. En effet, de même que la pression des consommateurs a pu imposer dans le secteur de la production agricole une réforme des moyens de culture pour obtenir des lignes de produits « biologiques », la libéralisation devrait permettre aux consommateurs de courant électrique de choisir beaucoup plus facilement que maintenant la qualité de courant qui leur convient. Un distributeur avisé serait alors en mesure, par une politique judicieuse de prix moyen entre la production de ses centrales hydroélectriques et celles de centrales photovoltaïques modernes, de proposer à cette clientèle un courant électrique écologiquement correct à peine plus cher que celui de ses concurrents.

Dans les pays à économie énergétique planifiée, -les autorités pourraient favoriser cette production de courant «propre» par la taxation des énergies non renouvelables, en attendant l'introduction d'une comptabilité des coûts externes.

À long terme, et même dans des conditions économiquement compétitives, il n'est pas possible ni souhaitable d'envisager que l'électricité solaire se substitue à toutes les autres formes d'énergie. La part qui lui reviendra naturellement dépendra beaucoup des conditions locales, économiques, climatiques et démographiques.

En ce qui concerne l'avenir du photovoltaïque en Suisse, le programme Energie 2000 avait fixé un objectif de 50 MWp pour l'an 2000, mais le plafond maximum possible n'est pas défini avec exactitude. Il est généralement admis qu'un pourcentage de 20 % d'électricité photovoltaïque peut être absorbé sans difficulté dans un réseau doté d'une forte capacité de stockage sous forme de barrages.

Quant aux surfaces de captage nécessaires, les électriciens aimaient bien comparer, naguère, la surface d'une centrale nucléaire avec celle d'une centrale photovoltaïque de même puissance... Pour bien montrer le caractère déraisonnable du photovoltaïque, ils ont « planté » 500 kW dans les pâturages de Mont-Soleil ! Ce qu'ils n'ont pas voulu voir, c'est que l'on peut construire une centrale de même puissance sur la marquise de la gare de Lausanne sans utiliser un cm² du sol helvétique.

On peut donc définir la surface utilisable pour produire de l'énergie photovoltaïque à partir de la surface construite ⁴. Cette surface se situe entre 50 et 300 km² selon les critères de sélection retenus. En tenant compte de la productivité moyenne suisse indiquée ci-dessus, la plus petite de ces deux surfaces permettrait de produire 4,2 TWh (15 PJ), soit presque le dixième de la consommation électrique de 1996 (48,7 TWh ou 175 PJ).

Un fabricant d'éléments photovoltaïques adaptés à la construction a évalué la surface de toitures et façades construites annuellement entre 13 et 16 km². Il a proposé d'en équiper 2,5 km² en photovoltaïque, ce qui permettrait d'abaisser les coûts de fabrication à moins de 500 fr./m² et le prix du courant à moins de 0,30 fr./kWh. Cette opération créerait en Suisse environ 25 000 emplois et diminuerait la production de CO₂ d'environ 200 000 tonnes par an. ⁵

Dans l'hypothèse ci-dessus, un pourcentage de 10 % d'électricité photovoltaïque serait atteint en vingt ans, et 20 % en quarante ans.

Bien que l'injection dans le réseau représente la voie royale pour « solariser » une partie de notre consommation d'électricité, nous sommes d'avis qu'il ne faut pas négliger le développement du photovoltaïque isolé du réseau pour plusieurs raisons :

Il existe encore, même en Suisse, des régions isolées où la demande d'énergie est très ponctuelle et relativement peu importante. Dans de telles conditions, même un distributeur très centralisateur comme EDF a reconnu le non-sens économique de la politique de réseau à tout prix - plus exactement à n'importe quel prix !

La quasi-totalité de l'accroissement de la demande d'électricité va provenir, sur le plan mondial, des régions en voie de développement, dont une bonne partie présente une faible densité de population et de bonnes conditions d'ensoleillement. Dans ces conditions, l'électrification photovoltaïque rurale représente une possibilité de répondre à la demande croissante des prochaines décennies sans aggraver le problème des ressources et des atteintes à l'environnement.

En Suisse, les installations isolées ne sont pas recensées. Leur part actuelle est évaluée à un quart environ de l'ensemble, et pourrait devenir quantité négligeable à l'avenir.

LA LIBÉRALISATION DU MARCHÉ DE L'ÉLECTRICITÉ

Obstacle ou aide au développement du photovoltaïque ? la libéralisation du marché de l'électricité qui secoue l'Europe et l'Amérique annonce en tout cas la fin de l'intervention des états dans les choix énergétiques, y compris les subventions directes.

Mais heureusement d'autres facteurs jouent en faveur des énergies renouvelables.

Tout d'abord les coûts indirects ne seront plus laissés à la charge de l'État, ce qui rendra beaucoup moins attrayante l'énergie nucléaire par exemple.

En effet, son prix de vente se rapprochera de son coût de production réel, ce qui rendra le photovoltaïque plus rapidement compétitif en réseau.

En outre l'ouverture du marché oblige déjà les distributeurs à s'interroger sur l'attitude des consommateurs qui ont déjà montré dans d'autres domaines leur préférence pour les produits plus chers, mais plus "écologiquement corrects".

La prise de conscience des électriciens pour les problèmes d'environnement, bien que tardive et forcée, n'en demeure pas moins une bonne chose pour l'avènement des énergies renouvelables. Une nouvelle tarification est proposée à partir de juin 2002 aux consommateurs genevois qui ont le choix entre du courant 100%

⁴ Étude de S. Nowak, DIS 2726.

⁵ Atlantis Solar Systeme, 7.3.97

hydraulique (-1 ct/kWh), du courant d'énergie renouvelable de production locale (+3 ct/kWh), du courant d'énergie renouvelable avec au moins 2.5% d'énergie nouvelle dont du photovoltaïque (+8 ct/kWh) et du courant mixte pouvant inclure des énergies non renouvelables (-1.3 ct/kWh). La variation de prix est donnée pour le consommateur privé par rapport au tarif unique précédent ; les entreprises peuvent faire le même choix avec des prix différenciés en moyenne et basse tension, heure pleine et heure creuse, hiver et été.

Une première estimation fixe à 54 GWh le besoin de courant vert, dont 1.35 GWh issu de nouvelles énergies renouvelables. Pour atteindre cet objectif 10'000 m² de modules photovoltaïques supplémentaires seront nécessaires.

CONCLUSION

Le courant électrique d'origine solaire peut couvrir en Suisse une part appréciable de la consommation d'électricité, évaluée à 10 ou 20 % de la consommation actuelle. Le temps nécessaire pour atteindre cet objectif dépendra principalement des décisions politiques qui seront prises ces prochaines années.

Il serait souhaitable que cette part de production soit injectée dans les réseaux basse tension, privilégiant dans la mesure du possible une caractéristique intéressante de l'énergie solaire qui est la proximité de la production et de la consommation ; diminuant ainsi la charge des lignes électriques.

Sur le plan mondial le dernier congrès photovoltaïque de Munich d'octobre 2001 a relevé des progrès significatifs en direction d'un véritable courant de développement d'un marché qui représenterait 100 milliards d'euros en 2030 si la croissance de 25% par an se maintenait.

Une conséquence de cette croissance est un besoin d'ici 2005 d'une production additionnelle de 5'000 tonnes de silicium de qualité solaire. L'industrie photovoltaïque entre donc dans une phase adulte qui pose les problèmes de tout développement industriel (comme indiqués ci-dessous), mais une production de silicium adaptée aux besoins de l'industrie photovoltaïque tiendra compte de ces contraintes et saura trouver des solutions si l'on en croit les travaux présentés à Munich.

Les actes complets du Congrès sont publiés (sur papier et sur CD-rom) par le Bureau des publications de la Commission européenne, avec copyright à la Communauté européenne. Un compte rendu détaillé a été publié sur Internet par la PROMES avec l'accord de l'éditeur :

<http://www.promes.ch/bulletins/pn38/pn38-04.html>

ÉLECTRICITÉ PHOTOVOLTAÏQUE ET POLLUTION, OU LA NÉCESSITÉ DE DÉVELOPPER L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE

Le silicium utilisé pour les semi-conducteurs doit être extrêmement pur et la purification laisse derrière elle une quantité de déchets dangereux (en particulier des composés chlorés) beaucoup plus grande que la quantité de silicium pur produit.

La préparation de silicium pur part du quartz. Un premier raffinage aboutit à du silicium-métal de qualité industrielle. En 1990, la production mondiale de ce silicium était d'environ 800 000 tonnes (800 kt), dont seulement 32 kt (4 %) ont été convertis en silicium ultra-pur - le seul utilisable dans l'électronique par un procédé de purification exigeant plus de 100 kt de chlore et quelque 200 kt d'acides et solvants. De cette quantité de silicium ultrapur (SUP ; en anglais EGS, Electronic Grade Silicon), 10 % seulement était utilisé pour la fabrication de cellules photovoltaïques (PV). On constate par ailleurs un gaspillage de silicium considérable puisque, des 32 kt de SUP obtenues, on ne retrouve qu'un peu moins de 1 kt dans les produits finis (chips). Ce silicium gaspillé commence à être utilisé pour la production de cellules PV.

La production de cellules photovoltaïques est en augmentation très rapide. L'augmentation de la puissance installée mondialement a été estimée à 50 MW/an et, selon une projection de l'Office de l'énergie des États-Unis, elle pourrait atteindre 100 GW/an (soit 2000 fois plus) dans les années 2020-2030. Même si cette projection est très probablement exagérée, il faut s'attendre à ce que le photovoltaïque devienne, et de loin, le premier consommateur de SUP. Et si rien ne change dans les processus de fabrication, les quantités de chlore, acides et solvants deviendraient monstrueuses et quasi impossibles à gérer. Déjà aujourd'hui, l'évacuation des déchets liquides dus à l'industrie des semi-conducteurs ne va pas sans mal et une grande partie est simplement rejetée dans le sous-sol, avec des conséquences à long terme difficiles à apprécier, mais potentiellement catastrophiques.

Le succès du photovoltaïque est certes réjouissant, mais son développement à grande échelle n'est acceptable que si les flux de matières qu'il provoque sont maîtrisés. La démarche de l'écologie industrielle, dont le but est d'utiliser les matières le plus possible en cycles fermés, apparaît ici comme absolument nécessaire. Par ailleurs, le photovoltaïque peut se contenter de silicium de pureté moins grande que les chips et les procédés de purification peuvent être rendus plus performants, tout en utilisant moins de chlore. Ce qui importe, c'est de résoudre ces problèmes avant que l'industrie du photovoltaïque ne se noie dans sa propre pollution.

P L.

* Données tirées de: Robert U. Ayres and Leslie W. Ayres, *Industrial Ecology, towards closing the materials cycle*. Edward Elgar Editor.

Les objectifs du programme Energie 2000 sont loin d'être atteints. Les réticences de l'économie suisse à prendre le train en marche nous ont coûté une position de leader dans ce nouveau secteur de l'économie, que les initiatives des électriciens nous permettront peut-être de regagner.