Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 106 (1980)
Heft: 15-16

Artikel: Possibilités d'application de l'énergie solaire en Suisse: le point de vue de la CGE
Autor: Hohl, Robert / Rédaction
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73966

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 22.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Possibilités d'application de l'énergie solaire en Suisse

Le point de vue de la CGE [1]

par Robert Hohl, Baden

On a pu lire récemment que l'énergie solaire serait dangereuse, notamment pour l'environnement. Nous pensons que ce qui est plus dangereux, c'est l'euphorie parfois propagée au sujet de cette forme d'énergie. En effet, si l'on en écoutait les prophètes les plus enthousiastes, on risquerait de mettre en danger l'avenir de notre approvisionnement en énergie en accordant dans les prévisions une part beaucoup trop grande au solaire.
Le succès de l'énergie solaire dépend du réalisme avec lequel elle sera planifiée. La commission chargée d'élaborer les lignes directrices de notre approvisionnement énergétique s'est attachée à cerner la part que le solaire peut y apporter. Nos lecteurs seront certainement intéressés à connaître les conclusions chiffrées auxquelles ont abouti ces travaux.

Rédaction

1. Introduction

A l'avenir, l'humanité ne disposera en fait que de trois possibilités pour produire de grandes quantités d'énergie :

— le *charbon* (sous réserve d'une amélioration des conditions d'extraction) ;
— *l'énergie nucléaire* (sous réserve du recours à la surrégénération) ;
— *l'énergie solaire* (sous toutes ses formes renouvelables).

L'accumulation de gaz carbonique dans l'atmosphère, inhérente à la combustion des énergies fossiles, pourrait toutefois contraindre à réduire un jour l'apport du charbon.

Dans notre pays, il ne convient pas de parler d'une alternative énergie nucléaire-énergie solaire. Nous aurons besoin de l'une comme de l'autre. Seul le développement de toutes les énergies de substitution nous permettra de remplacer le pétrole : l'énergie nucléaire essentiellement pour produire de l'électricité ; l'énergie solaire, le charbon et, temporairement, le gaz naturel pour produire de la chaleur. L'évolution dans le secteur des transports est encore imprévisible.

Le triple but de cet exposé, limité à *l'énergie solaire*, est de :

— présenter un éventail des possibilités d'utilisation de l'énergie solaire, sans entrer dans les détails techniques ;
— présenter le point de vue de la CGE (Commission fédérale pour une conception globale de l'énergie) ;
— confronter cet avis aux vœux chimériques ayant cours dans certains milieux.

Je pars du principe que les différentes hypothèses à caractère institutionnel relatives aux scénarios de la CGE sont connues, en particulier celles des scénarios II et IIIc qui se trouvent au premier plan. J'utiliserai comme unité énergétique le Tcal qui sert également de référence dans le rapport final de la CGE (1000 Tcal représentent la valeur énergétique de 100 000 tonnes d'huile de chauffage ou de 1,16 milliard de kWh d'électricité).

Une transformation économique et à grande échelle du rayonnement solaire en chaleur ou en courant permettrait de réaliser l'essentiel des objectifs et des postulats de la CGE : sécurité d'approvisionnement, protection de l'homme et de son environnement, économies d'énergie, remplacement du pétrole.

Compte tenu de ces avantages, le problème est centré sur l'élimination de deux inconvénients qui font obstacle à une utilisation économique de l'énergie solaire : sa faible densité énergétique et les fluctuations considérables de l'offre le long des jours et des saisons. Dans l'échelle « énergie disponible à volonté — énergie en ruban — énergie indépendante de la demande », le rayonnement solaire, il faut bien le dire, se trouve au tout dernier rang.

Tiraillée entre les tendances idéaliste et réaliste, la commission de la CGE a passé bien des heures à la mise au point d'un consensus acceptable. Etant donné que le citoyen suisse réagit essentiellement en fonction de critères économiques momentanés, au moins pour tout ce qui touche à son portemonnaie, la CGE est convaincue qu'un large recours à l'énergie solaire ne sera possible qu'après un développement efficace de cette technologie ou une envolée folle des prix du pétrole. Il ne suffit pas que la population comprenne et accepte la situation.

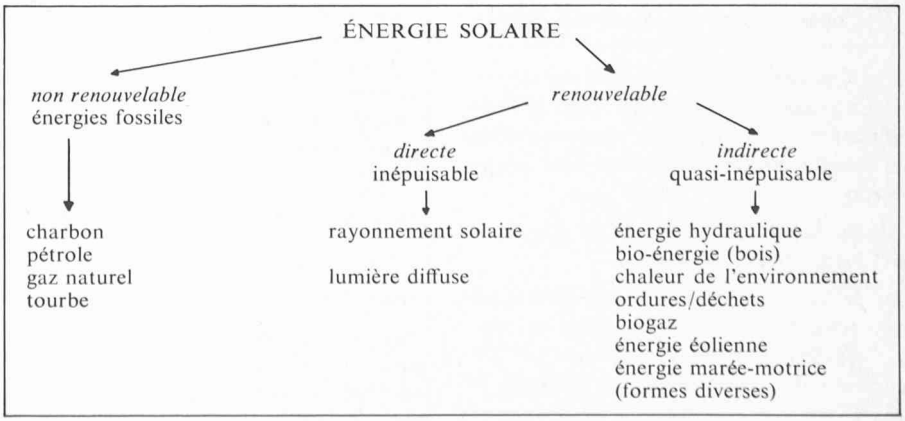
2. Définition de l'énergie solaire

Avant d'apprécier le rôle attribué au soleil par la CGE et de le confronter aux thèses chimériques — largement répercutées par les médias — des promoteurs exclusifs de cette forme d'énergie, il convient d'expliquer ce que recouvre cette idée d'énergie solaire. Car outre l'énergie nucléaire, la géothermie et l'énergie marémotrice, toutes les formes d'énergie utilisées par l'homme proviennent en fin de compte du soleil.

Du point de vue écologique, on distingue les sources d'énergie solaires fossiles *en voie d'épuisement*, de celles qui sont *renouvelables* (fig. 1). Les énergies renouvelables sont à leur tour partagées en rayonnement *direct* (y compris la lumière diurne diffuse) et en énergie solaire *indirecte*, quasi inépuisable. Celle-ci comprend toutes les formes d'énergie mises en œuvre par la chaleur du soleil dans un cycle naturel constant, telle l'énergie hydraulique, la bio-énergie, l'éolienne, les vagues de la mer, etc. Le cycle de renouvellement doit être limité à l'espace d'une génération (bois). Quasi inépuisable signifie que l'offre est sans cesse renouvelée mais que l'énergie fournie ne l'est qu'en quantité limitée. Du point de vue suisse, la définition des énergies renouvelables correspond aux seules sources d'énergie *indigènes* méritant actuellement d'être mentionnées.

Il est d'usage chez les spécialistes de définir l'énergie solaire comme étant uni-

FIGURE 1



[1] Version française d'un exposé présenté à la Journée d'information « Energie solaire et électricité » du 14 novembre 1979 à Berne.
(CGE = Conception globale de l'énergie)

quement le rayonnement direct qui, ajouté au rayonnement diffus, donne ce qu'on appelle le « rayonnement global ». On parle de capteurs — ou collecteurs — qui absorbent le rayonnement global, de réflecteurs et de concentrateurs (tous deux des miroirs), ainsi que de cellules solaires qui ne peuvent utiliser que le rayonnement direct. Toutes les formes d'énergie indirecte sont mentionnées sous leur dénomination spécifique.

Or, il y a quelques années, les partisans de l'énergie solaire et les écologistes, dans leur enthousiasme euphorique, avaient attribué à l'énergie solaire des taux fantastiques dans la couverture de nos besoins futurs. Eux aussi ne considéraient alors que le rayonnement solaire direct, car ils ne parlaient que de capteurs, de miroirs et de cellules solaires. Devant la réalité, ils ont dû, pour ne pas perdre la face, étendre cette définition, de sorte que lorsqu'ils évoquent aujourd'hui des taux de couverture de 30 % et plus, ils entendent toutes les formes d'énergie renouvelables. Il va de soi que cette façon de présenter les choses est particulièrement séduisante dans un pays comme la Suisse puisqu'on peut y inclure l'énergie hydraulique.

Bien ! Je partage cette opinion. Encore s'agit-il de ne pas confondre ces chiffres avec les 0,9 à 3,1 % de la CGE (selon les scénarios) qui ne comprennent que l'énergie solaire directe.

Dans le présent article, le terme d'énergie solaire recouvre également toutes les formes indigènes d'énergie renouvelables, donc l'*énergie solaire dans son sens le plus large*. S'il est question uniquement de l'énergie directe, nous parlerons d'*énergie de rayonnement solaire*. Ajoutons à titre de clarification que la CGE englobe les énergies non traditionnelles sous le terme « énergies nouvelles ». Outre le rayonnement solaire, celles-ci comprennent la géothermie, le biogaz, l'énergie éolienne, les ordures et certaines formes d'énergies synthétiques. L'énergie hydraulique et le bois n'en font pas partie (fig. 2). Bien qu'elle ne soit pas issue du soleil, la géothermie est inclue dans ce groupe, étant donné qu'il s'agit également d'une énergie renouvelable en cas d'utilisation continue.

FIGURE 2 : *Energie solaire — Définitions*

CGE		E-2000
« énergie solaire »	« énergies nouvelles »	« énergie solaire » au sens large
rayonnement solaire	rayonnement solaire	rayonnement solaire
—	—	énergie hydraulique
—	—	bois/bio-énergie
—	chaleur de l'environnement	chaleur de l'environnement
—	ordures/déchets	ordures
—	biogaz	biogaz
—	énergie éolienne	énergie éolienne
—	géothermie	géothermie
—	(méthanol)	—
—	(hydrogène)	—

3. Comparaison CGE — « E-2000 »

Ces notions étant définies, il est désormais possible de comparer (fig. 3) l'application des énergies renouvelables (l'énergie solaire dans son sens large) entre

- les scénarios de la CGE (II, IIIc, IIId, année 2000) et
- le concept énergétique « E-2000 » des groupements écologistes qui se considèrent « libérés des sujétions » (« au-delà des contraintes ») et réfutent la CGE.

Le tableau a été complété par la variante dite « de stabilisation » de tendance écologique qui fut élaborée en 1975 déjà par le groupe de travail EWU (Energie-Wachstum-Umwelt) à la demande de la CGE [2]. On décèle à la lecture des deux conceptions que la « variante » de la CGE et le modèle « E-2000 » ont été conçus pratiquement par les mêmes personnes, si bien qu'il est facile de suivre certains détails du développement des opinions. En ce qui concerne la consommation d'énergie globale, il n'est toutefois pas possible de mettre en parallèle la « variante de stabilisation » et les autres scénarios, parce qu'ils reposent sur des hypothèses différentes.

En comparant la variante IIIc — soutenue par la majorité des membres de la commission CGE — avec « E-2000 », on constate avec surprise que la différence en matière de contribution globale de l'énergie solaire est loin d'être aussi grande qu'on l'affirme souvent. Exprimée en Tcal, elle atteint tout au plus 20 %. Une telle divergence ne justifiant pas à mes yeux le rejet du rapport de la CGE, j'en conclus que la polémique engagée par les écologistes est de nature exclusivement idéologique et politique (énergie nucléaire). Si la part des énergies renouvelables atteint dans « E-2000 » le taux impressionnant de 33 % ce n'est que parce que ses auteurs prétendent obtenir une réduction considérable des besoins globaux au moyen de mesures d'économie et de renoncement très rigoureuses et en partie hypothétiques.

Alors que la comparaison détaillée fait ressortir une large concordance sur les possibilités de l'énergie hydraulique, du bois et des déchets, des divergences importantes apparaissent quant à l'apport du rayonnement solaire, de la chaleur environnante (par les pompes à chaleur) et la production de biogaz. Or, la CGE exprime l'avis unanime qu'un doublement de la contribution de ces énergies — dont l'apport envisagé est d'ores et déjà très optimiste — n'est plus du tout réaliste, étant donné qu'il ne correspondrait plus à la réalité socio-politique de notre pays, qui doit être seule consi-

[2] Publications de la CGE nos 11 a et 11 b.

FIGURE 3 : *Couverture des besoins énergétiques globaux par l'énergie solaire au sens large en l'an 2000 (Tcal)*

énergies renouvelables indigènes	scénarios de la GEK (1978) II	IIIc	IIId	EWU variante de stab. (1975)	E-2000 (1978)
rayonnement solaire	2 100 0,9 %	4 750 2,3 %	6 000 3,1 %	17 000 7,4 %	10 000 6,0 %
capteurs	1 900	3 950	5 000	}	7 900
technique passive	200	500	700	} 14 000	1 900
centrale solaire/ kW/cellules photo-volt.	—	300	300	3 000	200
énergie hydraulique	26 000	26 000	26 000	27 000	26 000
bois/bio-énergie	3 000	6 000	6 000	6 000	6 000
chaleur de l'environnement (pompes à chaleur)	1 000	2 450	4 500	10 000	5 500
ordures et déchets	2 500	2 800	2 800	2 500	2 400
biogaz	600	1 400	1 800	500	2 900
énergie éolienne	—	100	100	—	—
(géothermie)	100	1 500	2 500	8 000	2 400
total	35 300	45 000	49 700	71 000	55 200
consommation globale	245 000	210 000	194 000	232 000	168 000 (« virtuelle »)
part (%)	14,4	21,4	25,6	30,6	32,8
part selon le modèle E-2000	21,0	26,8	29,6	—	32,8
part sans énergie hydraulique ni bois	2,6	6,2	9,1	16,4	13,8

dérée selon le vœu des mandants du rapport. Le fait est que le passage du scénario II aux scénarios IIIc et IIId démontre clairement qu'une telle augmentation ne pourrait être réalisée qu'au moyen de subventions considérables. Il en résulterait de sérieux problèmes quant à l'égalité de droit : chaque contribuable ne possède pas sa propre maison, susceptible d'être équipée de capteurs.

Considérons maintenant les diverses sources d'énergie renouvelables :

4. L'énergie du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire peut être transformé en énergie utile de trois manières :

— *photo-thermique :* par l'absorption dans des capteurs ou par concentration à l'aide de miroirs pour produire de la chaleur ;

— *photo-électrique :* par cellules photovoltaïques dans lesquelles le rayonnement produit une tension électrique, et

— *photo-chimique :* le rayonnement fournissant aux plantes l'énergie nécessaire à produire certaines réactions chimiques (photosynthèse) au cours desquelles une partie de l'énergie est emmagasinée sous forme de biomasse.

La CGE s'est limitée à l'étude des méthodes *photo-thermiques*, car elle ne disposait pas encore des éléments nécessaires pour apprécier suffisamment les perspectives de mise au point de cellules photo-électriques à des coûts acceptables et que la bioénergie était de toute façon traitée séparément (étude du bois).

En moyenne suisse, le rayonnement global fournit une quantité d'énergie d'environ 1 Gcal (1 million de kcal) par année et m^2 (1160 kWh/m^2a, 133 W/m^2). Sur toute la surface du pays, la production annuelle atteint par conséquent 41,3 millions de Tcal (5,5 millions de MW). Sous réserve d'un taux de transformation moyen de 15 % (pertes d'accumulation inclues), une surface de captage de 1000 km^2 serait nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques actuels de 160 000 Tcal. Cette étendue est comparable à la surface construite du pays, qui atteint 1800 km^2. Mais pour que l'offre coïncide dans le temps avec les besoins, il faudrait créer un réservoir d'eau chaude de 300 millions de m^3, ce qui correspond au quart de notre volume de construction actuel, ainsi qu'un grand nombre d'ouvrages hydrauliques d'accumulation. Théoriquement, on le voit, l'ensemble de nos besoins énergétiques pourrait être couvert par l'énergie de rayonnement solaire. Il faut pourtant espérer que nos descendants ne seront pas réduits à de telles solutions.

4.1 *Production d'eau chaude et chauffage des locaux*

La CGE a fait exécuter une étude [3] sur les possibilités de l'énergie solaire en matière de chauffage, étude qui a été supervisée par la « Commission fédérale pour l'utilisation de l'énergie solaire », dans laquelle est notamment représentée la SSES. Ce travail a été pris en compte par le Comité « énergies nouvelles » de la CGE dans le cadre de ses activités.

L'analyse de l'habitat existant a révélé qu'un maximum de 400 000 unités de logement (20 % de l'habitat global, y compris les villas familiales) se prêtent à l'installation de capteurs solaires dotés d'un rendement suffisant, c'est-à-dire capables de satisfaire au moins la moitié des besoins annuels en *eau chaude*, et de fournir un modeste apport au chauffage des locaux pendant l'inter-saison. Sur les 750 000 nouveaux logements qui devraient être construits d'ici l'an 2000, le potentiel solaire utilisable pratiquement pourrait atteindre environ 40 %. Les critères suivants ont été pris en compte pour effectuer ces évaluations : topographie, disposition des toitures, ombres, rapport entre les surfaces du toit et de l'habitat, protection d'ouvrages culturels, etc. Il est en outre très incertain que les capteurs des régions montagneuses soient opérationnels sous une couche de neige.

A part cela, tous les immeubles industriels, artisanaux et du secteur public présentent un potentiel estimé au quart du potentiel global de l'habitat helvétique. Si l'on voulait exploiter encore davantage le rayonnement solaire, il faudrait passer au stade du chauffage solaire à distance, en recouvrant des terres incultes ou une partie des constructions de grands ensembles de capteurs et en installant un réseau de distribution de chaleur jusque dans les immeubles. La CGE a fait abstraction de cette possibilité, étant donné son caractère exceptionnel.

La couverture de la moitié au moins des *besoins annuels en chauffage* d'une maison par le rayonnement solaire poserait des problèmes beaucoup plus difficiles. Dans ce domaine, la technique est en plein développement. On est confronté ici au paradoxe selon lequel on aurait besoin du rayonnement solaire pour chauffer les locaux, au moment où ce rayonnement n'existe pas. Il est dès lors évident que cette tâche implique de gros frais d'appareillage et est inséparable de la solution du problème de stockage. Son utilisation reste donc pour l'heure limitée aux nouveaux immeubles conçus à cet effet ou en voie de rénovation totale.

Il convient tout d'abord de réduire les besoins de chauffage à une fraction de leur valeur actuelle, par l'isolation thermique et par des conceptions architecturales adéquates. Cette mesure de réduction est par ailleurs généralement recommandée dans le cadre des économies d'énergie et elle doit être prise en compte chaque fois qu'il est question de remplacer une installation de chauffage traditionnelle par un système dit « de substitution ». Puis il faut installer 30 à 50 m^2 de surface de captage par unité d'habitat, ainsi qu'un volume de stockage qui représente en m^3 près du tiers de la superficie de captage en m^2. Le chauffage solaire pendant toute l'année n'est possible qu'à l'aide des pompes à chaleur, avec recours au toits solaires ou aux capteurs placés sous les toits. Une énergie d'appoint reste donc nécessaire, soit pour le chauffage complémentaire pendant les jours les plus froids, soit pour entraîner les pompes à chaleur. On attend beaucoup des techniques solaires dites passives. La CGE les prend également en considération pour les nouveaux bâtiments. Il s'agit de mesures de construction concernant l'orientation des immeubles, l'adaptation de l'architecture, la répartition des espaces, des nouveaux matériaux pour des façades conçues à la fois comme capteurs et accumulateurs, de l'utilisation des fenêtres comme capteurs, d'isolateurs nocturnes, etc.

D'une manière générale, l'avantage principal de la maison solaire réside moins dans le remplacement du mazout par le rayonnement solaire que dans la réduction des besoins en chaleur à une fraction des valeurs actuelles, grâce aux nouvelles techniques de construction et d'isolation thermique, réduction qui est la condition même du chauffage « tout solaire ». Il en résulte une économie de mazout plusieurs fois supérieure à celle économisée grâce au seul rayonnement solaire.

Combien de mazout par mètre carré de capteur est-il possible d'économiser par année ? Cette question donne lieu à de fréquentes controverses. La raison de ce désaccord apparaît simplement dans la relation suivante :

$$\text{Economie en kg de mazout par m}^2 \text{ et par année} = 100 \times \frac{\eta \text{ sol.}}{\eta \text{ mazout}}$$

Cette formule est issue du quotient :

$$\frac{\text{Chaleur utile annuelle provenant du rayonnement global}}{\text{Chaleur utile provenant du pouvoir calorifique d'un kg de mazout}} = \frac{10^6 \text{ kcal/m}^2 \times \eta \text{ sol.}}{10^4 \text{ kcal/kg} \times \eta \text{ mazout}}$$

Selon les rendements (η sol., resp. η mazout) appliqués, on aboutit à des valeurs très différentes. Les adeptes de l'énergie solaire attribuent au capteur un rendement de 60 %, tel qu'il peut être réalisé un jour d'été ensoleillé, et ne concèdent à la chaudière à mazout que 20 %, taux considéré comme très bas au

[3] Publication nº 8 de la CGE.

plus fort de la saison chaude. Il en résulte une économie de 300 kg de mazout par m^2. L'observateur plus réaliste, pour sa part, prend en considération l'ensemble de l'année, y compris les pertes inhérentes aux différents systèmes et à l'accumulation. Il estime donc à environ 25 % le rendement de l'installation solaire et à 65 % celui de la chaudière combinée, n'obtenant ainsi plus que 40 kg de mazout économisé par m^2. Entre ces deux extrêmes, toutes les valeurs sont possibles. Mais attention ! — toute estimation de la rentabilité repose sur ces chiffres.

D'autre part, on entend souvent dire, du côté des écologistes, que l'énergie solaire provenant des capteurs est une chaleur à basse température, idéale du point de vue exergétique. Ils l'opposent à la chaleur d'origine électrique pour la production de laquelle le courant de haute valeur est dévalorisé par sa transformation en basses températures sans utilisation de son potentiel exergétique. La première affirmation est fausse. Le rayonnement solaire est également une énergie de haute valeur (théoriquement 6000°C) qui est réduite dans les capteurs à de basses températures sans utilisation de sa capacité exergétique, tout comme le mazout dans les chaudières et le courant dans les radiateurs électriques. L'exergie n'est donc pas un argument en faveur du chauffage solaire.

4.2 *Réfrigération à l'aide de l'énergie de rayonnement solaire*

Plutôt que de vouloir chauffer avec le soleil, qui fait souvent défaut quand on a besoin de lui, on pourrait l'utiliser plus judicieusement pour la réfrigération, cette dernière étant justement nécessaire par forte insolation. Actuellement, c'est la machine à froid à absorption qui semble le mieux s'y prêter. Comme elle a besoin d'une eau portée à 100°C comme agent moteur, il faudrait utiliser des réflecteurs à concentration. Ceux-ci présentent toutefois l'inconvénient de n'utiliser que le rayonnement direct qui ne représente, sous nos latitudes, que la moitié du rayonnement global. De ce fait, la durée d'utilisation en est fortement réduite, alors que le problème de l'accumulation devient plus aigu. Sa rentabilité est donc compromise. C'est pourquoi la CGE n'a pas pris en considération cette forme d'utilisation de l'énergie solaire.

4.3 *La production d'électricité à l'aide du rayonnement solaire*

La CGE a chargé un institut de recherches d'étudier les possibilités de recours aux centrales solaires à héliostats et avec groupes turbo à vapeur. Une telle centrale d'une puissance nominale de 100 MW, érigée au-dessus de la limite des arbres dans les zones alpestres, pourrait produire près de 150 millions de kWh par année selon l'ensoleillement. La durée d'exploitation de la puissance installée atteindrait quelque 17 %, ce qui implique d'emblée des coûts de production élevés, même si le kW installé n'y est pas plus cher que dans une centrale nucléaire. Une telle unité devrait être équipée d'une superficie de panneaux d'au moins 0,5 km^2 et occuperait une surface de 1,5 km^2. Les cellules photo-voltaïques ne donneraient pas de meilleur résultat.

Sans tenir compte de la protection des paysages, on a recensé en Suisse environ 40 sites susceptibles d'accueillir de telles installations. Elles fourniraient ensemble 6,4 milliards de kWh par année, soit environ la production annuelle d'une centrale du type Gösgen. Leur pointe de puissance (4700 MWe) serait supérieure à celle de la moitié de toutes nos usines d'accumulation hydraulique et constituerait une pointe journalière bienvenue — mais, bien sûr à condition que le soleil brille, alors que les centrales à accumulation sont constamment prêtes à fournir du courant.

Quelques centaines de MWe pourraient être absorbés par le réseau national interconnecté. Mais si le soleil devait produire davantage qu'une charge de pointe en période de rayonnement, l'aménagement de systèmes d'accumulation hydrauliques supplémentaires, ou de centrales thermiques de pointe, serait inévitable pour la répartition de la charge. Environ 15 % de l'énergie produite annuellement par ce parc de centrales solaires devrait être accumulée. Le prix du kWh s'en ressentirait.

Ainsi, un apport non négligeable de l'énergie solaire à la production d'électricité serait techniquement possible. Mais le coût élevé et, surtout, l'atteinte aux paysages me paraissent parfaitement disproportionnés aux résultats attendus. La CGE est d'avis que cette technologie ne doit pas être abandonnée et qu'il convient de poursuivre les efforts de développement et de recherches pour parer à toute éventualité future. Le scénario IIIc propose la création d'ici l'an 2000 de deux centrales solaires expérimentales de la classe de 100 MW. Notre industrie d'exportation pourrait également en tirer profit.

4.4 *Le rôle de l'énergie du rayonnement solaire vu par la CGE*

Selon les scénarios, la CGE a épuisé jusqu'aux deux tiers des possibilités mentionnées pour la production d'eau chaude et jusqu'à un tiers pour le chauffage des locaux. Certaines personnes, qui ne portent aucune responsabilité en ce qui concerne leurs affirmations, estiment évidemment que c'est trop peu. Il y a pourtant au moins autant d'avis selon lesquels la CGE fait preuve ici d'un optimisme exagéré. Les chiffres absolus me paraissent toutefois moins importants que de reconnaître que seules de fortes subventions de l'Etat, alimentées par une taxe sur l'énergie, ou une hausse considérable des prix pétroliers — doublant au moins les prix payés par le consommateur — pourront donner les impulsions nécessaires à concrétiser les prévisions de la CGE. La figure 4 rend compte des différents scénarios. On y précise le nombre et la capacité des installations qui devraient être achevées d'ici l'an 2000 pour permettre à l'énergie de rayonnement solaire de tenir le rôle qui lui est attribué.

Malgré le nombre respectable de 400 000 installations, la production globale estimée à 4750 Tcal ne couvrirait annuellement que 2,3 % de l'ensemble des besoins énergétiques (3,1 % dans le scénario écologique IIId). Cela nous permettrait néanmoins — compte tenu des taux de rendement des chaudières — de remplacer 600 000 à 700 000 tonnes de mazout par année. Le rayonnement solaire à lui seul participerait pour environ 10 % au remplacement total du pétrole, un taux nullement négligeable en regard des 34 % pour le gaz naturel et 17 % pour l'électricité. Pour que le rayonnement solaire puisse fournir ces 4750 Tcal, il faudra installer 13 millions de m^2 de surfaces de captage. En comparant ce chiffre avec les quelque 30 000 m^2 installés à ce jour, on mesure le fantastique effort qu'il faudrait consentir (500 000 m^2 par année). L'investissement prévisible cumulé est estimé avec optimisme à 6,5 milliards de francs, dont 0,6 milliard pour les deux centrales à héliostats. Du point de vue de la politique énergétique, cet effort est d'ores et déjà justifié. Il le sera sur le plan économique lorsque le prix du mazout aura dépassé 100 francs par 100 kg, ce qui pourrait se produire prochainement. Voyons encore succintement ce qu'il en est des autres formes d'énergies renouvelables.

5. L'énergie hydraulique

Notre topographie nous a permis d'exploiter de tout temps l'énergie solaire amassée dans les chutes hydrauliques. Pour des raisons écologiques et économiques, ce potentiel est pratiquement épuisé. Dans une étude prudente [4], l'Association suisse pour l'aménagement des eaux estime que la rénovation d'anciens ouvrages et la construction de quelques nouvelles centrales permettront d'augmenter la production d'environ 10 % d'ici la fin du siècle. La CGE s'est basée sur cette étude. Ainsi, en l'an 2000, l'énergie hydraulique couvrira encore plus de la moitié de la production électrique. Sa part dans la couverture des besoins énergétiques globaux atteint 10,6 % dans le scénario II et 12,4 % dans le scénario IIIc.

[4] Document de la CGE n° 13.

6. Le bois

Au cours des décennies précédant 1940, le bois de chauffage couvrait de 10 à 20 % de la consommation énergétique globale (fig. 5). Après une pointe vers la fin de la seconde guerre mondiale, cette participation du bois tomba par vagues successives jusqu'au minable 1,2 % actuel. Dans certaines régions de montagne, il reste toutefois le combustible principal, puisque l'on chauffe aujourd'hui encore 150 000 logements au bois. Un stère (1 m^3) de bois sec équivaut à quelque 150 kg de mazout. Les statistiques officielles ignorent une quantité appréciable de déchets de bois industriels que l'industrie utilise elle-même pour en tirer de l'énergie.

L'inspectorat fédéral des eaux et forêts a informé la CGE avec force documents sur les possibilités d'accroître l'offre en bois de chauffage. Le rendement des forêts devrait être accru d'au moins 50 % et il conviendrait de recenser avec précision la biomasse produite par la forêt. La surface boisée devrait déborder sur les terres non exploitées par l'agriculture. L'utilisation des déchets de bois provenant de l'artisanat et de l'industrie pourrait être également intensifiée. A moins d'une extrême hausse des prix du pétrole, de telles mesures devront être soutenues financièrement par les cantons ou la Confédération.

Parallèlement, il s'agit d'assurer l'écoulement de ces déchets, ce qui implique des installations de combustion appropriées, aujourd'hui disponibles sur le marché. Il faudra aussi se demander si dans certains cas la production d'essence ou de gaz de bois ne serait pas plus appropriée que la combustion directe du bois.

Dans son scénario II, la CGE envisage une augmentation de la consommation de bois de 50 % d'ici l'an 2000, le scénario IIIc prévoyant même de tripler la consommation actuelle avec une production de 6000 Tcal, dont 500 Tcal sous forme de carburant. Compte tenu de l'utilisation des déchets par l'industrie, le bois fournirait à nouveau 3,5 % de la consommation énergétique globale. On atteindrait ainsi à peu près la limite des ressources exploitables à long terme. Quant à l'espoir de créer des plantations destinées à produire de la bioénergie, il relève, eu égard à notre climat et au manque de terres, de l'illusion.

7. La chaleur de l'environnement (pompes à chaleur)

Le potentiel utilisable des pompes à chaleur dépend des sources de chaleur disponibles. En ce qui concerne l'air ambiant, le taux de disponibilité atteint 100 %. Théoriquement, tous les immeubles du pays pourraient être chauffés de

FIGURE 4 : *Utilisation de l'énergie du rayonnement solaire selon le scénario IIIc de la CGE, en l'an 2000*

type d'installation	potentiel	réalisation			couverture en énergie utile
	nombre de logements appropriés	nombre de logements resp. d'installations	taux d'équipement du potentiel %	taux d'équipement des appart. construits %	Tcal
ménages privés					
production d'eau chaude					
immeubles construits (à partir de 1975)	400 000	200 000	50	10	1 200
nouveaux immeubles (dès 1975)	300 000	150 000	50	20	900
	700 000 [1]	350 000	50	13	
chauffage des locaux					
immeubles existants	400 000	65 000	16	3,5	200 [2]
nouveaux immeubles	300 000				
capteurs		75 000	50	20	800
technique passive		75 000			250
	700 000	215 000	31	8	
piscines					
privées		20 000			100
publiques		1 000			200
écoles, équipements sportifs, immeubles publics					400
industrie, artisanat service, agriculture					400
centrales solaires					300 [3]
total des installations solaires		400 000			4 750
(approx. en 1979)		(2 000)			(10)

[1] 26 % sur un total de 2,7 millions de logements construits (1,95 millions existants, 0,75 million nouveaux).
[2] En tant que chauffage d'appoint.
[3] Electricité, 2 × 100 MW.

Fig. 5. — Consommation de bois de chauffage en Suisse. (Source: Comité suisse de la Conférence mondiale de l'énergie).

cette manière, quoique à des conditions économiques inacceptables. Quant à l'utilisation des eaux (de surface et souterraines) ou de la chaleur du sol, le potentiel est estimé pour chacune d'elles à 10 %. Le recours à l'eau est toutefois limité par des considérations d'ordre écologique. Un secteur qu'il convient de ne pas négliger est celui des rejets de chaleur. En ce qui concerne l'entraînement des pompes, les impératifs de remplacement du pétrole exigent que l'on préfère toujours les pompes à entraînement électrique, ou éventuellement à gaz, aux pompes à moteur Diesel.

La CGE est convaincue que les pompes à chaleur connaîtront un grand développement à l'avenir. Elles pourraient chauffer 50 000 logements (2 %) en l'an 2000 (scénario II) ou même 135 000 (5 %) selon le scénario IIIc. C'est ainsi que la part de la chaleur de l'environnement dans la consommation énergétique globale s'élèverait à 0,4 %, respectivement à 1,2 %. En incluant les rejets de chaleur des centrales nucléaires et d'autres sources relevant du principe de la chaleur à distance dite froide (par exemple l'association de chauffage à distance Plenar), on pourrait encore augmenter ces possibilités d'utilisation. Dans ce but, la CGE a conçu un scénario spécial. La tendance prévisible est de combiner des systèmes de chauffage solaires avec des pompes à chaleur (toit solaire et capteurs installés sous les toits).

8. Les ordures ménagères

On ne transforme aujourd'hui en énergie que 45 % des 2 millions de tonnes d'ordures ménagères produites chaque année et l'on en tire 140 GWh de courant et 350 Tcal de chauffage à distance. Avec une population stable, cette quantité de déchets ne devrait guère augmenter à l'avenir. Le recyclage à d'autres fins d'une part des résidus (papier, verre) entraînera une réduction de la valeur calorifique des ordures. En revanche, on peut parfaitement réaliser des efforts pour augmenter la part des ordures transformées en énergie, notamment au niveau du couplage chaleur-force.

C'est ainsi que le scénario IIIc 2000 de la CGE, à partir d'une offre énergétique pratiquement équivalente, envisage une production nette de 120 GWh de courant électrique et de 1000 Tcal de chauffage à distance. On atteint ainsi déjà le potentiel de combustion des ordures des communes, soit près de 0,5 % des besoins énergétiques globaux. On peut y ajouter une certaine énergie issue d'ordures exploitées directement par les entreprises industrielles qui les produisent.

9. Le biogaz

Issu de la fermentation du fumier et du purin des animaux de ferme, le biogaz est une autre forme d'énergie renouvelable. La CGE a également confié l'étude de cette méthode de production à un bureau d'ingénieurs [5]. Le biogaz à forte teneur en méthane est à la fois un bon combustible pour le chauffage et un carburant pour moteurs. Avec les méthodes empiriques actuelles, une unité de gros bétail permet d'obtenir un équivalent énergétique annuel de 200 kg de mazout à partir de nourriture végétale. Les prix sont compétitifs. Le problème réside plutôt dans les investissements nécessaires et le travail supplémentaire qui en résulte pour l'agriculteur.

Comme la Suisse possède près de 2 millions de têtes de bétail et que l'on peut admettre que la majeure partie du fumier peut être exploitée, le potentiel de biogaz atteint 3000 Tcal d'énergie utile. L'amélioration des procédés de fermentation, de l'avis des spécialistes, permettrait de doubler ce potentiel, ce qui excéderait d'ores et déjà l'ensemble des besoins énergétiques de l'agriculture. Mais comme la mise en place de réseaux de distribution de biogaz ne serait guère rentable, son utilisation restera limitée à un usage décentralisé dans l'agriculture. Il faut en outre éviter des conflits économiques avec l'utilisation du bois de chauffage.

Eu égard à ces perspectives, la CGE estime la production possible du biogaz à 600 Tcal (scénario II 2000) ou à 1400 Tcal (IIIc). Dans le deuxième cas, il serait nécessaire d'affecter le tiers du cheptel bovin suisse à la production de biogaz.

10. L'énergie éolienne

En principe, les éoliennes produisent du courant électrique. Etant donné l'irrégularité des vents, cette méthode implique — comme pour l'énergie du rayonnement solaire — le recours à l'accumulation d'énergie, d'autant plus que la capacité varie selon la troisième puissance de la vitesse du vent.

En Suisse, le potentiel éolien utilisable n'est pas très élevé. La distance minimale d'une installation à l'autre doit atteindre au moins 30 fois le diamètre des éoliennes afin qu'elles ne se soustraient pas le vent les unes des autres. Si l'on recouvrait tout le pays d'éoliennes, celles-ci produiraient annuellement près de 15 milliards de kWh de courant (vitesse moyenne du vent 4-5 m/s, dimensionnement pour 8-10 m/s). Il faudrait installer une capacité de 6000 MW et le rendement à pleine charge serait inférieur à 30 %. Cette capacité théorique est indépendante de la taille des éoliennes, étant donné que la puissance et le nombre des installations varie en fonction du carré du diamètre.

Une telle éventualité est évidemment exclue dans nos régions. On peut toutefois envisager l'installation de petites unités dans des domaines et des fermes isolés dont l'approvisionnement électrique normal n'entre pas en ligne de compte. Elles présentent un certain intérêt pour des valeurs annuelles moyennes de la vitesse du vent de 5 m/s au minimum, valeurs que l'on ne trouve dans notre pays que dans les régions montagneuses.

Sans compter les frais d'accumulation (batteries), il en résulterait des coûts de production de 10 à 15 centimes par kWh. Il ne faut pas oublier non plus que l'énergie éolienne permet de chauffer des locaux, étant donné que le vent, contrairement au rayonnement solaire, souffle également la nuit et par mauvais temps. Là où l'atteinte au paysage est admissible, il y a lieu de se demander si l'installation d'une éolienne n'est pas plus judicieuse que le montage d'une unité de chauffage solaire.

Tenant compte de l'énergie éolienne, la CGE, dans son scénario IIIc 2000, lui attribue une capacité de 100 Tcal (116 GWh). Etant donné que cette puissance équivaut à l'installation de 800 roues de 20 mètres d'envergure (ou 8000 roues à 6 m), cet apport énergétique marginal est d'ores et déjà à la limite du possible.

11. La géothermie

La CGE a fondé ses estimations sur les indications de la « Commission fédérale pour l'utilisation de l'énergie géothermique et le stockage souterrain de chaleur ». Elle disposait en outre d'une étude d'un bureau d'ingénieurs sur les possibilités de la région Zurzach-Lostorf-Baden [6]. En Suisse, on entend pour l'instant par géothermie les gisements d'eau chaude dans les couches poreuses de la molasse supérieure du Plateau. Ils atteignent une température de 40 à 50°C à 1000 mètres de profondeur, de 70°C à 2000 mètres. Un double forage (flux dans les deux sens) fournit de 15 à 25 Tcal par année sous réserve d'une exploitation intensive de la chaleur à l'aide de pompes. Cette quantité permettrait de couvrir les besoins de base en chaleur de près de 1500 unités d'habitat. La distribution de chaleur devrait être assurée par des réseaux de chauffage à distance. Face à la tendance actuelle des prix du mazout, le coût d'un tel système serait relativement compétitif. Le potentiel de régénération assuré par le flux de chaleur provenant des profondeurs de la terre est décevant. Il équivaut par exemple dans le Nord-Est de la Suisse à seulement 5 % du mazout consommé dans cette région. Il serait toutefois possible, pendant quelques décen-

[5] Document de la CGE n° 17.

[6] Publication de la CGE n° 14.

nies, de prélever temporairement dix fois plus d'énergie du sous-sol.
A partir de ces données, la CGE prévoit dans son scénario IIIc 2000 une première série de 100 doubles forages, ce qui porterait la part de la géothermie à 0,8 % (1500 Tcal). D'ici là, d'importants travaux d'exploration devraient être réalisés à l'aide de fonds destinés à la recherche.

12. Conclusion

Avant de conclure, je voudrais évoquer une autre source d'énergie renouvelable, *les économies*, tant il est vrai que les effets des économies effectives — ou de l'amélioration des taux de rendement — ne s'épuisent jamais. Si nous n'en avons pas parlé jusqu'ici, bien que leur importance dépasse à moyen terme celle de toutes les autres mesures, c'est parce qu'elles n'ont aucun rapport avec le soleil. Elles sont le fruit d'une prise de conscience de chacun de nous.
Si l'on considère l'énergie solaire dans son sens le plus large, telle qu'elle est stipulée par la majorité de la commission de la CGE dans le scénario IIIc, les tâches suivantes devraient être réalisées d'ici l'an 2000 :

— 12 millions de m^2 de capteurs solaires ou une technologie solaire équivalente avec l'équipement nécessaire à la production de chaleur ;
— 1 million de m^2 d'héliostats avec des équipements de centrales de production d'énergie ;
— augmentation de la capacité hydraulique de 10 % (dès 1979) ;
— tripler l'offre et l'utilisation du bois de chauffage ;
— chauffage par pompe à chaleur pour 5 % de l'habitat ;
— augmenter de deux fois et demie la production d'énergie par la combustion des ordures ménagères ;
— un tiers du cheptel bovin affecté à la production de biogaz ;
— 8000 éoliennes de 6 mètres de diamètre (par exemple) ;
— 100 doubleurs de captage d'énergie géothermique, avec réseaux de distribution de chaleur correspondante.

Ce vaste programme, dont la réalisation augmenterait la part des énergies indigènes à 20-25 % des besoins globaux, exigera un investissement de quelque 20 milliards de francs. Pour mettre en route ce projet, la CGE propose d'avancer 3 milliards de subventions prélevés sur un *impôt énergétique* et 500 millions de francs issus des fonds publics de la recherche.
Eu égard au formidable effort qu'elle préconise dans ce secteur, il est absurde de prétendre, comme le font certains, que la CGE a volontairement négligé l'énergie solaire, ou qu'elle l'a gravement sous-estimée. Je pense au contraire que le soleil a souvent éclairé de toute sa puissance les séances de la CGE...
L'économie énergétique s'efforce pour sa part d'aider le solaire à sortir de l'ornière. Preuve en sont les 17 projets soutenus financièrement dans un premier temps par le Fonds national pour la recherche énergétique, dont la majorité concerne les énergies renouvelables, avec cinq projets consacrés à la seule énergie solaire.
Nous avons mentionné plusieurs fois la rentabilité qui constitue actuellement le principal obstacle à une extension rapide de l'énergie solaire. Mais le fait que nous entrons dans une ère de pénurie des matières premières énergétiques fait progressivement passer ce problème de rentabilité au second plan. L'envol des prix consécutif à cette raréfaction ne permet plus de procéder à des comparaisons avec les nouvelles formes d'énergie. On peut également illustrer cette démonstration de la façon suivante : Alors que l'homme a remplacé jusqu'ici sa capacité de travail par de l'énergie, il doit désormais s'habituer à substituer des capitaux à l'énergie, comme c'est déjà le cas pour l'énergie hydraulique, même dans le secteur de la production de chaleur. Ce faisant, nous profitons au moins du fait que pour un investissement unique, le capital engagé l'est dans des conditions beaucoup plus stables que ne le sont les prix des combustibles classiques en voie d'épuisement. Le remplacement par des capitaux conduit inévitablement aux économies forcées, car les capitaux ne peuvent être simplement pêchés dans des puits de pétrole, mais doivent être acquis par le travail. A son tour, ce travail exige de l'énergie. C'est pourquoi il est actuellement parfaitement vain de prétendre qu'une croissance mesurée de la production d'énergie, voire de l'économie en général, n'est plus nécessaire. L'autre terme de l'alternative ne peut être ici que l'appauvrissement.
Revenons, pour conclure, à l'énergie solaire. J'ai lu récemment une définition malicieuse affirmant que le succès est l'art de préférer le rentable au raisonnable. Je voudrais au contraire apprécier l'énergie solaire en souhaitant comme vous tous qu'elle soit l'art de préférer le raisonnable de demain à la rentabilité d'aujourd'hui.

Adresse de l'auteur :
Robert Hohl, ingénieur EPF
Brown, Boveri et Cie SA
5400 Baden

Bibliographie

Résistance des matériaux et structures

par *S. Laroze*. — 1 vol. 16× 24 cm, 272 pages, Edit. Masson, Paris 1979.

Dans un grand nombre de constructions, on doit tenir compte, en concevant la structure, des contraintes et déformations qui s'ajoutent à celles d'origine statique, soit du fait des vibrations pouvant agiter la structure, soit du fait d'un échauffement de celle-ci.
Les tomes I et II ont pour objet l'étude des structures dans le cas statique et isotherme. Ils traitent ainsi des bases théoriques et expérimentales de la résistance des matériaux et proposent des méthodes de résolution adaptées aux différents types de structures (tridimensionnelles, poutres, plaques, coques).
Le tome III s'appuie sur les résultats et méthodes développés dans les tomes précédents, qu'il prolonge donc, avec deux parties tout à fait indépendantes, correspondant aux deux sous-titres de l'ouvrage :

— D'une part : Dynamique des structures.
— D'autre part : Contraintes et déformations d'origine thermique.

Le première partie : Dynamique des structures, présente tout d'abord, sur les systèmes à 1, 2 ou *n* degrés de liberté, les concepts importants de la mécanique vibratoire : mouvements périodiques et apériodiques, coefficients de masse, amortissement, raideur, forces excitatrices, réponses de la structure, systèmes dissipatifs et conservatifs, libres ou excités, modes propres et fréquences propres, analyse harmonique, couplage. Elle aborde ensuite les milieux continus solides pour établir les lois de la visco-élasticité linéaire et étudier la propagation des ondes dans de tels milieux. Enfin, elle applique les résultats obtenus, aux trois éléments de structure couramment utilisés : la poutre, la plaque, la coque, définissant géométriquement ces éléments, établissant les équations de leurs mouvements puis résolvant quelques problèmes-types.
La deuxième partie : Contraintes et déformations d'origine thermique, rappelle d'abord les résultats essentiels concernant les contraintes, déformations, lois de comportement au sein d'un solide. Dans le but de déterminer le champ de température dans la structure, on s'intéresse ensuite aux problèmes de thermique dans les solides, en particulier à celui de la conduction de chaleur et des échanges aux frontières par convection ou rayonnement. La méthode générale de calcul des contraintes et déformations, sous un chargement à la fois mécanique et thermique, est alors exposée. Enfin, on développe les méthodes pratiques de calcul dans le cas des éléments de structure déjà rencontrés : poutres, plaques, coques.

Sommaire :

Première partie. Dynamique des structures :
I. Systèmes à un degré de liberté. — II. Systèmes à deux degrés de liberté. — III. Systèmes à n *degrés de liberté. — IV. Dynamique des milieux continus solides. — V. Dynamique des poutres. — VI. Dynamique des plaques. — VII. Dynamique des coques.*
Seconde partie. Lois thermiques :
VIII. Contraintes et déformations d'origine thermique.