

Quelques perspectives d'exploitation de l'énergie solaire, notamment en Suisse

Autor(en): **Courvoisier, Jean-Claude**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **101 (1975)**

Heft 11

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-72556>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Quelques perspectives d'exploitation de l'énergie solaire, notamment en Suisse

par JEAN-CLAUDE COURVOISIER, Genève

L'approvisionnement en électricité de notre pays n'est pas assuré, même si l'hiver exceptionnellement doux que nous avons vécu a pu le faire oublier. Dans l'état actuel de la technique, il n'est possible d'améliorer cette situation critique qu'en recourant aux centrales nucléaires, la construction de nouvelles centrales thermiques pouvant être exclue. On sait l'inquiétude, voire l'opposition acharnée sinon toujours bien fondée que suscite l'énergie nucléaire appliquée à la production d'électricité. Dans ce contexte, l'énergie solaire est souvent citée pour présenter une alternative. Elle semble vraiment une panacée, puisqu'inépuisable et non polluante.

Si le principe en est infiniment séduisant, il nous paraît malhonnête de répandre ou entretenir l'illusion que tous les problèmes d'approvisionnement peuvent être résolus par l'exploitation généralisée de l'énergie solaire. Son application au chauffage de l'eau ou des immeubles s'impose à l'esprit, parce qu'elle fait appel à une technologie relativement simple. La production d'électricité sous une forme directement utilisable par des appareils ménagers ou industriels, qui entrent pour une part importante dans la consommation globale d'énergie, met en œuvre des moyens plus complexes et soulève la question du prix de revient, qui doit rester compétitif. Nous ne parlerons pas des projets faisant

appel à des techniques aussi ruineuses que l'aérospatiale : satellites, par exemple.

Un autre paramètre, trop rarement chiffré lorsque sont mises en parallèle ou en compétition les différentes sources d'énergie, est la puissance moyenne disponible, soit globalement ou dans une région donnée. Les journées d'études sur les sources non conventionnelles d'énergie organisées en octobre dernier à l'EPFL (voir Bulletin technique de la Suisse romande n° 24 du 21.11.1974, p. 476 et suivantes) ont eu entre autre le mérite d'obliger les conférenciers de chiffrer les possibilités des formes d'énergie qu'ils présentaient. On pressent que l'énergie solaire ne peut constituer qu'un appoint dans notre pays, mais on aimerait bien savoir quelle portée pratique elle pourrait avoir. L'article qui suit répond à cette question, en fournissant des chiffres basés sur des statistiques inattaquables. Son auteur n'est pas un prophète qui va répandant la doctrine comme certains prédicateurs fougueux et confus de la croisade de l'environnement, mais un spécialiste, qui a abordé le problème de l'énergie solaire sous un angle scientifique et objectif. Ses développements et ses conclusions doivent donc être pris au sérieux et constituent une base pour toute étude sur l'exploitation systématique de l'énergie solaire en Suisse.

(Réd.)

Introduction

Nous le savons tous plus ou moins clairement, la vie végétale, animale ou humaine ne serait pas possible sans le soleil. Les cycles biologiques reçoivent leur énergie du soleil, au moyen de mécanismes compliqués telle la photosynthèse. Nous bénéficions actuellement de cycles biologiques qui ont eu lieu il y a des centaines de millions d'années, lorsque nous exploitons les combustibles fossiles tels que le pétrole ou le charbon. Le problème dont nous nous occupons ici est donc non pas relatif à l'exploitation de l'énergie solaire en général (celle-ci est réalisée par la nature à notre profit depuis toujours) mais bien plutôt d'examiner quel rôle pourrait jouer cette source d'énergie dans la satisfaction de nos besoins en tant que société industrielle. Il s'agit d'évaluer la part que pourrait prendre le soleil dans la fourniture d'énergie future en regard de celle qui est prise par l'énergie fossile ou nucléaire.

Commençons par analyser ce que fournit le soleil.

L'énergie fournie par le soleil juste en dehors de l'atmosphère est de 1,35 kW/m². Cette valeur varie de $\pm 3,4\%$ avec la distance terre-soleil, qui est la plus courte en hiver (dans notre hémisphère) et la plus longue en été.

La figure 1 montre la répartition spectrale de l'énergie solaire et, en particulier, le rôle de l'atmosphère dans l'atténuation de l'énergie au sol [1]¹.

La densité du flux solaire au sol par m² perpendiculaire aux rayons incidents en moyenne sur le globe terrestre est de 1 kW/m² environ. L'atmosphère sans nuages absorbe ou rejette dans l'espace sous forme de rétrodiffusion 25 % de l'énergie incidente. Du 1 kW/m², par ciel clair, 80 % viennent directement du soleil et 20 % viennent de chaque

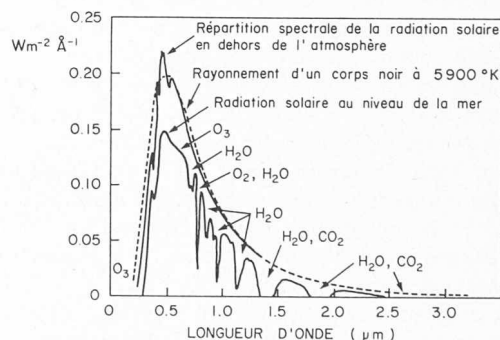


Fig. 1. — Spectre solaire en dehors de l'atmosphère et à la surface de la terre.

point du ciel sous forme de lumière diffuse. De l'énergie qui arrive à la surface de la terre, une partie a été absorbée ou diffusée par l'atmosphère qui n'est pas transparente pour toutes les longueurs d'ondes du spectre. Le spectre solaire s'étend de 300 à 2500 nm (0,3 à 2,5 μ). La sensibilité de l'œil s'étend de 400 à 700 nm (0,4 à 0,7 μ); cette plage (visible) couvre sensiblement la moitié de l'énergie irradiée.

Une partie de l'énergie incidente du soleil est interceptée par les nuages qui en réfléchissent vers l'extérieur entre 50 et 80 %. Comme, en moyenne, la moitié de la terre est couverte de nuages, on peut estimer la quantité totale d'énergie qui arrive sur terre :

$$S = \pi \cdot (6 \cdot 10^6)^2 \cong 10^{14} \text{ m}^2 \\ 1,35 \text{ kW/m}^2, 50 \% \text{ nuages}$$

¹ Les chiffres entre crochets renvoient aux références en fin d'article.

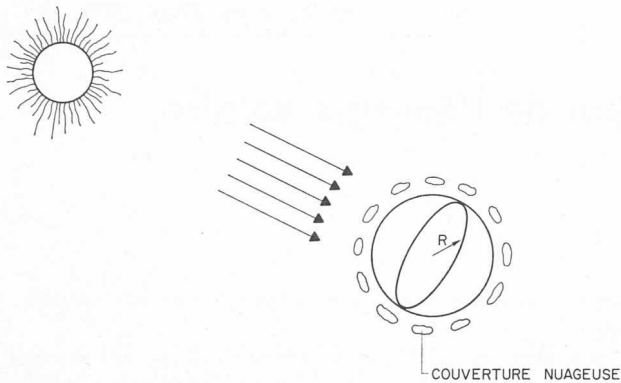


Fig. 2. — Energie solaire totale arrivant sur terre.

$$P = 0,7 \cdot 10^{14} \text{ kW}$$

$$E = 0,7 \cdot 24 \cdot 10^{14} = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ kWh/jour}$$

ou encore $5 \cdot 10^{17} \text{ kWh/année}$.

Cette valeur est à comparer avec la consommation mondiale d'énergie qui a été de $2 \cdot 10^{13} \text{ kWh}$ en 1969 [2].

Trois types de fluctuation affectent la réception de l'énergie solaire : les variations saisonnières, les variations quotidiennes qui sont toutes deux périodiques et enfin les variations aléatoires météorologiques.

Des considérations qui précèdent, on peut déjà déduire quelles sont les contraintes qui vont se retrouver tout au long de la réflexion consacrée à l'exploitation de l'énergie solaire. Elles sont deux : la nécessité d'utiliser des grandes surfaces, car la densité superficielle d'énergie est relativement faible, et la nécessité de coupler avec le système de transformation un élément de stockage.

L'énergie solaire est déjà exploitée en tenant compte de ces deux contraintes selon deux voies très différentes. La première, la plus ancienne, est évidemment l'agriculture. La grande surface est celle des champs cultivés qui est encore augmentée par la dispersion des feuilles. Le stockage est obtenu sous forme chimique ; la stabilité des produits de la conversion photochimique, c'est-à-dire la durée de stockage, varie de quelques jours (fruits mûrs) à quelques centaines d'années (arbres) pour les produits non transformés, ou beaucoup plus encore pour certains produits fossilisés, tels le charbon ou le pétrole. On peut évaluer le rendement de transformation de l'énergie solaire en énergie chimique par photosynthèse végétale, et l'on arrive à un ordre de grandeur de 0,05 à 0,1 % ; dans des cas extrêmes, ce rendement peut être de 0,5 %. On ne tient pas compte, dans ces chiffres, de l'énergie dépensée pour amé-

nager le sol (labourage, etc.), ni de celle qui est dépensée pour récolter les produits du sol et pour fabriquer et répandre les engrais.

La seconde forme d'exploitation de l'énergie solaire est l'hydro-électricité. La surface est plus difficile à définir que dans le cas précédent, car il y a une surface d'évaporation, là où l'énergie solaire est réellement transformée, et une surface de collection qui est le bassin orographique de la rivière ou du lac artificiel. Le stockage peut être naturel (glacier, lac), ou artificiel, (barrage). Il est très difficile d'estimer le rendement de transformation de l'énergie solaire dans ce cas, mais on peut assurer qu'il est extrêmement faible, et n'est exploitable que parce que la surface de collection du soleil (océan) est si grande.

Comme on peut facilement l'imaginer, le sujet de l'exploitation de l'énergie solaire est très vaste. Nous nous sommes efforcé d'envisager les possibilités qui nous ont paru les plus réalistes actuellement. Les réalisations pratiques sont encore très peu nombreuses, si bien qu'il est prématuré de conclure définitivement si oui ou non l'énergie solaire jouera dans l'avenir un rôle majeur dans l'économie énergétique du monde et de notre pays. Nous essayons dans la suite de dégager certains éléments de jugement.

Cet article est délibérément limité à trois chapitres traitant de l'exploitation de l'énergie solaire pour le chauffage domestique, de la production directe d'électricité au moyen de photopiles et enfin de production d'énergie à grande échelle. Nous avons dû effectuer un choix, car la matière est très abondante, et chacun de ces chapitres pourrait bien à lui seul fournir la matière à un ou plusieurs articles.

Les deux contraintes évoquées plus haut (grande surface et stockage) sont présentes tout au long de cette étude. Elles ont évidemment une répercussion directe sur le prix des systèmes envisagés. Nous n'avons pas pu faire du prix un paramètre essentiel permettant de trancher la question de savoir si un système vaut la peine d'être envisagé ou doit être rejeté. En effet, le prix absolu ne signifie rien. Il doit être comparé au prix d'autres sources d'énergie. Actuellement, nous nous trouvons dans une situation où les fluctuations sont telles, et imprévisibles de surcroît, qu'il nous paraît plus sûr de bien décrire le niveau technique, étant entendu que des travaux très importants dans certains domaines (photopiles, trappes à chaleur) sont encore nécessaires pour que des solutions satisfaisantes puissent être développées.

Pour clore cette introduction, nous voulons exprimer notre conviction qu'il y a encore un très grand nombre d'inventions à faire dans le domaine de l'exploitation de l'énergie solaire qui, peu à peu, permettront d'optimiser

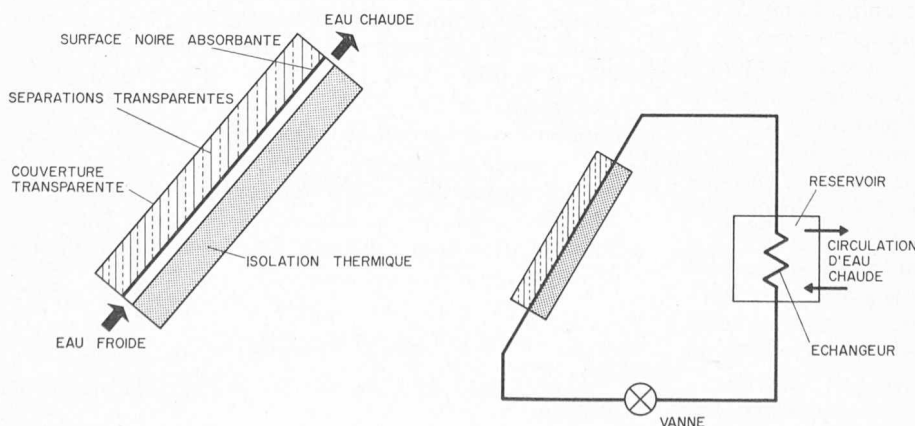


Fig. 3. — Système de principe de collection de l'énergie solaire pour le chauffage domestique.

les lignes à suivre pour une exploitation rationnelle de cette source d'énergie.

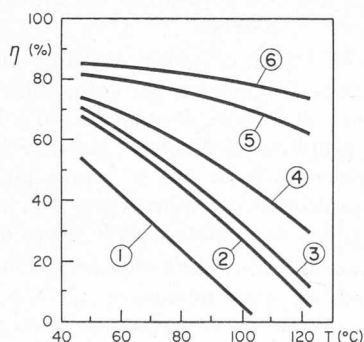
Chauffage domestique

L'exploitation de l'énergie solaire au niveau domestique consiste en captage de l'énergie incidente à basse température. En effet, le moyen le plus simple et le plus nécessaire à ce niveau est la chaleur pour le chauffage domestique et l'eau chaude.

Beaucoup de systèmes sont étudiés, en Italie, en France, aux USA, en Australie, au Japon, en Israël, etc. Le principe est sensiblement le même partout : une surface absorbante convertit le rayonnement solaire en chaleur qui est utilisée pour chauffer de l'eau. Le problème consiste à optimiser le système afin de réduire les pertes au minimum, tout en réduisant également le prix de l'installation au niveau le plus bas possible. Un réservoir d'eau presque dans tous les cas est utilisé pour le stockage de l'énergie.

La figure 3 schématise un collecteur solaire typique. Les pertes par conduction et convection vers l'arrière peuvent être très efficacement limitées par des moyens bon marché conventionnels. Les pertes vers le haut sont dues à la convection et au rayonnement.

La figure 4 [3] montre l'influence du traitement de surface du collecteur et celle de la réduction de la convection entre la surface absorbante et la surface du collecteur sur



- ① Surface non sélective, pression atmosphérique
- ② Surface non sélective, pression réduite
- ③ Surface non sélective, vide
- ④ Surface sélective, pression atmosphérique
- ⑤ Surface sélective, pression réduite
- ⑥ Surface sélective, vide

(d'après H.A. Blum et al)

Fig. 4. — Influence de la convection et du rayonnement sur le rendement d'un collecteur solaire.

le rendement de transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Le traitement de la surface du collecteur consiste en un revêtement par une couche absorbante dans toute l'étendue du spectre solaire et à faible émissivité dans l'infrarouge thermique. Des matériaux tels que l'oxyde de cuivre ont des propriétés qui s'approchent de près à la caractéristique recherchée. La méthode de suppression de la convection à laquelle la figure 4 fait référence consiste à faire le vide entre la surface absorbante et le vitrage. Ce procédé est cher et peu pratique, pour des raisons évidentes. Un cloisonnement de cet espace par des séparations transparentes (matière plastique ou verre) a sensiblement le même effet pour des contraintes technologiques bien moindres.

Le collecteur est couplé à un réservoir, la circulation d'eau est interrompue pendant la nuit ou lorsque le ciel est couvert. Il est intéressant de relever une conception assez fondamentalement différente de chauffage domestique et qui est due au professeur Trombe [4], directeur du Laboratoire de l'énergie solaire du CNRS en France. Dans cette réalisation, on fait appel à l'effet de serre bien connu pour chauffer la façade de l'habitation et créer une circulation climatisante. Le mur lui-même sert de réservoir de chaleur pour la nuit. La fermeture du canal d'entrée de l'air chaud sous le toit et son évacuation vers l'extérieur, couplée à une ouverture d'aspiration dans la façade nord, permet de réaliser un certain refroidissement ou plutôt rafraîchissement de la maison.

Il y a encore certainement beaucoup d'inventions possibles dans ce domaine, qui n'apparaîtront que si le combustible classique reste à un prix élevé et là où les conditions météorologiques moyennes le justifient.

L'analyse qui suit vise à estimer l'usage que l'on peut espérer faire des ressources en soleil dans une région du Plateau suisse telle que Genève. Lausanne a très sensiblement le même climat, alors que Zurich bénéficie d'un ensoleillement en moyenne 10 % inférieur et que Berne se situe à mi-chemin environ entre ces deux valeurs.

L'insolation moyenne mensuelle à Genève est donnée à la première ligne du tableau I.

Par souci de réalisme, on évalue l'économie d'huile de chauffage que l'on réaliserait en équipant une villa, consommant 3 m³ de mazout par an pour son chauffage (à l'exclusion de l'eau chaude), de 50 m² de collecteur solaire. L'énergie récoltée sur une surface dont la normale ne fait pas un angle supérieur à 20° avec la direction des rayons incidents du soleil est $E_0 = 7 \text{ kWh/m}^2$ jour en hiver environ. Cette valeur varie peu (maximum 15 %) entre le solstice d'hiver et l'équinoxe. L'énergie récoltée par une

| Mois | Janv. | Févr. | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | août | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. | Total |
|--|-------|-------|------|-------|------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|------|------|------|-------|
| N_H | 54 | 98 | 167 | 204 | 236 | 261 | 287 | 257 | 189 | 123 | 61 | 42 | 1'979 |
| N_{th} | 280 | 290 | 367 | 405 | 461 | 470 | 472 | 435 | 375 | 337 | 283 | 269 | 4'444 |
| $\frac{N_H \cdot N_{th}^{-1}}{N_{th}}$ | 6 | 9.5 | 14 | 15.1 | 15.8 | 16.6 | 18.9 | 18.3 | 15.1 | 11.3 | 6.5 | 4.8 | |
| $E_{equ.}$ | 170 | 270 | 390 | 425 | 440 | (465) [±] | (530) [±] | (510) [±] | 420 | 320 | 180 | 135 | |
| T_a | 0.2 | 1.1 | 4.9 | 8.7 | 13.1 | 16.5 | 18.3 | 17.6 | 14.3 | 9.1 | 4.5 | 1.5 | |
| ΔT | 14.8 | 14 | 10 | 6.3 | 2 | - | - | - | 0.7 | 7 | 10.5 | 14.5 | |
| $(\Delta T)^{1.5}$ | 59 | 52.5 | 32 | 15.8 | 2.8 | - | - | - | 1.8 | 18.5 | 33.5 | 55 | |
| E_{mazout} | 660 | 590 | 360 | 177 | 31 | - | - | - | 20 | 210 | 375 | 620 | |
| ΔE_{mazout} | 170 | 270 | 360 | 177 | 31 | - | - | - | 20 | 210 | 180 | 135 | 1'553 |

± : N_j = nombre de jours du mois ± : () = chiffres concernant les mois où l'on ne chauffe pas

TABLEAU I

- N_H = heures de soleil [5]
- N_{th} = heures de soleil théoriques [6]
- E_{equ} = équivalent en litres de mazout
- T_a = température ambiante moyenne [°C] [5]
- ΔT = $15 - T_a$ [°C]
- E_{mazout} = consommation de mazout [l]
- ΔE_{mazout} = économie de mazout [l]

surface $S = 50 \text{ m}^2$ avec un rendement $\eta = 80 \%$ est la suivante :

$$E \text{ [kWh]} = S \cdot \frac{N_H N_j}{N_{th}} \eta \cdot E_o = 280 \frac{N_H N_j}{N_{th}}$$

$$E \text{ (équivalent mazout) [l]} = \frac{E \text{ [kWh]}}{10}$$

Les valeurs de $\frac{N_H N_j}{N_{th}}$ et E (équivalent mazout) sont portées aux lignes 3 et 4 du tableau.

Les besoins en énergie de chauffage exprimés en litres de mazout dépendent évidemment de la température ambiante. La valeur moyenne mensuelle de cette dernière figure à la cinquième ligne du tableau. On remarque tout d'abord que la température ambiante moyenne ne dépasse pas 19°C , alors que les habitations ont sûrement une température supérieure à plusieurs époques de l'année. Cela provient du fait que le soleil chauffe les maisons, dont les murs forment un réservoir de chaleur. Par expérience, on ne chauffe pratiquement jamais les habitations à Genève en juin, en juillet et en août.

La quantité de mazout nécessaire au chauffage est une fonction de la différence entre une température moyenne de l'ordre de celle du mois de juin et la température ambiante moyenne T_a . Par hypothèse, nous fixons cette température de référence $T_o = 15^\circ \text{C}$, et nous approximations la fonction de la façon suivante :

$$E = C \cdot (T_o - T_a)^{1,5}$$

Nous avons fixé par hypothèse qu'une habitation type consomme en moyenne 3000 l de mazout par an pour son chauffage. On peut alors calculer C :

$$E_{\text{mensuel}} = C (\overline{\Delta T})_{\text{mensuel}}^{1,5}$$

$$E_{\text{annuel}} = C \sum_{\text{mois de chauffage}} (\overline{\Delta T})_{\text{mensuel}}^{1,5}$$

$$C \left[\frac{l}{(^\circ\text{C})^{1,5}} \right] = \frac{E_{\text{annuel}}}{\sum_{\text{mois de chauffage}} (\overline{\Delta T})_{\text{mensuel}}^{1,5}} = 11,2$$

$\Delta T = (T_o - T_a)$ figure à la ligne 6 du tableau et $(\Delta T)^{1,5}$ est porté à la ligne 7.

La consommation mensuelle d'huile de chauffage estimée de cette manière est reportée à la ligne 8 du tableau. La figure 5 représente de façon graphique ces diverses données. La surface hachurée montre l'économie de combustible réalisée par l'installation d'un collecteur solaire de 50 m^2 pour une maison dont la consommation annuelle est 3000 l de mazout pour le chauffage uniquement (l'eau chaude n'est pas prise en considération dans cette évaluation). L'économie d'huile de chauffage ΔE_{mazout} figure à la dernière ligne du tableau. Elle se monte au total à 1553 l, soit le 50 % de la consommation annuelle !

Il faut remarquer que, pour les mois d'avril, mai, septembre et octobre, l'économie n'est que la quantité de mazout brûlé, et non pas l'énergie solaire disponible, puisque nous avons exclu un stockage d'une durée appréciable. En revanche, durant les mois d'hiver, chaque rayon de soleil représente une économie puisque la chaleur récupérée est en moyenne bien inférieure à celle qui est nécessaire pour maintenir la température désirée dans la maison.

L'analyse qui précède n'est évidemment qu'une approximation destinée à évaluer l'ordre de grandeur de l'économie de combustible réalisable à Genève * en moyenne. Trois

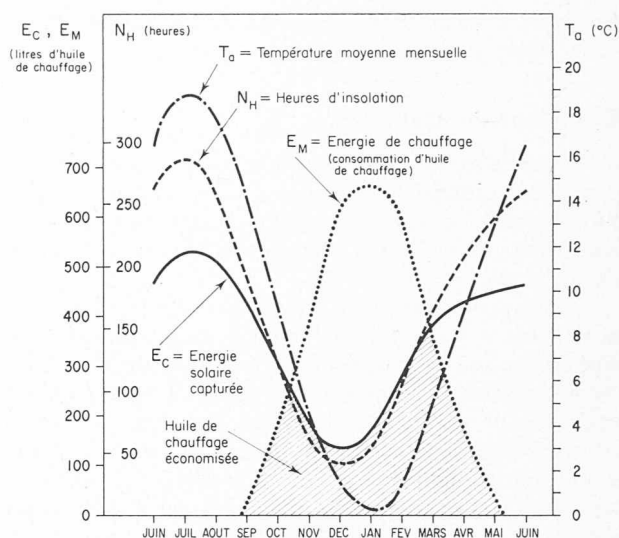


Fig. 5. — Données climatiques pour la région de Genève et économie d'huile de chauffage théoriquement possible.

éléments jouent un rôle pour abaisser la performance estimée du système :

1. Le rendement de 80 % est réalisable pourvu que l'isolation thermique du collecteur (conduction, radiation, convection) soit très soignée, ce qui évidemment augmente le prix du système.
2. La valeur de $7 \text{ kWh/m}^2\text{-jour-complet-de-soleil}$ ne tient pas compte de l'absorption par l'atmosphère, qui peut dans certains cas réduire ce chiffre de 20 à 30 %. Cette réduction peut être partiellement compensée par le fait que la lumière diffusée par la brume est un apport d'énergie captée par le système, alors que les heures ne sont pas prises en compte dans le temps d'insolation.
3. Le fait que nous ayons par hypothèse réduit la capacité de stockage au strict minimum (12-24 h.) fait que, pour les périodes où l'insolation moyenne est égale ou supérieure au chauffage nécessaire (printemps, automne), le soleil peut briller sans que l'on soit en mesure d'en valoriser l'énergie. Cela apparaît très naturellement si l'on imagine une semaine de mauvais temps précédée d'une semaine de soleil. Durant la semaine de mauvais temps, le chauffage est nécessaire alors que, durant la semaine précédente, on avait reçu trop de soleil pour les besoins du moment mais qu'on n'avait pas pu l'accumuler en prévision de circonstances moins favorables à venir.

Compte tenu de ces trois remarques importantes, il est plus vraisemblable d'estimer que l'on peut économiser environ 30 % du combustible à Genève plutôt que les 50 % que le calcul simplifié suggère.

Le problème du stockage doit être envisagé à la lumière des considérations qui précèdent. Si l'on veut réaliser un chauffage solaire partiel à partir des technologies existantes actuellement, on est contraint de considérer exclusivement un stockage sous forme d'eau chaude. Pour une température de fonctionnement du chauffage de 60°C , on peut stocker l'eau chaude à 90°C , soit un ΔT utile de 30°C . La quantité d'eau chaude nécessaire à stocker l'énergie fournie par le soleil durant un jour sans nuages et récoltée par 50 m^2 de collecteur dans les conditions décrites plus

* Une analyse analogue est faite par T. Ginsburg et alii [7] pour Zurich, qui arrivent à des conclusions très proches de celles-ci.

haut est de 9 m³ environ. La durée de stockage est évidemment fonction de la qualité de l'isolation thermique du système.

Tant que le soleil donne plus d'énergie que l'on consommerait de combustible si l'on n'avait pas de collecteur, une capacité de stockage de 1 jour de soleil réduit évidemment l'économie possible. Cela est valable pour mars, avril, mai, septembre et octobre, dont la consommation totale représente environ 800 l de mazout. En avril, mai et septembre, il y a beaucoup plus de soleil que l'on n'a besoin de chauffage. L'influence des fluctuations sera donc de peu d'importance et l'économie sera bien celle qui est calculée malgré une capacité de stockage très réduite. En hiver, le rapport entre la consommation de mazout et le soleil disponible est inverse ; en conséquence, de nouveau toute l'énergie solaire est une économie nette de combustible. Ce n'est qu'en mars et en octobre que l'effet d'une faible capacité de stockage sera sensible. On peut l'estimer grossièrement en évaluant la perte d'économie à 40 % de l'économie théorique, soit environ 300 l de mazout au maximum. Un réservoir d'eau chaude à 90°C bien isolé thermiquement et d'une capacité de 10 m³ est déjà un investissement non négligeable dans une maison particulière. Pour réduire ce défaut d'économie égal à 300 l d'huile de chauffage substantiellement, il faudrait une capacité de stockage de 1 semaine environ, soit 60 m³. Les dimensions et le prix d'un tel réservoir ne sont pas rentables en regard de l'économie réalisée (~ 150.— fr./an).

En conséquence, si l'on vise une performance énergétique supérieure, le problème de stockage doit être considéré au niveau de la recherche appliquée, afin de trouver des solutions permettant sous un volume restreint de conserver des quantités importantes d'énergie thermique à basse température dans des conditions financières compatibles avec l'économie d'énergie recherchée. En effet, une estimation analogue à celle qui précède montre que si l'on savait stocker suffisamment d'énergie durant un temps assez long (6 mois au moins), l'énergie solaire totale reçue par les 50 m² de collecteur équipant une maison consommant en moyenne 3000 l de mazout serait largement suffisante pour tout le chauffage annuel.

Comme on l'a vu plus haut, le volume nécessaire au stockage de la chaleur à basse température est considérable comparé au volume de mazout équivalent : 35 l de mazout (équivalent à 50 m² · 7 kWh/m²) comparés à 9000 l d'eau (pour un ΔT de 30°C). Il est donc probablement nécessaire d'orienter les recherches de solutions nouvelles vers des substances chimiques susceptibles d'emmagasiner un beaucoup plus grande quantité d'énergie par unité de volume que l'eau chaude.

Conversion directe par cellules photo-électriques

L'énergie rayonnée par le soleil peut être captée et transformée de telle sorte qu'elle soit directement utilisable par une voie autre que celle qui consiste à chauffer de l'eau ou un fluide quelconque. Cette voie consiste à exploiter le caractère quantique du rayonnement électromagnétique solaire, visible et infrarouge, pour exciter des charges électriques, les séparer en charges positives et négatives, et les forcer à fournir du travail dans un circuit extérieur avant de se recombiner. Ce processus a été découvert au début de ce siècle et a été largement utilisé dans les cellules photo-électriques qui ont servi à l'étude du rayonnement électromagnétique. A cette époque, les deux électrodes : une réceptrice de lumière et émettrice d'électrons et une collectrice d'électrons étaient placées dans le vide afin que les charges libérées par la lumière ne soient pas absorbées en

route vers l'anode. De même que les propriétés des matériaux semi-conducteurs ont permis de réaliser des structures offrant des caractéristiques semblables à celles des diodes et des triodes, et dénommées redresseurs au sélénium, germanium ou silicium, ou transistors, de même il a été possible de remplacer les cellules photo-électriques par des éléments semi-conducteurs permettant de transformer la puissance du rayonnement solaire en puissance électrique.

Un semi-conducteur est caractérisé par la distribution particulière des états énergétiques des électrons périphériques des atomes qui le composent (fig. 6).

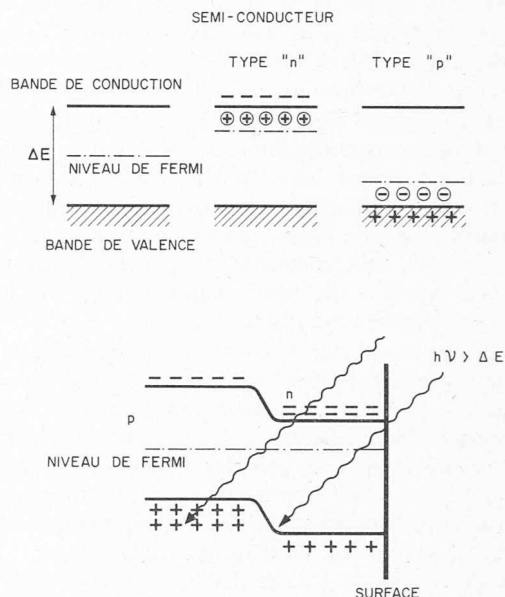


Fig. 6. — Principe d'une cellule solaire à base de semi-conducteur.

Le semi-conducteur (Ge, Si, par exemple) peut être influencé par une adjonction contrôlée d'atomes étrangers qui lui confèrent une conductivité de trous (charges positives) ou d'électrons. En juxtaposant une zone où la conductivité est faite par des trous et une zone où elle est réalisée par des électrons, on crée une jonction p-n qui a les propriétés d'un redresseur.

Les photons dont l'énergie est inférieure à celle qui sépare les bandes de valence et de conduction (energy-gap) traversent le semi-conducteur comme s'il était transparent. Ceux dont l'énergie est supérieure à l'« energy-gap » sont par contre absorbés par des électrons liés qui sont excités dans la bande de conduction, laissant un trou (charge positive) derrière eux. La charge positive et la charge négative deviennent libres et susceptibles de transporter le courant. Si cette création de paires a lieu près de la jonction p-n, les trous et les électrons sont séparés par la barrière de potentiel et ne peuvent se recombiner qu'en passant par un circuit extérieur dans lequel elles effectuent un travail. Si, en revanche, cette création de paires intervient loin de la jonction, les charges libres diffusent jusqu'à ce qu'elles se recombinent directement en perdant leur énergie dans le réseau cristallin.

Nous nous sommes un peu étendu sur ces mécanismes pour expliquer comment le rendement de conversion est limité. En effet, la définition de l'« energy-gap » implique que tout photon d'énergie inférieure au gap ne participe pas au processus, donc est perdu. Tout photon d'énergie supérieur au gap peut être collecté, mais sera transformé en énergie d'une charge activée à la valeur du gap, même si le photon incident avait une fois et demie ou deux fois

l'énergie du gap. Ainsi, pour le silicium, où la bande d'énergie interdite a 1,1 eV, tous les photons dont la longueur d'onde est supérieure à 1,13 μm ne seront pas collectés. Pour le spectre solaire, cela correspond à 20 % de l'énergie du spectre. De même, tous les photons incidents dont l'énergie est supérieure à celle qui correspond à une longueur d'onde de 1,13 μm seront comptés comme s'ils avaient l'énergie de 1,1 eV. Sans entrer dans le détail, le processus de collection des charges avant leur recombinaison joue un grand rôle aussi dans la limitation du rendement de conversion. La qualité du cristal, sa pureté chimique, la perfection de son réseau, les propriétés de la surface, la qualité et la quantité des impuretés introduites et l'homogénéité de leur répartition sont autant de paramètres qui influent sur la longueur de diffusion des charges excitées, c'est-à-dire sur le volume utile de la cellule.

Le développement technologique extrêmement spectaculaire dans le domaine des semi-conducteurs des années 50 et 60 a naturellement directement bénéficié aux cellules solaires. Cela d'autant plus que ces éléments représentent une source d'énergie d'une grande importance pour les engins spatiaux. En conséquence de tous les travaux entrepris, on fabrique actuellement des panneaux de cellules dont le rendement est de 10 à 15 %.

Le passage de cet état de choses à une exploitation pratique terrestre à grande échelle pose des questions assez formidables qu'il faut analyser maintenant. Elles sont de deux natures bien différentes. La première catégorie de problèmes est relative au prix des cellules et aux surfaces nécessaires. Si le soleil, comme on l'a vu, fournit au maximum 1 kW/m² pendant supposons au maximum 8 h./jour, il faudra au minimum, pour un rendement de 10 %, une surface de cellules de 1,25 m²/kWh. Le prix actuellement publié (Si) est de \$7000/m², c'est-à-dire environ \$10000/kWh [8]. On se rend immédiatement à l'évidence que cela représente une difficulté majeure pour une exploitation significative. Il faut noter en passant que, par leur nature même, les cellules solaires fournissent du courant continu à basse tension.

Les explications qui précèdent permettent de comprendre pourquoi les prix des cellules au silicium sont si élevés. La pureté du matériau de base, la perfection du monocristal, le contrôle de la dotation représentent des exigences telles (pour atteindre un rendement reproductible de 10 %) que le prix résultant est très élevé. Des progrès récents dans le domaine du tirage de cristaux en rubans de très faible épaisseur peuvent faire espérer une réduction substantielle du prix du matériau de base [9].

Une autre catégorie de matériaux peut être utilisée pour réaliser des cellules photovoltaïques. Ce sont les composés des colonnes II et VI du tableau périodique des éléments, notamment le sulfure de cadmium (CdS). Les cellules réalisées avec ce composé et éventuellement d'autres semblables sont polycristallines, ce qui rend la fabrication des cellules plus simple. Cependant, les rendements sont inférieurs (5 à 7 %) et l'expérience technologique industrielle est encore aujourd'hui moindre pour ces composés que pour les semi-conducteurs monocristallins. Un des problèmes importants est d'assurer une vie suffisamment longue à ces éléments (plusieurs années), qui sont sensibles notamment à l'humidité. Il est difficile de se faire actuellement une opinion quant au niveau de contrôle des propriétés des cellules II-VI que l'on atteindra. De nombreux travaux sont en cours, et de grands progrès ont été réalisés, tant dans le domaine de la durée de vie que dans celui des techniques de fabrication.

On peut considérer trois formes de stockage relatives à trois ordres de grandeur d'utilisation :

Pour des puissances réduites (répétiteurs de télécommunication, stations météorologiques, etc.), la batterie électrochimique classique est une bonne solution (Pb ou NiCd). Pour des applications domestiques (fournitures de la puissance électrique d'une maison familiale), les batteries électrochimiques peuvent encore entrer en ligne de compte ; le stockage sous forme mécanique par un volant d'inertie logé dans le fondement de l'habitation, entraîné par les cellules lorsqu'il y a du soleil au moyen d'un moteur électrique et restituant son énergie au fur et à mesure des besoins en entraînant un générateur, serait très intéressant. Enfin, s'il était question de grandes puissances (puissances industrielles), on ne voit actuellement guère d'autre solution que l'électrolyse de l'eau et le stockage sous forme d'hydrogène.

Il est utile à ce niveau de se demander si le principe des piles photovoltaïques que nous venons d'esquisser est susceptible à la longue d'apporter des solutions au moins partielles au problème d'exploitation de l'énergie solaire. Tout d'abord, remarquons que c'est le chapitre qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études jusqu'à présent et qui a bénéficié des progrès technologiques réalisés dans le domaine des semi-conducteurs. Le fait que malgré cela les résultats ne soient pas applicables à une exploitation au niveau de la production d'énergie à grande échelle n'a pas de quoi surprendre ni décourager. En effet, la ligne de recherche et développement suivie par les utilisateurs des semi-conducteurs était celle qui tendait à la miniaturisation, puis à l'intégration des éléments actifs. La quantité de semi-conducteurs par fonction électronique (redresseur, amplificateur, commutateur, etc.) se chiffrait par gramme, puis milligramme, puis microgramme. Dès lors, le prix du matériau n'intervenait pas dans les préoccupations des chercheurs.

Une remarque doit encore être faite ici à propos des générateurs photovoltaïques. Une partie de la lumière du soleil nous vient en ligne droite de la source rayonnante, mais même par temps clair une autre partie ne nous parvient qu'après diffusion dans l'atmosphère. Cette diffusion est due à l'atmosphère elle-même d'une part ; de l'autre, elle est provoquée par les particules en suspension dans différentes couches de l'atmosphère : cristaux de glace en haute atmosphère, poussières et gouttelettes d'eau dans la basse atmosphère. Les générateurs photovoltaïques valorisent ces deux formes de rayonnement.

Trois lignes de recherche peuvent être suivies et sont susceptibles de contribuer à la solution du problème. Ce sont : le travail sur des composés de la catégorie des II-VI dont il a été question plus haut et qui devrait aboutir à un prix de revient par élément nettement inférieur ; l'amélioration du rendement de transformation (on a parlé de rendements possibles jusqu'à 20 %). Cela n'est pas suffisant pour rendre les prix actuels tolérables, mais peut contribuer à améliorer la situation. Enfin, on étudie la possibilité de concentrer l'énergie solaire sur des cellules au moyen de miroirs afin d'augmenter l'énergie à transformer par unité de surface de semi-conducteur, partant de la constatation qu'un miroir est bien meilleur marché à surface égale que ne l'est le semi-conducteur. Cette voie est très intéressante, mais elle requiert encore beaucoup de travail. Il faut noter qu'en utilisant des miroirs on perd l'avantage de récolter également la composante diffuse de l'énergie solaire.

Néanmoins, il est peu probable que la conversion photoélectrique soit appelée à jouer un rôle de premier plan dans un avenir proche pour la fourniture d'une quantité importante d'énergie.

Génération de puissance à l'échelle industrielle

La génération de puissance à l'échelle industrielle doit être abordée sous un point de vue différent que le chauffage domestique. On a vu plus haut que celui-ci était caractérisé par le fait que les capteurs sont hautement décentralisés, ce qui a pour conséquence que la question du transport de l'énergie ne se pose pas. De plus, tant que l'on ne cherche dans l'énergie solaire qu'un appoint au chauffage conventionnel, le stockage sous forme d'un volume restreint d'eau chaude peut représenter une solution satisfaisante.

Il n'en va pas de même pour la génération de puissance industrielle, pour laquelle les collecteurs doivent être groupés dans des sites soigneusement choisis d'où l'énergie doit être acheminée vers les centres de consommation. Etant donné les fluctuations périodiques et aléatoires de l'ensoleillement, un stockage est aussi nécessaire, à court terme au moins (jour, semaine). Enfin, le principe même de la conversion doit être différent. Aussi bien le chauffage de l'eau à basse température ($< 100^{\circ}\text{C}$) est bien adapté aux applications domestiques, aussi bien le stockage, le transport et la distribution d'eau chaude produite en grande quantité et à plusieurs centaines de kilomètres des utilisateurs n'est pas une solution intéressante. Suivant les distances sur lesquelles l'énergie doit être transportée et le contexte énergétique dans lequel elle doit s'intégrer, la conversion doit être envisagée en électricité ou en hydrogène (ou autre vecteur chimique d'énergie).

En étudiant les données climatiques et de l'environnement géographique et industriel, on constate que la Suisse est un bon candidat pour une exploitation de l'énergie solaire à l'échelle industrielle.

Le tableau II montre les heures d'ensoleillement par mois en moyenne sur trente ans et le pourcentage du soleil par rapport à l'ensoleillement théorique maximum dans diverses régions alpines (5). On constate, en le comparant avec le tableau I, que l'ensoleillement dans les Alpes est plus favorable, car sa répartition au long de l'année y est plus uniforme que sur le Plateau.

Le nombre total d'heures de soleil dans les Alpes ne varie pas beaucoup par rapport à Genève, par exemple, mais il y a beaucoup plus de soleil en hiver et un peu moins en été.

La conversion de l'énergie solaire récoltée dans les montagnes en électricité est, pour le moment au moins, la solution la plus attrayante. L'électricité produite peut être injectée immédiatement dans le réseau existant qui le transporte aux utilisateurs. De plus, le système hydro-électrique étendu a pour conséquence que l'on peut alterner une partie de la production hydraulique avec la production solaire. Les heures d'ensoleillement sont directement valorisées par l'économie de l'eau des barrages, constituant un système de stockage qui autrement devrait être créé de

toutes pièces et à grands frais. Cette conception est valable pour un stockage à court terme, jour-nuit, à la rigueur semaine, suffisant pour garantir une livraison régulière. Elle n'est pas applicable à long terme, été-hiver, car la capacité des barrages existants ne suffirait pas. En revanche, l'exportation du surplus de l'énergie électrique en été permettrait aux pays importateurs d'économiser du combustible et procurerait des devises à la Suisse, avec lesquelles elle pourrait se procurer de l'énergie en hiver. C'est une autre forme de stockage qu'il faut bien dénommer stockage financier ou monétaire.

On peut évaluer ce que représenterait pratiquement cette solution.

La seule possibilité réaliste actuellement de transformer de l'énergie solaire en énergie électrique à l'échelle industrielle consiste à alimenter une turbine à vapeur par le soleil.

La température de fonctionnement doit être de 300° à 400°C . Pour obtenir une telle température à partir du rayonnement solaire, il faut disposer de concentrateurs, car un système semblable à celui du chauffage domestique décrit dans la première partie de cet article aurait des pertes beaucoup trop importantes. La concentration du rayonnement incident est réalisée par exemple par une série de miroirs orientables, programmés pour suivre la course diurne du soleil, qui renvoient tout le rayonnement solaire sur un même point : la chaudière.

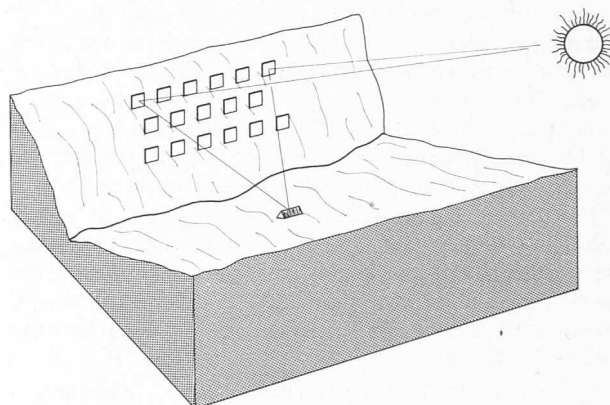


Fig. 7. — Croquis de principe d'une centrale solaire en montagne.

Si le rayonnement solaire est de 1 kW/m^2 environ, on peut réaliser pratiquement une efficacité combinée de collection optique et de chaudière solaire de 50 %. Si la turbine à vapeur a un rendement de 30 %, 15 % de l'énergie solaire sera transformée en électricité. On aura donc 150 W(e)/m^2 de miroirs. 1 km^2 de miroirs fournira une puissance maximale durant les heures d'ensoleillement de 150 MW(e) , et cela pendant environ 2000 h. par an, soit

| Mois | Janv. | Févr. | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | Août | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. | Total |
|------------------|-------|-------|------|-------|-----|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|
| Davos | 85 | 99 | 149 | 157 | 164 | 169 | 197 | 181 | 164 | 130 | 92 | 79 | 1'666 |
| % | 30 | 34 | 41 | 39 | 36 | 36 | 42 | 42 | 44 | 39 | 33 | 29 | 38 |
| Säntis | 112 | 123 | 166 | 160 | 184 | 174 | 196 | 186 | 170 | 163 | 129 | 117 | 1'880 |
| % | 40 | 42 | 45 | 40 | 40 | 37 | 42 | 43 | 45 | 48 | 46 | 44 | 42 |
| Locarno Monti | 131 | 153 | 188 | 209 | 214 | 252 | 283 | 260 | 203 | 159 | 120 | 114 | 2'286 |
| % | 47 | 52 | 51 | 52 | 46 | 54 | 60 | 60 | 54 | 48 | 42 | 42 | 52 |
| Leysin | 103 | 113 | 152 | 162 | 179 | 185 | 215 | 197 | 162 | 137 | 103 | 100 | 1'808 |
| % | 37 | 39 | 42 | 40 | 39 | 39 | 46 | 45 | 43 | 41 | 36 | 37 | 41 |
| Montana | 119 | 131 | 180 | 193 | 206 | 224 | 256 | 236 | 196 | 173 | 124 | 115 | 2'153 |
| % | 43 | 45 | 49 | 48 | 45 | 48 | 54 | 54 | 52 | 51 | 44 | 43 | 49 |

TABLEAU II

300 GWh/an. Il faut remarquer que le site sur lequel les miroirs sont répartis doit avoir une surface environ deux à trois fois plus grande que la surface totale des miroirs, afin que ces derniers ne se fassent pas ombre mutuellement en début et en fin de journée. En conséquence $2 \div 3 \text{ km}^2$ de terrain sont nécessaires pour une centrale comprenant 1 km^2 de miroirs et fournissant 300 GWh/an. Notons en passant que l'atmosphère est beaucoup plus pure en montagne qu'elle ne l'est en plaine et que, notamment en hiver, elle contient très peu d'humidité, ce qui améliore le rendement de captage. Les pentes orientées au sud de vallées relativement étroites sont particulièrement adaptées à de telles centrales, car les miroirs peuvent y être disposés sur le versant orienté au sud, alors que la ou les chaudières solaires trouvent leur place sur le versant opposé (fig. 7).

Si l'électricité produite en hiver est utilisée pour alimenter en plaine des pompes à chaleur fonctionnant à partir de l'eau des lacs, on peut évaluer l'économie de combustible de chauffage par km^2 de miroirs. Les mois de chauffage (voir tableau I) sont : octobre, novembre, décembre, janvier, février, mars et avril à Genève. Dans une région où l'ensoleillement est comparable à celui de Montana, cela représente au total 1035 h. de soleil, c'est-à-dire sensiblement la moitié de l'ensoleillement annuel. L'énergie électrique récoltée est de 150 GWh environ par km^2 . Si cette énergie est utilisée pour alimenter des pompes à chaleur avec une efficacité de 3, cela correspond à 450 GWh thermique, soit 45.10^3 m^3 d'huile de chauffage, correspondant au besoin en huile de chauffage de 45 000 habitants. L'utilisation de pompes à chaleur sur l'eau des lacs est intéressante, car ceux-ci ont une grande surface et jouent le rôle de collecteurs d'énergie solaire en été, qui est ainsi partiellement stockée sans frais et récupérée en hiver.

Le nombre de problèmes à traiter jusqu'à ce qu'une solution telle que celle qui est analysée ici voie le jour est important et nécessite des études en profondeur allant de l'écologie et la protection des sites aux détails technologiques en passant par l'analyse des sites possibles et de leur microclimat.

Une bonne analyse d'un système tel que celui qui est préconisé ici a été faite par Hildebrandt et Vant-Hull [10]. Les auteurs montrent que les miroirs peuvent être fabriqués pour un prix de l'ordre de $\$ 30/\text{m}^2$, ce qui représente un ordre de grandeur de 100.— fr. s./ m^2 . Dans ces conditions, le prix du kWh devient intéressant pour une production industrielle.

La solution décrite plus haut n'est pas la seule qui permette l'exploitation de l'énergie solaire à l'échelle industrielle. Elle a été développée avec certains détails, parce qu'*actuellement* c'est la seule qui soit directement applicable aux conditions de notre pays et qu'elle tient compte au mieux de notre substrat énergétique et industriel. La coïncidence d'un ensoleillement assez favorable et des barrages hydro-électriques dans les Alpes notamment est un argument très fort en faveur de cette ligne particulière.

Il y a sur terre d'immenses régions qui bénéficient d'un ensoleillement beaucoup plus important que la nôtre (de 70 à 90 % de l'ensoleillement théorique, alors que chez nous on se situe entre 40 et 55 % au mieux). Cependant, ces contrées sont à l'écart des grands centres d'utilisation de l'énergie, ce qui impose impérativement de trouver une solution aux problèmes du stockage et du transport. Nous sommes convaincus que l'hydrogène, éventuellement l'ammoniac (NH_3), sont des substances qui permettent le transport et le stockage d'énergie dans les meilleures conditions actuellement concevables. Reste le problème de la décomposition par la radiation solaire de l'eau par exemple en

hydrogène et en oxygène. On peut imaginer plusieurs systèmes permettant de réaliser cette réaction [11] qui est difficile. De toute façon, une recherche importante est encore nécessaire avant qu'un tel projet de centrale puisse être élaboré. Cet effort est cependant justifié, si l'on se place à un point de vue plus synthétique que celui qui est adopté plus haut pour évaluer les possibilités à court terme de la Suisse : les ressources solaires exploitables dans le monde sont considérables, et la transformation d'énergie solaire en énergie chimique peut, suivant les solutions mises au point, bénéficier de rendements de conversion supérieurs à ceux qui sont actuellement envisagés pour la conversion en énergie électrique.

Conclusion

Les réflexions présentées dans cet article ont été faites à partir des connaissances de la technique actuelle et des données statistiques sur notre climat. Elles ne résultent d'aucun parti pris, mais elles sont motivées par le souci de ne pas passer à côté d'une ressource potentielle si celle-ci existe.

Nous avons été conduits tout naturellement à cette conclusion que l'énergie solaire dans nos régions peut, judicieusement exploitée, représenter un appoint non négligeable à notre ravitaillement énergétique. L'effort nécessaire est de même nature que celui qui a été consenti dans les deux ou trois générations qui nous précèdent pour exploiter les ressources hydro-électriques.

Il n'est pas déraisonnable de penser que, dans un avenir de vingt à trente ans, un ordre de grandeur de 30 % de l'énergie consommée en Suisse pourrait être d'origine solaire et récoltée sur notre territoire, une partie par des collecteurs domestiques décentralisés, l'autre par des centrales dans les Alpes. Il serait absolument faux en conséquence de vouloir opposer cette forme d'énergie à d'autres formes, comme l'énergie nucléaire. Chacune doit contribuer à la satisfaction de nos besoins, qui eux-mêmes doivent être revus par une critique consciente et librement consentie de chaque utilisateur. C'est de cette façon que le meilleur parti aura été tiré de la crise de l'énergie que nous vivons présentement.

Remerciements

L'élaboration de ce texte a été grandement aidée par les avis de MM. J.-L. Meylan, J. Fournier et D. Gross. L'auteur leur en exprime sa vive gratitude.

Janvier 1975.

RÉFÉRENCES

- [1] « Report of the Committee on Solar Energy Research in Australia », publié par *Australian Academy of Science*, n° 17, 1973.
- [2] M. BORTEUX, *Arts et Manufactures*, déc. 1971.
- [3] H. A. BLUM, J. M. ESTES, E. E. KERLIN : *Congrès international « Le soleil au service de l'homme »*, Paris 2-6.7.1973.
- [4] F. TROMBE, *Marché Suisse des Machines* 26, 1974, p. 26-29.
- [5] *Annuaire Statistique de la Suisse* 1972, p. 12.
- [6] Valeurs communiquées par l'Observatoire de Genève.
- [7] T. GINSBURG, B. SCHNEIDER, T. WOODMAN, *Neue Zürcher Zeitung*, « Forschung und Technik » n° 117, 11.3.1974.
- [8] J. J. LOFERSKI, *Mechanical Engineering*, déc. 1973, p. 28-32.
- [9] H. B. SEREEZE, J. C. SCHWARTZ, G. ENTINE, K. V. RAVI, *Mat. Res. Bull.* 9, 1974, p. 1421-1426.
- [10] A. F. HILDEBRANDT, L. L. VANT-HULL, *Mechanical Engineering*, sept. 1974, p. 23-27.
- [11] C. MARCHETTI, *Chem. Economy and Engineering Review*, vol. 5, 1973, p. 7-25.

Adresse de l'auteur :

Jean-Claude Courvoisier
Battelle, Centre de recherche de Genève
7, route de Drize
1227 Carouge, Genève