

## **L'énergie dans la société**

### **UNE NOUVELLE APPROCHE : LA PROSPECTIVE ENERGETIQUE**

par Thierry DELAROCHELAMBERT,  
Lycée Louis-Armand, 68200 Mulhouse.

---

#### **INTRODUCTION.**

Les thèmes énergétiques figurent souvent en bonne place dans certains programmes de Sciences Physiques, de Géologie, de Sciences Humaines et Economiques, mais ils sont abordés de manière dispersée, masquant un manque de cohérence et d'unité par une avalanche de tableaux et de statistiques mondiales, européennes ou françaises, sans donner le moindre fil conducteur permettant des comparaisons valables, et une analyse précise de questions qui font pourtant la « une » des journaux.

Il conviendrait donc de présenter à nos élèves des outils, simples mais rigoureux et utilisables, pour qu'ils acquièrent une vision plus claire des données énergétiques, en ayant une attitude plus active et un esprit critique de synthèse vis-à-vis des problèmes énergétiques.

Nous exposerons donc dans un premier temps les bases théoriques de la nouvelle approche que nous proposons, puis nous développerons un certain nombre d'exemples d'application, d'intérêt comme de niveaux très divers.

C'est avec infiniment de plaisir et beaucoup d'attention que nous accueillerons toutes les informations, critiques (positives et négatives) et suggestions que les lecteurs du B.U.P. voudront bien nous transmettre.

#### **A. LA PROSPECTIVE ENERGETIQUE.**

Ses fondements et les conclusions auxquelles elle aboutit sont exposés en détail dans un livre que notre équipe (1) vient de publier et qui s'adresse à un large public (2). Nous allons tenter

---

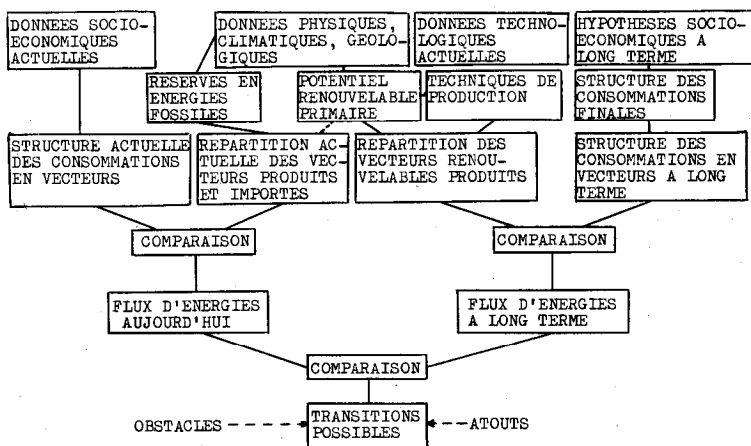
(1) Association Projet Alter Alsace. Les auteurs du livre : T. DELAROCHELAMBERT, professeur de Sciences Physiques ; M. PIERRE, ingénieur chimiste ; C. MUNSCH, ingénieur agronome ; F. WALGENWITZ, ingénieur géologue.

(2) « Les énergies de l'Alsace », Projet Alter, Editions Syros, 214 pages.

dans ces quelques pages de résumer la démarche de cet ouvrage qui nous a demandé un an et demi de recherches pour rassembler et utiliser un volume très important de données physiques, climatiques et économiques, et en faire un document aéré et accessible de sensibilisation, d'information et de réflexion.

### I) La démarche.

Le tableau synoptique qui suit décompose cette démarche très schématiquement. C'est celle que nous avons utilisée pour étudier un scénario énergétique régional (nous justifierons ce terme par la suite); elle est entièrement transposable sur un plan national.



Il fait apparaître une certaine symétrie dans le traitement des données. Cependant, l'étude des flux actuels d'énergie n'engage aucune hypothèse, alors que celle des flux énergétiques à long terme (à l'horizon des années 2050 pour fixer les idées) demande un calcul statistique et physique et un calcul de consommation à partir d'hypothèses socio-économiques sur le long terme.

### II) Le traitement des informations et le choix des hypothèses.

La prospective à long terme fait intervenir deux types d'informations :

#### 1. LES DONNÉES SCIENTIFIQUES.

Elles concernent les ressources énergétiques, et les techniques de production, de transport et de distribution. Ces données sont en général connues, mais certaines réserves s'imposent : l'his-

toire montre que les enjeux de marché conduisent les producteurs à minimiser les quantités existantes (ressources prouvées et estimées) des stocks naturels d'énergies fossiles, particulièrement dans le cas de l'uranium et du pétrole, afin d'en accroître le prix. Les sources de données statistiques que nous avons sont celles qui sont disponibles partout (compagnies pétrolières, Ministère de l'Industrie, D.I.I., C.E.R.E.N., C.O.G.E.M.A., E.D.F., C.D.F., G.D.F., O.C.D.E.).

Une exploitation de ces sources d'information n'est pas simple, mais elle peut être menée de manière comparative par les élèves et l'équipe pédagogique, pour en tirer un ensemble de chiffres utilisables par la suite, et éventuellement une analyse des événements récents : « dumping » sur les prix pétroliers dans les années 60 ; « choc pétrolier » de 1973 ; minimisation des réserves d'uranium dans les années 77-80 avec augmentation des prix de l'uranium ; baisse des prix du pétrole enfin liée à la diminution de la demande.

Les techniques d'exploitation et de production doivent être bien présentées avec des points de repères communs : rendements, puissances unitaires, surfaces d'emprise, sécurité, pollutions, facteur de charge.

Les ressources renouvelables (solaire, éolienne, biomasse, hydraulique, énergies marémotrice, houlomotrice, etc.) et la géothermie sont, ou peuvent être connues de manière assez précise, comme nous le verrons plus loin. Leur évaluation et l'étude technique de leur exploitation sont riches d'applications du cours et du calcul énergétique.

A ce stade déjà, il nous apparaît important et surtout très motivant pour les élèves de travailler sur des *données régionales* davantage perceptibles par eux et les concernant davantage.

### LES UNITES

Dans le labyrinthe du monde énergétique, à travers la myriade d'unités employées pour mesurer puissances et énergies, il est un fil d'Ariane qui, s'il n'offre pas la garantie de rigueur du système international d'unités, possède l'avantage de servir de référence pratique tant au physicien-chimiste qu'à l'économiste, au géographe... et au public : c'est la *tonne-équivalent-pétrole* (TÉP) et ses multiples. La raison de son succès réside tout à la fois dans l'importance qu'a prise le pétrole dans la vie quotidienne depuis 1960 et dans sa bonne adaptation à l'échelle des consommations humaines : une tonne de pétrole est plus parlant qu'un kilowatt-heure, souvent confondu avec le kilowatt.

**TEP, kTEP, MTEP.**

Si tous les tableaux énergétiques sont exprimés en ces unités, il convient néanmoins de rappeler quelques notions nécessaires pour éviter les confusions.

La TEP étant une unité de quantité de chaleur, représentant le P.C.I. (pouvoir calorifique inférieur, sans condensation de l'eau de combustion) d'une tonne de pétrole moyen, son équivalent physique peut être exprimé en joules, en kilowatt-heures, en thermies, en calories, etc. Il vaut aussi :

$$1 \text{ TEP} = 11\,625 \text{ kWh d'après l'O.N.U.} \quad (1)$$

Mais pour la production électrique, un rendement thermodynamique moyen fixé conventionnellement à 0,39 modifie considérablement l'équivalent (1), ce qui amène à l'équivalent (2) :

$$1 \text{ TEP} = 4\,500 \text{ kWh.} \quad (2)$$

Celui-ci paraît raisonnable lorsque l'électricité est consommée sous sa forme spécifique, ou pour l'usage des pompes à chaleur, ou pour la force motrice fixe. Mais dans le cas d'un chauffage par effet Joule, il devrait être encore diminué pour tenir compte de l'ensemble des pertes par rapport à une utilisation directe de chaleur. Quant à la force motrice mobile, le rendement avoisinant 0,25, il faudrait un équivalent de  $1 \text{ TEP} = 2\,900 \text{ kWh}$ .

L'usage dans la comptabilité énergétique nationale est de conserver l'équivalent (2). L'on s'y conformera donc.

**LES COMBUSTIBLES.**

Chaque combustible peut être comparé au pétrole dans un processus de production de chaleur (combustion - réaction chimique ; fission). On retiendra les comparaisons suivantes :

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| charbon   | 0,67 TEP/tonne                 |
| méthane   | 1,2 TEP/tonne                  |
| biomasse  | 0,4 TEP/tonne de matière sèche |
| hydrogène | 3,3 TEP/tonne                  |
| uranium   | 15 000 TEP/tonne.              |

Ce dernier chiffre doit être cependant pondéré compte tenu de la teneur des minerais (0,2 %), du rendement des centrales nucléaires, des pertes à l'enrichissement, des pertes au déchargement, etc. Le calcul donne alors un rapport de 9,3 TEP par tonne de minerai d'uranium.

On peut ajouter à ce tableau quelques carburants intéressants :

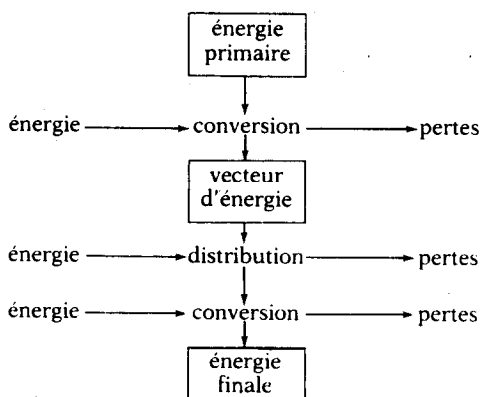
|           |                 |
|-----------|-----------------|
| méthanol  | 0,5 TEP/tonne   |
| éthanol   | 0,64 TEP/tonne  |
| « super » | 1,02 TEP/tonne. |

## 2. LES DONNÉES SOCIO-ÉCONOMIQUES.

Elles doivent permettre l'étude des *flux d'énergie* dans la société d'aujourd'hui et de demain. On appellera flux d'énergie la répartition quantitative par secteur économique des productions, transferts et consommations d'énergie sur une période donnée (annuelle, saisonnière ou mensuelle).

Les *secteurs économiques* sont les secteurs industriel, résidentiel, tertiaire (services et bureaux), agricole et celui des transports.

Afin que les élèves aient une vision claire de ces flux, c'est-à-dire de « ce que l'on fait avec quoi », il nous semble nécessaire qu'ils sachent utiliser les notions fondamentales d'*énergies primaires*, de *vecteurs d'énergies* et d'*énergies finales* : les premières sont les formes d'énergie telles que la nature nous les offre (pétrole, vent, rayonnement solaire, etc.) ; les seconds sont les formes sous lesquelles est distribuée l'énergie aux utilisateurs. On distinguera ici les *combustibles* solides (CS), liquides (CL) et gazeux (CG), la *chaleur* basse température (BT,  $\vartheta < 100^\circ\text{C}$ ), moyenne température (MT,  $100^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 600^\circ\text{C}$ ) et haute température (HT,  $600^\circ\text{C} \leq \vartheta$ ), et l'*électricité* distribuée par réseaux, piles, etc. Les énergies finales enfin sont les formes d'énergie effectivement consommées : les *chaleurs* BT, MT et HT ; la *force motrice fixe* (FMF) des machines, presses, etc. ; la *force motrice mobile* (FMM) produite par les moteurs de traction ; et l'*électricité spécifique* (ES) pour les usages où elle est irremplaçable (éclairage, électronique, électrometallurgie, petit électroménager, etc.)



Synoptique 1

Des exemples simples de la vie de tous les jours illustrent aisément ces notions.

Il importe là aussi que l'étude des flux soit menée régionale-ment pour être plus concrète aux élèves. On aboutira alors à un double tableau, clairement présenté, dont on tirera de multiples enseignements ; le double tableau donnant la structure des flux d'énergie actuellement est facile à établir à partir des données régionales du C.E.R.E.N., de l'I.N.S.E.E., de la D.I.I. et d'E.D.F. pour une année donnée.

| CONSUMMATION | CHALEUR |    |    | COMBUSTIBLES |    |    | ELECTRICITE | TOTAL |
|--------------|---------|----|----|--------------|----|----|-------------|-------|
|              | BT      | MT | HT | CS           | CL | CG |             |       |
| RESIDENTIEL  |         |    |    |              |    |    |             |       |
| INDUSTRIE    |         |    |    |              |    |    |             |       |
| TRANSPORT    |         |    |    |              |    |    |             |       |
| TERTIAIRE    |         |    |    |              |    |    |             |       |
| AGRICULTURE  |         |    |    |              |    |    |             |       |
| TOTAL        |         |    |    |              |    |    |             |       |
| PRODUCTIONS  | BT      | MT | HT | CS           | CL | CG | E           | TOTAL |
|              |         |    |    |              |    |    |             |       |
| SOLATRE      |         |    |    |              |    |    |             |       |
| EOLIENNES    |         |    |    |              |    |    |             |       |
| HYDRAULIQUE  |         |    |    |              |    |    |             |       |
| BIOMASSE     |         |    |    |              |    |    |             |       |
| TOTAL        |         |    |    |              |    |    |             |       |

Tableau 1

L'établissement du double tableau représentant le long terme ne peut se faire qu'après avoir émis un certain nombre d'hypothèses sur les modes de consommation possibles à l'horizon 2050, et les énergies disponibles (primaires, distribuées, finales) alors. C'est de ce choix que nous allons discuter.

### 3. L'ÉVOLUTION DES SOCIÉTÉS INDUSTRIELLES.

L'observation des prévisions successives qui ont été avancées ces dix dernières années pour évaluer la consommation de la France en 1985 montre que la plus grande prudence s'impose quand on se livre à un tel exercice (*cf.* tableau 2). Une simple projection des habitudes de consommation ne peut donc mener *a priori* qu'à des déboires, comme cette attitude dénuée de sens physique qui a consisté à prédire un doublement de la consommation électrique tous les 10 ans.

Il est plus honnête et raisonnable d'élaborer un modèle socio-économique à partir des tendances technologiques qui se dessinent aujourd'hui, des contraintes physiques et énergétiques effectivement prévisibles, et des évolutions socio-économiques souhaitables dans l'intérêt général.

| Prévision faite en ...                  | En 1985, la France<br>devrait consommer : |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| ... 1970 (6 <sup>e</sup> Plan)          | 300 millions de TEP                       |
| ... 1973 (6 <sup>e</sup> Plan en cours) | 284 millions de TEP                       |
| ... 1974 (Plan Messmer)                 | 240 millions de TEP                       |
| ... 1975 (7 <sup>e</sup> Plan)          | 232 millions de TEP                       |
| ... 1978 (7 <sup>e</sup> Plan en cours) | 230 millions de TEP                       |
| ... 1978 (loi-programme)                | 215 millions de TEP                       |
| ... 1980 (8 <sup>e</sup> Plan)          | 219 millions de TEP                       |
| ... 1981 (rapport Hugon)                | 197 millions de TEP                       |
| ... 1982 (9 <sup>e</sup> Plan)          | 193,6 millions de TEP                     |

Tableau 2

✦ Les tendances : l'avenir semble appartenir aux sociétés performantes dans leurs processus industriels, dans la gestion de leurs ressources et dans leur mode de communication (sociale, humaine, commerciale, technique).

Si l'industrie lourde a été le moteur de l'économie, jusque dans les années 60-70, il est clair qu'aujourd'hui déjà, et demain davantage, ce sont les industries de pointe à forte valeur ajoutée qui entraînent l'économie : électronique, informatique, biotechnologie, robotique, communications. C'est donc toute une industrie fort peu gourmande en énergie, pouvant se passer de la proximité de sources concentrées d'énergie, qui prend le relais de l'industrie de l'aluminium, du béton et de l'acier, dévoreuses de chaleur et d'électricité.

Les réseaux de communication lourds ne sont plus les facteurs déterminant les implantations industrielles, et le développement du tertiaire marque une évolution historique déterminante.

La dernière décennie a montré qu'en Europe, croissance économique et croissance énergétique sont désormais découplées : celle-ci n'est plus la condition de celle-là ni sa conséquence.

✦ Les contraintes : les réserves d'énergies fossiles sont limitées. A l'horizon 2050, pétrole et uranium seront en voie d'épuisement ainsi que le gaz naturel dans une moindre mesure (tableau 3).

Si les réserves charbonnières semblent en mesure d'assurer un approvisionnement sur plusieurs siècles, il faut garder à l'esprit que les ressources françaises sont bien plus réduites et assez difficiles d'accès.

S'ajoutent à ces contraintes les lancinants problèmes de pollution (rejets et déchets radioactifs ; dioxyde de carbone ; dioxyde de soufre) et de sécurité.

| ENERGIES<br>FOSSILES | RÉSERVES<br>TOTALES                | DURÉE<br>D'EXPLOITATION |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Pétrole              | 91 milliards de t.                 | 30 à 60 ans             |
| Gaz naturel          | 74 100 milliards de m <sup>3</sup> | 50 à 150 ans            |
| Charbon              | 10 000 milliards de t.             | 600 ans                 |
| Uranium (*)          | 5 millions de t.                   | 30 à 60 ans             |

Sources : O.C.D.E., C.F.F., C.P.P.

**Tableau 3**

★ Les évolutions socio-économiques : les réponses classiques à la crise économique occidentale (relance par la consommation et/ou la croissance, monétarisme) ayant échoué, on pense de plus en plus à des modifications fondamentales du fonctionnement économique : répartition du travail par la réduction du temps de travail ; réactivation des économies régionales par une décentralisation accrue ; réduction des déficits des balances par la réduction des importations pétrolières, de pâte à papier, de protéines de soja, etc.

Autant de pistes qui amènent à formuler un ensemble d'hypothèses sur les structures socio-économiques souhaitables à long terme pour répondre aux défis énergétiques et économiques du XXI<sup>e</sup> siècle.

#### 4. LES HYPOTHÈSES SOCIO-ÉCONOMIQUES POUR LE LONG TERME.

Elles sont exposées de manière assez détaillée dans notre livre ainsi que dans l'étude publiée en 1978 par des chercheurs du groupe de Bellevue (Collège de France, C.N.R.S., E.D.F., I.N.R.A.) (3). Les lecteurs intéressés peuvent s'y reporter. Nous pouvons cependant en donner ici la substance, car elles fondent l'ensemble de nos calculs énergétiques sur le long terme :

- le niveau de vie, de confort et de consommation augmente en moyenne pour l'ensemble de la population, avec une réparation beaucoup plus équitable qu'actuellement ;
- la qualité et la durée de vie des produits d'équipement est nettement améliorée ;
- la population, en augmentation, se stabilise à long terme autour de 60 millions en France ;

(\*) Utilisation dans les réacteurs à neutrons lents.

(3) « Projet Alter, Esquisse d'un régime à long terme tout solaire », Editions Syros 6, rue Montmartre, 75001 Paris.



- l'industrie est davantage orientée vers les biens de consommation que vers les biens d'équipement puisque les besoins en équipement sont satisfaits ;
- la part du tertiaire augmente (services plus nombreux, équipements touristiques et de loisirs accrus, etc.) ;
- les transports collectifs sont améliorés, augmentés et diversifiés ;
- les transports de marchandises sont rationalisés et orientés vers le chemin de fer moins énergivore ;
- la distribution des biens de consommation courants est décentralisée au maximum ;
- la production et le transport des vecteurs d'énergie est régionalisée ;
- les gaspillages d'énergie et de matière première sont minimisés par le recyclage, l'isolation, la régulation et l'utilisation rationnelle des énergies.

### CONTENU ENERGETIQUE DE LA MATIERE

Il est utile de savoir quelle énergie « contient » un matériau, car la connaissance des contenus énergétiques peut guider alors le choix des constructeurs. On doit cependant distinguer :

- le bilan matière - énergie de production (extraction, affinage, mise en forme, intégration au produit fini) ; il intéresse le fabricant ;
- le bilan d'utilisation (distribution, fonctionnement, maintenance) qui intéresse le consommateur ;
- le bilan de récupération (refonte, recyclage, combustion) ;
- le bilan global, qui intéresse la collectivité.

Voici quelques contenus de fabrication de matériaux courants :

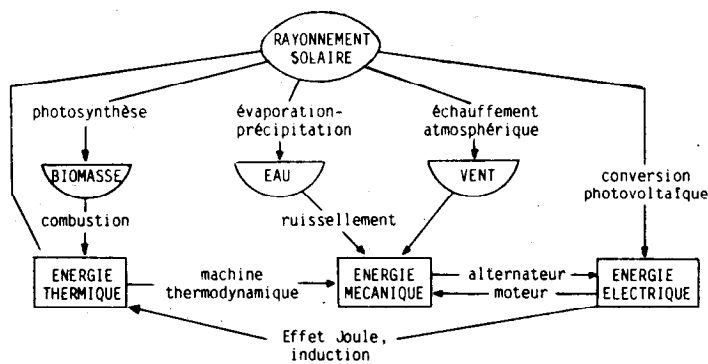
|           |      |           |                 |      |           |
|-----------|------|-----------|-----------------|------|-----------|
| fer blanc | 0,8  | TEP/tonne | aluminium       | 5,1  | TEP/tonne |
| verre     | 0,4  | TEP/tonne | alumin. recyclé | 0,19 | TEP/tonne |
| papier    | 1,15 | TEP/tonne | papier recyclé  | 0,61 | TEP/tonne |
| plastique | 1,9  | TEP/tonne |                 |      |           |
| bois      | 0,01 | TEP/tonne |                 |      |           |
| béton     | 1    | TEP/tonne |                 |      |           |

Il serait intéressant à ce niveau de l'étude que les élèves puissent comparer ces hypothèses de travail aux structures actuelles, et discuter de leur bien-fondé, de leur réalisme et de choix différents.

## 5. LES CHOIX ÉNERGÉTIQUES A LONG TERME.

Compte tenu des contraintes sur l'approvisionnement énergétique de la France à long terme, des choix s'imposent pour préparer le tournant du XXI<sup>e</sup> siècle. De quelles énergies disposerons-nous ? Quelles énergies utiliser prioritairement ?

Pour les raisons que nous avons évoquées, et qui sont développées dans notre ouvrage, nous pensons que seules les énergies renouvelables sont en mesure d'assurer de manière sûre et réaliste la couverture de l'ensemble des besoins futurs. Plus exactement, c'est cette hypothèse que nous avons choisie et que nous développons, n'excluant pas le recours éventuel à d'autres systèmes qui se révéleraient utiles ou nécessaires, surtout dans une période de transition.



Synoptique 2

Mais le choix des énergies renouvelables est important et intéressant à plus d'un titre :

- ce sont des énergies bien connues, dans leurs ressources potentielles comme dans leurs techniques de production ;
- elles sont équitablement réparties sur le globe (indépendance nationale) ;
- elles sont renouvelables indéfiniment (pas de tensions géopolitiques de marché) ;
- elles sont bien adaptées à une utilisation locale et décentralisée ;
- leur production peut se faire sans menace de pollution ou d'accident catastrophique ;
- elles peuvent couvrir, même avec les seules techniques d'aujourd'hui, l'ensemble des besoins régionaux, nationaux et mondiaux ;

— on ne peut guère compter aujourd'hui sur certaines techniques futuristes telles que la fusion thermonucléaire dont la faisabilité est loin d'être atteinte ; qui présente également des risques de pollution radioactive ainsi qu'un caractère particulièrement centralisé, technocratique dont on voit mal comment il pourrait répondre à des exigences de décentralisation et aux besoins du Tiers-Monde.

Enfin, il importe que soit démontrée effectivement la possibilité d'autosuffisance d'un pays comme la France grâce à l'utilisation exclusive de ses ressources renouvelables. Pour notre part, c'est à une démonstration régionale précise que nous nous sommes livrés.

### III) Le calcul énergétique.

#### 1. BILAN.

Nous plaçons en regard (page suivante) les deux synoptiques résumant les calculs énergétiques effectués par le groupe de Bellevue pour la France de 1975 (année référence) et celle du long terme.

On constate l'actuelle disproportion entre les vecteurs produits (76 % de combustibles) et les besoins en énergies finales qui sont pour plus de la moitié des besoins de chaleur. On en arrive à une situation physiquement et énergétiquement choquante, où l'on produit de la chaleur à 400-600 °C dans les centrales thermiques pour finalement chauffer à 19 °C une habitation avec des radiateurs électriques, après des pertes qui avoisinent les 75 % !

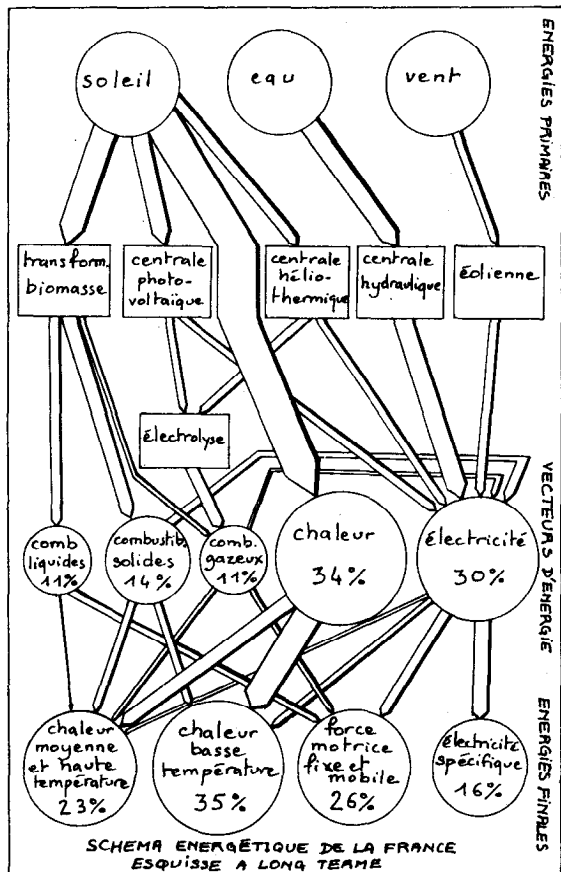
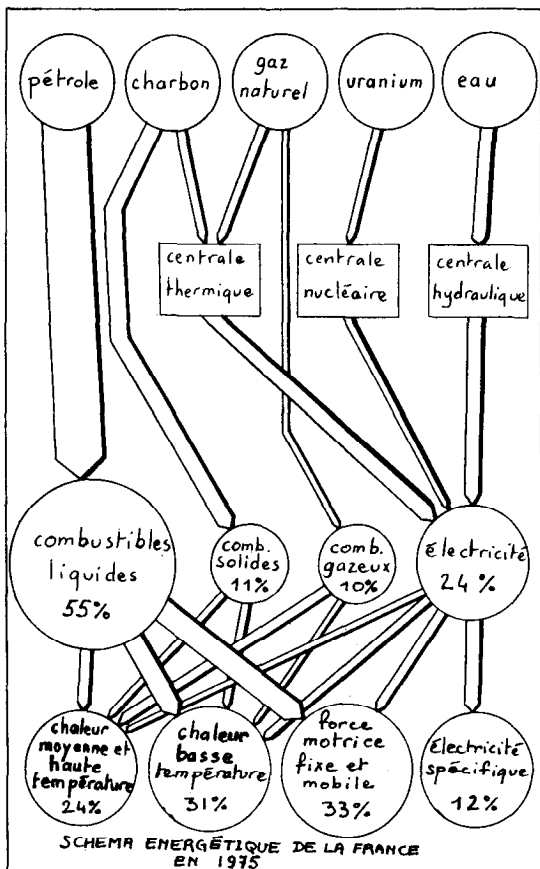
Le scénario à long terme présente au contraire une bien meilleure adaptation des vecteurs produits aux énergies finalement utilisées ; ceci est dû en grande partie aux besoins prépondérants de chaleur BT que l'énergie solaire est capable de couvrir en grande partie. Rappelons que ce scénario ne se fonde que sur les techniques aujourd'hui fiables et connues d'utilisation des énergies renouvelables, avec leurs rendements actuels.

#### 2. CALCUL DU POTENTIEL RENOUVELABLE.

Il est des calculs que nos élèves peuvent, selon les classes, mener à bien sans difficultés ; il en est d'autres en revanche qui relèvent du calcul différentiel et intégral, précédé parfois de traitements statistiques ardues, faisant appel parfois à des notions physiques non encore acquises.

L'intérêt des premiers est de faire apparaître des *ordres de grandeur* : que l'Alsace reçoive une énergie moyenne annuelle de 870 MTEP du Soleil est facilement calculable. De ce *potentiel*

Synoptique 3



solaire brut, on peut déduire les surfaces nécessaires au chauffage des habitations selon qu'elles se situent en ville, en plaine, en montagne, en connaissant les techniques de chauffage solaire et leurs rendements, leur mode de stockage ; on peut montrer l'intérêt de l'utilisation de « sels fondus » pour stocker cette chaleur BT par de simples calculs de chaleur latente, en illustrant d'exemples réalisés.

Les techniques de conversion de la biomasse en combustibles doivent être présentées, avec leurs rendements. Le *potentiel* de la biomasse peut être effectué avec la collaboration des professeurs de biologie. Il s'effectue en plusieurs étapes :

- calcul des quantités de protéines animales nécessaires à l'alimentation humaine (en kcal) et donc des surfaces en herbe nécessaires ;
- calcul des quantités de protéines végétales pour l'alimentation humaine (en kcal) et des surfaces agricoles requises ;
- estimation des surfaces agricoles pour les cultures régionales typiques destinées à la consommation locale ou à l'exportation ;
- les surfaces agricoles restantes sont alors disponibles aux cultures énergétiques (espèces à haut rendement) ;
- estimation des besoins en bois d'œuvre et d'industrie, et des surfaces boisées nécessaires ;
- surfaces réservées aux plantations énergétiques (taillis à courte révolution, espèces à haut rendement) ;
- calcul des productions disponibles pour la transformation en combustibles.

On obtient donc au total un potentiel brut en TEP de bois, déchets végétaux secs, déchets végétaux et animaux humides et biomasse végétale sèche, auquel on ajoute les déchets ménagers. Les techniques de conversion actuellement connues permettent ensuite de transformer ce potentiel en combustibles (CS, CL et CG), avec un rendement connu, selon les différents besoins.

Produit de départ : biomasse sèche (moins de 30 % d'eau)

| Procédé de conversion | Combustion directe | Pyrolyse ou carbonisation                          | Gazéification                 | Liquéfaction  |
|-----------------------|--------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Matériel              | Poêle, chaudière   | Four à pyrolyse                                    | Gazogène                      | à l'étude     |
| Produit final         | Chaleur            | Charbon de bois + jus pyroligneux + goudrons + gaz | Gaz pauvre ou gaz de synthèse | Hydrocarbures |
| Rendement             | 70 - 90 %          | 75 %                                               | 75 - 80 %                     | bon           |

| Produit de départ                 | Biomasse humide<br>(50-90 % d'eau environ) |                         |                         |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Principaux procédés de conversion | Hydrolyse                                  | Fermentation alcoolique | Fermentation méthanique |
| Combustible final                 | Alcool ou acétono-alcool                   |                         | Méthane                 |
| Rendement                         | 10 à 40 %                                  |                         | 40 à 50 %               |

*Le potentiel hydroélectrique* peut être évalué de deux manières :

- théorique et rapide : les bassins versants reçoivent en moyenne telle quantité annuelle de précipitation. On connaît à peu près l'écoulement résiduel de surface et la pente moyenne. Le résultat est tout à fait indicatif (environ 1,3 MTEP pour l'hydrologie alsacienne, hors Rhin) ;
- plus précis mais long : il s'agit d'utiliser les relevés de débits annuels effectués dans les différentes stations de jaugeage de chaque rivière. La courbe  $Q = f(h)$  (débit en fonction de l'altitude) peut être intégrée pour obtenir la puissance de la rivière et l'énergie annuelle qu'elle peut théoriquement fournir. On obtient ainsi 200 kTEP environ pour les cours d'eau alsaciens, et 2 200 kTEP pour le Rhin. Des élèves de Première peuvent se limiter au calcul simplifié d'énergie potentielle à débit constant, valable seulement pour les grands cours d'eau.

*Le potentiel éolien* est probablement le plus difficile à évaluer. Il faut d'abord disposer des statistiques de la Météorologie Nationale, souvent très limitées (aéroports). Il faut connaître la théorie des éoliennes (voir Annexe) et les lois physiques des écoulements de l'air en fonction de l'altitude, de la hauteur et du relief. Il faut enfin poser des hypothèses sur la répartition limite des éoliennes (on admet généralement un rapport de  $10^{-3}$  entre la surface des éoliennes et la surface au sol).

L'exposé de ces méthodes est fait dans notre ouvrage, et nous arrivons à un potentiel *recupérable* de 350 kTEP/an. Nous développons également un exemple de chauffage éolien pour une maison installée dans la plaine d'Alsace.

On peut présenter aux élèves quelques notions simples et quelques résultats, selon leur niveau, leur permettant de faire des calculs : la démonstration importante du théorème de Betz peut être menée en Terminale ; le calcul d'une surface d'éolienne pour obtenir telle puissance avec telle vitesse de vent est facile.

Le calcul de l'énergie fournie étant complexe, on peut donner quelques résultats (voir Annexe) ou utiliser le microordinateur en traitement statistique.

*Le potentiel géothermique* : la géothermie n'est pas immédiatement renouvelable, mais son exploitation est extrêmement intéressante. Son étude en classe peut être menée en étroite liaison avec le professeur de sciences naturelles (géologie) et de géographie. Il importe :

- de connaître l'existence des réservoirs géothermiques et l'origine de leur formation ;
- de savoir comment ils sont alimentés en chaleur ;
- de connaître les méthodes de prospection, de forage et d'exploitation ;
- de calculer sur des réalisations existantes la puissance et l'énergie d'une installation classique.

De nombreux documents existent, et il est très intéressant d'étudier concrètement une réalisation de chauffage géothermique lorsque l'occasion se présente.

Le potentiel d'un réservoir peut être grossièrement évalué, connaissant son épaisseur moyenne, son étendue, sa température, sa porosité et la température utile (voir Annexe).

#### IV) Conclusion.

Il nous semble nécessaire de pouvoir conclure un tel travail par un bilan et par des ouvertures, voire des questions.

Le bilan consiste simplement à proposer une répartition possible des vecteurs pour satisfaire les besoins de chaque secteur à long terme. Certains vecteurs doivent être alors reconvertis, et les excédents saisonniers doivent être stockés : la chaleur en nappes souterraines, l'électricité en hydrogène par voie électrolytique. Nous résumons ci-après le bilan pour notre région :

|              | BT   | MT                             | HT                       | CS                       | CL                                | CG   | E                       | PERTES | TOTAL |
|--------------|------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|------|-------------------------|--------|-------|
| PRODUCTION   | 1594 | -                              | -                        | 785                      | 315                               | 61   | 2580                    | -      | 5335  |
| CONSUMMATION | 1900 | 200                            | 70                       | 485                      | 315                               | 430  | 1325                    | -      | 4725  |
| SOLDE        | -306 | -200                           | -70                      | +300                     | 0                                 | -369 | +1255                   | -      | +610  |
| TRANSFERT    | +235 | ← combustion → -261            |                          |                          |                                   |      |                         | (26)   |       |
| PAR          |      | hydrogène H <sub>2</sub>       |                          |                          |                                   |      |                         |        |       |
| CONVERSIONS  | + 71 | ← chauffage électrique → - 101 |                          |                          |                                   |      |                         | (30)   |       |
|              |      | + 70                           | ← chauff. électr. → - 75 |                          |                                   |      |                         |        | (5)   |
|              |      |                                | + 70                     | ← chauff. électr. → - 75 |                                   |      |                         |        | (5)   |
|              |      |                                |                          | + 130                    | ← hydrogène H <sub>2</sub> → -185 |      |                         |        | (55)  |
|              |      |                                |                          |                          |                                   | +369 | ← H <sub>2</sub> → -527 | (158)  |       |
| TOTAL        | 0    | 0                              | 0                        | +39                      | 0                                 | 0    | +292                    | (279)  | +331  |

Répartition finale des énergies distribuées à long terme en Alsace.

Les ouvertures sont de deux ordres : techniques (le progrès technique permet d'envisager de nouveaux procédés et de meilleurs rendements) et politiques (comment passer de la situation actuelle à celle décrite ; y a-t-il d'autres possibilités). Elles demandent une grande ouverture d'esprit. Les élèves connaissent en général beaucoup de choses au sujet des techniques de pointes, mais les notions de temps, d'investissements ne leur sont pas familières.

Pour que chacun puisse tirer le maximum d'intérêt et de profit de ce travail, l'équipe éducative doit pouvoir donner le maximum de documents photocopiés (extraits de revues, journaux ; tableaux statistiques ; fiches d'exercices) aux élèves, et se procurer les outils pédagogiques nécessaires tels que livres, diapositives, films, bandes vidéo.

Enfin, l'élaboration de PAE avec réalisations pratiques, visites, rencontres sur les thèmes énergétiques est, d'expérience, le meilleur moyen pour motiver les élèves et les former à un sujet aussi complexe et multiforme.

## B. ANNEXE

---

### QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION DES CALCULS ENERGETIQUES

#### Préambule.

Les exemples qui suivent concernent tous les niveaux lycée et supérieur. Ils sont présentés par ordre logique pour amener le lecteur du stade général (ordres de grandeurs) au stade particulier (calcul d'installation).

#### 1. RAYONNEMENT SOLAIRE.

La loi de STEFAN permet de connaître la puissance  $P$  rayonnée par un corps noir de surface  $S$ , de température  $T$  :

$$P = S \sigma T^4 \quad (\sigma, \text{ constante de STEFAN, vaut } 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4).$$

En supposant que le Soleil rayonne comme un corps noir de rayon  $R_S$  égal à 700 000 km, à une température de 5800 K, on peut calculer la puissance  $P_r$  reçue par la Terre dans l'angle solide

$$\text{qu'elle occupe, soit : } \Omega = \frac{\pi R_T^2}{d^2}, \text{ où } R_T \text{ est le rayon de la Terre}$$

et  $d$  la distance Terre - Soleil moyenne :

$$(R_T = 6\,400 \text{ km ; } d = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km})$$



$$P_r = \frac{P}{4\pi} \cdot \Omega = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ kW.}$$

Ceci représente une puissance moyenne de  $675 \text{ W/m}^2$  sur la demi-sphère éclairée du globe (soit  $P_r/2\pi R_T^2$ ), c'est-à-dire  $1350 \text{ W/m}^2$  (4) en haute atmosphère (c'est la constante solaire  $\bar{M}$  correspondant à la puissance reçue par une surface unitaire perpendiculaire à la direction du rayonnement solaire, soit  $P_r/\pi R_T^2$ ), et environ  $1 \text{ kW/m}^2$  au sol par beau temps en été dans nos régions.

## 2. ENERGIE SOLAIRE ANNUELLE.

On peut se servir des données météorologiques disponibles, en distinguant l'*ensoleillement* (nombre d'heures pendant lesquelles le Soleil est visible pendant l'année), évalué à 1 802 heures à Mulhouse et 2 917 heures à Toulon, et le *rayonnement global* (direct + diffus) capté sur un mètre carré de surface.

On mesure ainsi l'*énergie* totale annuelle reçue; elle vaut 1 183 kWh à Strasbourg et 1 525 kWh à Marseille par mètre carré de surface horizontal.

Ces chiffres permettent d'évaluer simplement l'ordre de grandeur de l'énergie annuelle reçue nationalement ou régionalement, et de le comparer aux consommations annuelles des populations.

Exemple : l'Alsace reçoit en moyenne  $1\,220 \text{ kWh/m}^2$ ; sa superficie étant de  $8\,310 \text{ km}^2$ , l'énergie solaire annuelle qu'elle reçoit est donc de 870 MTEP (en prenant l'équivalent physique 1 TEP = 11 600 kWh), que l'on compare aux 5,4 MTEP consommés annuellement en Alsace.

## 3. ENERGIE THERMIQUE DU GLOBE TERRESTRE.

Si l'on considère la Terre comme un corps noir en équilibre thermique avec le rayonnement solaire, elle rayonne donc la même puissance qu'elle reçoit du Soleil. La loi de STEFAN donne alors la température superficielle de la Terre (température de rayonnement) :

$$P_r = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4 \quad \text{d'où} \quad T_T = \left( \frac{T_S^4 \cdot R_S^2}{4 d^2} \right)^{1/4} = 280 \text{ K,}$$

soit  $7^\circ\text{C}$ , résultat très proche de la réalité.

---

(4) Les estimations de cette constante ont fluctué de  $1\,381 \text{ W/m}^2$  en 1950 à  $1\,353 \text{ W/m}^2$  en 1960. Les dernières mesures réalisées par satellite donnent une valeur de  $1\,367 \text{ W/m}^2 \pm 6 \text{ W/m}^2$ , soit moins de 1 % en sus de la valeur calculée.

Néanmoins, la réalité est plus complexe, et le régime thermique du globe est largement modifié par le véritable moteur thermique que constitue l'atmosphère.

#### 4. FLUX GÉOTHERMIQUE TERRESTRE.

La Terre émet constamment vers l'extérieur un flux de chaleur, régulier dans le temps, mais irrégulier selon les endroits de l'écorce, qui s'établit en moyenne à  $5 \cdot 10^{-2}$  W/m<sup>2</sup>. Ceci représente une puissance totale rayonnée de  $2,5 \cdot 10^{10}$  kW (5), soit  $5 \cdot 10^{10}$  TEP par an (la consommation mondiale d'énergie est d'environ  $1,3 \cdot 10^{10}$  TEP/an.)

La loi de STEFAN nous permet, par dérivation, de calculer quelle influence peut avoir ce flux sur la température de rayonnement du corps noir Terre, c'est-à-dire quelle élévation de température il provoque :

$$P_r = S \sigma T_T^4 \quad \text{d'où} \quad \Delta P_r \approx \frac{dP_r}{dT_T} \cdot \Delta T_T$$

$$\text{soit : } \Delta P_r \approx \frac{4 P_r}{T_T} \cdot \Delta T_T, \quad \Delta P_r \text{ étant très petit par rapport à } P_r.$$

Ceci donne :

$$\Delta T_T \approx \frac{T_T \cdot \Delta P_r}{4 P_r} = \frac{280 \times 2,5 \cdot 10^{13}}{4 \times 1,8 \cdot 10^{17}} \approx 0,01^\circ \text{C}.$$

Ceci montre la faible importance du flux d'origine interne comparé au flux d'origine solaire.

#### 4. CALCUL DU GRADIENT GÉOTHERMIQUE.

Soit  $\vec{j}$  le flux de chaleur par unité de surface, en W.m<sup>-2</sup>, issu de l'intérieur du globe. On peut considérer qu'il est provoqué par l'existence d'un gradient de température, supposé uniforme, tel que  $\vec{j} = -K \vec{\text{grad}} T$  où K, conductibilité thermique de l'écorce, est un tenseur. Si l'on ramène K à un coefficient moyen de  $2,09 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour les roches de l'écorce terrestre, et que le

gradient se réduit à  $\frac{\partial T}{\partial z}$  (z étant la profondeur), on obtient une valeur théorique de ce gradient :

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{5 \cdot 10^{-2}}{2,09} = -2,4 \cdot 10^{-2} \text{ K.m}^{-1}$$

---

(5) A comparer avec la puissance reçue du Soleil ( $1,7 \cdot 10^{14}$  kW) ou celle des marées ( $3 \cdot 10^9$  kW).

assez proche de la réalité, puisque sa valeur moyenne sur la Terre est de  $3^\circ\text{C}/100\text{ m}$  de profondeur.

### 5. MODÈLE DE REFROIDISSEMENT DU GLOBE.

L'équation de chaleur d'un volume de matière de masse volumique  $\rho$ , de chaleur massique  $c$ , traversé par un flux de chaleur  $\vec{j}$  (chaleur traversant par unité de temps une surface unitaire placée perpendiculairement à la direction de l'écoulement de la chaleur) est :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{j} = -\operatorname{div} (-K \vec{\operatorname{grad}} T) = K \Delta T \quad (\Delta = \text{Laplacien}).$$

Considérons la Terre comme une sphère homogène, initialement à une température  $T_0$ , et dont la surface a été depuis lors maintenue à  $273\text{ K}$ . L'équation restant valable en température Celsius, on la transpose en coordonnées sphériques :

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = \frac{K}{r} \frac{\partial^2 r\theta}{\partial r^2}$$

$$\text{ou encore : } \frac{\partial r\theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 r\theta}{\partial r^2} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{K}{\rho c}.$$

En posant  $r\theta = A \cdot f(t) \cdot g(r)$ , on obtient des solutions générales du type  $r\theta = A \cdot e^{\alpha_1 t + \beta_1} \cdot e^{\alpha_2 r + \beta_2}$  avec  $\alpha_1 = \alpha \cdot \alpha_2^2$ . Les conditions aux limites imposées et la linéarité de l'équation permettent d'écrire les solutions satisfaisantes sous la forme :

$$r\theta = A \sin br \cdot e^{-\alpha b^2 t} \quad \text{car} \quad \theta = 0^\circ\text{C} \quad \forall t \text{ lorsque } r = R_T.$$

Toute combinaison linéaire de ces solutions est donc également solution, particulièrement toute suite du type :

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin b_n r}{r} \cdot e^{-\alpha b_n^2 t}.$$

La suite devant converger lorsque  $r$  tend vers 0 (la température est définie) quelque soit  $t$ , et particulièrement à  $t = 0$ ,

les coefficients  $b_n$  s'écrivent  $b_n = \frac{n\pi}{R_T}$ , et les coefficients

$$A_n = -(-1)^n \frac{R_T \theta_0}{\pi n^2 \ln 2} \quad \text{donnent une suite convergente répon-}$$

dant aux conditions imposées,  $\theta_0$  étant la température initiale au centre du globe. En admettant l'unicité de la solution ainsi obtenue, correspondant aux conditions physiques uniques que l'on s'est fixé, nous obtenons donc pour la température de refroidissement la forme mathématique suivante :

$$\vartheta = \frac{-R_T \cdot \vartheta_0}{\pi r \cdot \ln 2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \sin \frac{n \pi r}{R_T} \cdot e^{-\alpha \frac{n^2 \pi^2 t}{R_T^2}}.$$

La valeur du gradient actuel en surface ( $r = R_T$  et  $t = 4,7$  milliards d'années) permet de trouver la valeur de  $\vartheta_0$ , soit  $57\,600^\circ\text{C}$ , qui, reportée dans l'équation de  $\vartheta$ , nous donnerait pour valeur actuelle de la température au centre du globe  $57\,300^\circ\text{C}$  ! La conclusion s'impose d'elle-même :

- le modèle d'une sphère homogène de même composition que l'écorce terrestre se refroidissant progressivement par rayonnement dans l'espace jusqu'à l'état actuel ne peut absolument pas se rendre compte de l'histoire thermique du globe. C'est pourtant sur un tel modèle que Lord KELVIN s'était appuyé pour affirmer que la Terre n'était âgée que de 40 millions d'années ;
- le refroidissement du globe par rayonnement n'aurait provoqué qu'une baisse très lente des températures au centre du globe. Par conséquent, la Terre est beaucoup trop jeune pour que les conditions thermiques en son centre aient une réelle influence à sa surface.

On sait aujourd'hui que l'origine du flux géothermique est multiple : radioactivité des roches de l'écorce, énergie de cristallisation, tectonique des plaques, circulations magmatiques et d'eau, énergie d'accrétion, etc. On peut évaluer celle-ci facilement comme nous allons le voir.

#### 6. ENERGIE DE CONDENSATION A LA FORMATION DE LA TERRE.

Si l'on considère que la Terre s'est formée par accrétion progressive de matière venant de l'infini, on peut calculer l'énergie gravitationnelle du globe en cherchant d'abord l'expression du travail élémentaire nécessaire pour amener une masse  $dm$  jusqu'à la surface de la sphère de masse  $m$  et de rayon  $r$  :

$$\begin{aligned} dW &= \int_{\infty}^r F_{m, dm} \cdot dr' \\ &= \int_{\infty}^r - \frac{Gm dm}{r'^2} dr' \\ &= \varrho G \frac{4}{3} \pi r^2 dm \quad (\varrho \text{ étant la masse volumique de la Terre}) \\ &\quad \text{soit } 5,51 \cdot 10^3 \text{ kg. m}^{-3} \end{aligned}$$

Puis,

$$\begin{aligned} W &= \int_{r=0}^{r=R} dW \\ &= \frac{16}{15} \pi^2 \varrho^2 G R^5 \\ &= 2,24 \cdot 10^{32} \text{ J.} \end{aligned}$$

Une telle énergie accumulée dans une masse  $M_T = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ , de chaleur massique  $c = 700 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (écorce) aurait porté la Terre à  $53\,600^\circ\text{C}$ . Il est évident que la formation même de la Terre s'est étalée sur des milliards d'années, ce qui modifie le modèle simple adopté ; qu'à mesure de la condensation, l'énergie ainsi accumulée dans la matière a pu se dissiper en partie sous forme de rayonnement et se transformer aussi en énergie potentielle élastique et en énergie cinétique de rotation. Néanmoins, ce calcul montre la puissance des forces de gravitation responsables de la formation et de la naissance des étoiles portées à des températures de 12 millions de degrés.

#### 7. DÉTERMINATION D'UNE SURFACE DE CAPTATION SOLAIRE.

L'énergie annuelle, pour chauffer un logement de volume  $V$ , de coefficient d'isolation  $G$  (6), en un lieu où le nombre de degrés-jours unifié est DJU (7), est donnée par  $Q = 24 \cdot G \cdot V \cdot \text{DJU}$ .

Si  $\eta$  est le rendement des capteurs solaires (compte tenu du stockage été-hiver),  $A$  la surface de captation, et  $E$  l'énergie annuelle solaire par  $\text{m}^2$  reçue au lieu considéré, on peut calculer  $A$  en posant :

$$A \cdot \eta \cdot E = Q = 24 \cdot G \cdot V \cdot \text{DJU}$$

exemple : pour l'Alsace,  $\text{DJU} \approx 2\,948$  ;  $E \approx 1\,220 \text{ kWh/m}^2$  ;  $G = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  ;  $\eta = 0,4$ .

On obtient, pour un logement de  $100 \text{ m}^2$ ,  $250 \text{ m}^3$  :  $A = 36 \text{ m}^2$ .

Cette surface peut être constituée de vitrages passifs et de capteurs-plans à fluide, ou de capteurs cylindro-paraboliques (chauffage collectif).

---

(6)  $G$  mesure la déperdition thermique globale d'un logement dû à l'écart de température entre intérieur et extérieur. Ainsi, pour un écart  $\vartheta_i - \vartheta_e + 1^\circ\text{C}$ , et pour  $1 \text{ m}^3$  de logement, il s'échappe chaque seconde  $G$  joules de chaleur. Plus le logement est isolé, plus  $G$  est petit.

(7) Il représente la durée annuelle de chauffe au lieu considéré.

**Remarque :**

Si la maison est isolée (non raccordable à un réseau de chauffage solaire collectif), le calcul doit s'effectuer sur le mois le plus froid de l'année, avec le DJU de ce mois,  $E$  du mois et  $\eta$  avec stockage de 15 jours environ. Les surfaces sont alors plus importantes (environ 80 m<sup>2</sup> en Alsace).

**8. STOCKAGE DE CHALEUR SOLAIRE PAR « SELS FONDUS ».**

La chliarolithe est un corps minéral mis au point par le C.N.R.S. et l'I.N.R.A., et composé de chlorure de calcium hexahydraté, d'un stabilisant minéral et de germes épitaxiques. Ses caractéristiques physiques principales sont :

|                           |                                                              |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------|
| température de fusion     | 28 °C                                                        |
| chaleur latente de fusion | 134 kJ.kg <sup>-1</sup>                                      |
| conductibilité thermique  | 0,5 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> (liquide ou solide)   |
| chaleur massique          | 2,51 kJ.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> (liquide ou solide) |

On l'utilise pour absorber la chaleur solaire basse température (fusion) et la restituer en l'absence de soleil (cristallisation).

Exemple : calculer la quantité de chaleur que peuvent absorber 13,5 t de chliarolithe entre 15 et 30 °C.

$$Q = m [c (\vartheta_2 - \vartheta_1) + L_f]$$

$$= 2,32 \cdot 10^9 \text{ J, soit } 7 \cdot 10^{-3} \text{ TEP.}$$

Il aurait fallu environ 37 t d'eau pour stocker la même chaleur. Ces 13,5 t de chliarolithe sont utilisées pour le stockage de chaleur d'une serre d'horticulture de 125 m<sup>2</sup> pour laquelle un chauffage traditionnel consommerait 35 l de fuel par m<sup>2</sup> et par an. L'économie réalisée par ce stockage solaire est donc d'environ 75 %. Cette installation fonctionne à La Gaude (Alpes-Maritimes) sous le contrôle du C.N.R.S. et de l'I.N.R.A.

**9. CHAUFFAGE GÉOTHERMIQUE.**

L'eau chaude d'un réservoir géothermique de température  $\vartheta_c$  est pompée par le puits de production ; elle cède de la chaleur à un circuit de chauffage urbain par l'intermédiaire d'un échangeur à plaques de titane, et elle est réinjectée dans la nappe à une température  $\vartheta_f$  à environ 1 km du point de soutirage. Ceci fonctionne en continu.

Si  $D$  est le débit d'exhaure (en m<sup>3</sup>/h), la puissance de l'installation géothermique est :

$$P = \frac{\eta \cdot D \cdot c}{3,6} (\vartheta_c - \vartheta_f)$$

avec  $\eta$  rendement de l'installation,  $c$  chaleur massique de l'eau.

Exemple :  $D = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\eta = 0,9$ ,  $\vartheta_c = 95^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_f = 45^\circ\text{C}$ .  
On obtient :  $P = 10,5 \text{ MW}$ .

Les impératifs de rentabilité économique imposent qu'en moyenne la puissance géothermique représente environ 40 % de la puissance totale maximale des logements desservis, pour couvrir 80 % de leurs besoins annuels en chauffage.

Comme la puissance maximale nécessaire pour chauffer un logement de volume  $V$ , de coefficient d'isolation  $G$ , de température intérieure  $\vartheta_{int}$ , pendant le mois le plus froid est :

$$p_0 = V [G (\vartheta_{int} - \vartheta_0) + a]$$

où  $\vartheta_0$  est la température la plus basse du mois apparue 5 fois dans ce mois et  $a$  un coefficient tenant compte du chauffage sanitaire (couramment 1,12), on peut calculer le nombre  $n$  de logements desservis par géothermie :

$$n = \frac{P}{0,4 \cdot p_0}.$$

Exemple :  $\vartheta_{int} = 19^\circ\text{C}$ ;  $\vartheta_0 = -5^\circ\text{C}$ ;  $G = 1$ ;  $V = 250 \text{ m}^3$ ;  
 $P = 10,5 \text{ MW}$ . On trouve  $n \approx 4\,200$  logements.

#### 10. PUISSANCE D'UNE RIVIÈRE OU D'UN FLEUVE.

10 usines hydroélectriques sont installées sur le Rhin, entre Kembs (244,26 m de cote) et Iffezheim (cote 123,6 m). Le débit moyen du Rhin est de  $1\,040 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Si le rendement d'une turbine est de 90 %, celui d'un alternateur 98 % ainsi que celui d'un transformateur, il est aisé de calculer la puissance électrique moyenne des 10 usines et l'énergie électrique moyenne qu'elles peuvent fournir annuellement :

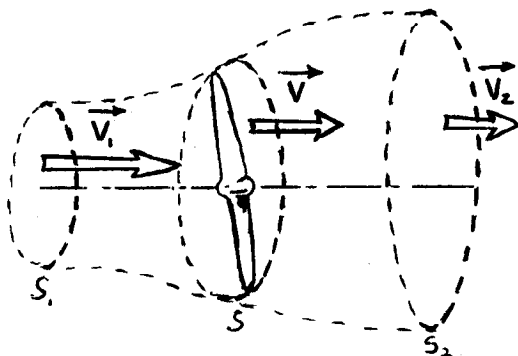
$$P = 1,06 \cdot 10^9 \text{ W} \quad \text{et} \quad E = 9,28 \cdot 10^9 \text{ kWh} \quad \text{soit} \quad 2,06 \text{ MTEP.}$$

A titre de comparaison, l'Alsace consomme en moyenne 1,4 MTEP d'électricité par an.

#### 11. THEOREME DE BETZ.

Soit une hélice d'éolienne à axe horizontal placée dans un flux uniforme et constant d'air parallèle à son axe, de vitesse incidente  $V_1$ . Au passage de l'hélice balayant une surface  $S$ , ce flux perd une partie de son énergie cinétique et sa vitesse après passage est  $V_2 < V_1$ .

Considérons le système formé par l'ensemble des molécules d'air contenues dans le tube d'air, centré sur l'axe de l'hélice, de section circulaire  $S_1$  en amont de l'hélice,  $S$  au passage de



l'hélice (S étant la surface balayée par l'hélice) et  $S_2$  en aval ; le tube d'air est tel que le flux des molécules d'air à travers les parois latérales est nul, la vitesse moyenne des molécules leur étant parallèles en tout point, à tout instant.

La section  $S_1$  est à une distance suffisante de l'hélice pour que les molécules la traversant aient une vitesse moyenne  $\vec{V}_1$  perpendiculaire à elle et égale à la vitesse du vent incident. De même,  $S_2$  est suffisamment éloignée pour que les molécules la traversant aient atteint leur vitesse finale  $\vec{V}_2$  (supposée constante jusqu'à l'infini).

Aux vitesses de vent habituelles, l'air peut être considéré comme incompressible, et donc de masse volumique constante au cours du passage du disque éolien.

On considère le régime stationnaire établi, c'est-à-dire que l'écoulement fluide est permanent, la distribution des vitesses restant fixe au cours du temps.

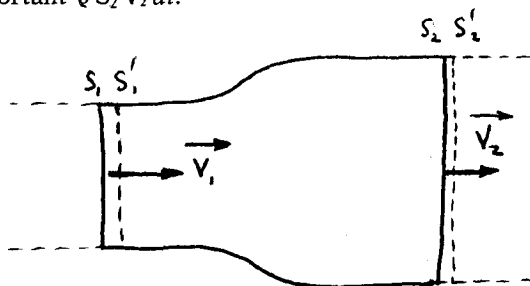
Le système ainsi défini, écrivons qu'il n'y a pas accumulation d'air dans le tube, et à aucun endroit de celui-ci ;  $dm$  étant la masse d'air élémentaire entrant dans le tube entre les instants  $t$  et  $t' = t + dt$ , il vient :

$$\left| \frac{dm}{dt} \right| = \rho S_1 V_1 = \rho S_2 V_2 = \rho S V.$$

Entre  $t$  et  $t'$ , la variation de la quantité de mouvement du système est :  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{dm}{dt} (\vec{V}_2 - \vec{V}_1)$  car tout se passe comme



si la masse  $\frac{dm}{dt}$  était passée du volume entrant  $\varrho S_1 V_1 dt$  au volume sortant  $\varrho S_2 V_2 dt$ .



D'après le théorème d'EULER, la dérivée (particulière) du torseur  $[Q]$  des quantités de mouvement du système est égale au torseur  $[F]$  des forces extérieures appliquées au système :

$$[F] = \frac{d[Q]}{dt} \quad (1), \quad \text{avec} \quad [Q] = \iiint [\varrho \vec{v}] dV.$$

La résultante des forces de pression étant nulle sur toute la surface du tube, la seule force extérieure à prendre en considération est celle qu'exerce le disque éolien sur la masse d'air contenue dans le tube. C'est une force répartie sur l'ensemble du disque, et dont la résultante centrée sur l'axe du disque est dirigée vers l'amont. D'après (1),  $\vec{F}$  a pour expression :

$$\vec{F} = \varrho S V (\vec{V}_2 - \vec{V}_1).$$

D'après le principe de l'action et de la réaction, le disque éolien subit donc une force  $\vec{F}_r = -\vec{F}$  de la part de l'air. La puissance mécanique  $P_r$  reçue sur la vitesse de l'hélice est donc égale et opposée à celle de  $\vec{F}$ , dont le point d'application se déplace à la vitesse  $-\vec{V}$  par rapport à l'air (force résistante) :

$$\begin{aligned} P_r &= -\vec{F} \cdot \vec{V} \\ &= \varrho S V^2 (V_1 - V_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique au système entre  $t$  et  $t'$ . Par unité de temps, la variation d'énergie cinétique

du système est donc :  $dE_c = \frac{1}{2} dm (V_2^2 - V_1^2)$ , égale au tra-

vail de la force extérieure  $\vec{F}$  (les forces intérieures étant nulles du fait de l'incompressibilité de l'air).

Il vient :

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2)$$

et :

$$\begin{aligned} \frac{dE_c}{dt} &= \vec{F} \cdot \vec{V} \\ &= \rho S V^2 (V_2 - V_1). \end{aligned}$$

D'où :

$$\frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2) = \rho S V^2 (V_2 - V_1).$$

Il en résulte que  $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$ , et que la puissance reçue par l'éolienne est :

$$P_r = \frac{\rho S}{4} (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2).$$

Cette puissance est maximale, pour  $V_1$  donnée, lorsque  $\frac{\partial P}{\partial V_2}$  est nulle, soit :  $-2 V_1 V_2 + V_1^2 - 3 V_2^2 = 0$  d'où  $V_2 = -V_1$  (cette solution n'a pas de sens physique) ou  $V_2 = \frac{V_1}{3}$  (seule solution valable). Ceci entraîne alors :  $P_{max} = \frac{8 \rho}{27} S V_1^3$ , soit :

$$P_{max} = 0,37 S V_1^3,$$

$\rho$  étant égale à 1,25 kg. m<sup>-3</sup>.

On remarquera que :

$$\begin{aligned} P_{max} &= \frac{8}{9} \left( \frac{1}{3} \rho S V_1^3 \right) \\ &= \frac{8}{9} \left( \frac{1}{2} \rho S_1 V_1^3 \right) \text{ car } V = \frac{2 V_1}{3} \text{ et } S_1 V_1 = S V. \end{aligned}$$

Par conséquent, l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par une éolienne ne peut en aucun cas dépasser les 8/9 de l'énergie cinétique de la masse d'air la traversant.

On peut ainsi calculer la puissance d'une éolienne de surface  $S$  dans un vent de  $V \text{ m.s}^{-1}$ , compte tenu d'un rendement de 70 % (les meilleurs éoliennes actuelles atteignent 82 % de la limite de BETZ). Ainsi, si  $D = 10 \text{ m}$ ,  $V = 10 \text{ m/s}$ , on trouve  $P \approx 20 \text{ kW}$ .

Quant à l'énergie maximale susceptible d'être recueillie annuellement par  $\text{m}^2$  d'éolienne (surface balayée) sur un site donné, elle est obtenue par l'intégration :

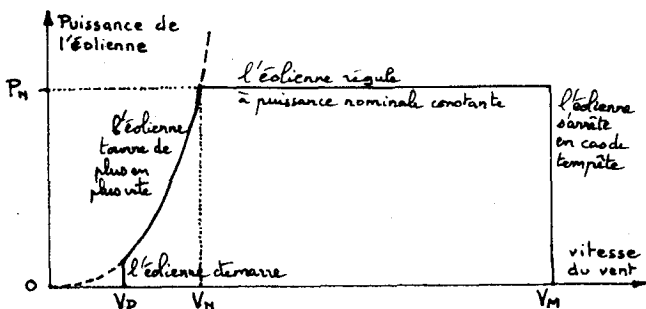
$$E_{\max} = 0,37 \int_{1 \text{ an}} V^3(t) dt$$

où  $V(t)$  est la vitesse instantanée du vent observée à l'instant  $t$ .

Les relevés météorologiques se faisant par tranches de 10 min sur toute l'année, et le classement des vitesses par tranches de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , si l'on appelle  $f_i$  la fréquence (en %) à laquelle est observée la vitesse  $\bar{V}_i$  pendant l'année, on obtient en pratique :

$$E_{\max} \approx \sum_i 0,37 \times 24 \times 365 \times f_i \times \left( \frac{V_i}{10} \right)^3 \text{ en kWh/m}^2 \times \text{an.}$$

Mais ce n'est qu'un potentiel théorique maximal. En réalité, un aérogénérateur commence à tourner lorsque  $V \geq V_D$  (vitesse de démarrage), puis sa vitesse de rotation croît proportionnellement avec  $V$ , et reste ensuite constante si  $V \geq V_N$ , vitesse nominale de fonctionnement de l'éolienne (régulation nécessaire au fonctionnement optimal d'un alternateur). Ensuite, si  $V \geq V_M$  (vitesse de tempête), l'éolienne s'arrête (mise en drapeau, effacement).



L'énergie réellement utilisable pour la production d'électricité est donc, par  $\text{m}^2$  de surface d'éolienne,

$$E = \int_{V_D}^{V_N} 0,37 \eta V^3 dt + 0,37 \eta V_N^3 \int_{V_N}^{V_M} dt.$$

On simplifie ce calcul en se ramenant à la formule suivante :

$$E (\text{kWh}) = 0,37 \eta S \left( \frac{V_N}{10} \right)^3 \Delta t$$

où  $\Delta t$  est le nombre d'heures équivalent de fonctionnement à vitesse nominale calculé sur l'année.

Ainsi, avec  $D = 10$  m,  $V_N = 10$  m/s,  $\Delta t = 2\,500$  heures,  $\eta = 0,7$ , on trouve  $E \approx 50\,850$  kWh/an.

Si l'on utilise une éolienne pour chauffer directement le fluide d'un chauffage central d'une habitation, en couplant le rotor d'hélice à un convertisseur mécano-thermique, il n'y a alors pas besoin de réguler la vitesse de rotation de l'hélice, car la puissance absorbée par un tel convertisseur est elle aussi proportionnelle à  $V^3$  quelle que soit  $V$  et convertie avec un rendement proche de 100 % en chaleur. C'est donc l'utilisation la plus rationnelle physiquement de l'énergie éolienne, d'autant plus que le vent souffle toujours davantage en hiver qu'en été.

---