



**fondation  
universitaire  
luxembourgeoise**  
asbl  
avenue de Longwy, 185  
B - 6700 ARLON (Belgique)  
tél 00 32 (0)63/215811  
fax 00 32 (0)63/215800

J. NICOLAS

# PRODUCTION D'ENERGIE ET ENVIRONNEMENT

J. NICOLAS

Juillet 1993.

7 ajouter numéros + sous-bibliographie

1.LES COMBUSTIBLES FOSSILES.....	1
1.1.GENERALITES.....	1
1.1.1.Genèse.....	1
1.1.2.Exploitation des gisements.....	1
1.1.3.Structure et composition.....	2
1.1.4.Autres caractéristiques.....	2
1.1.5.Combustion.....	2
1.2.LE CHARBON.....	4
1.2.1.Caractéristiques.....	4
1.2.2.Production et préparation.....	4
1.2.3.Transport.....	5
1.2.4.Utilisation.....	5
1.2.5.Impact environnemental.....	6
1.2.6.En résumé.....	7
1.3.LA TOURBE.....	8
1.3.1.Caractéristiques.....	8
1.3.2.Production et préparation.....	8
1.3.3.Transport.....	8
1.3.4.Utilisation.....	8
1.3.5.Impact environnemental.....	8
1.3.6.En résumé.....	9
1.4.LE PETROLE.....	10
1.4.1.Caractéristiques.....	10
1.4.2.Production et préparation.....	10
1.4.3.Transport.....	11
1.4.4.Utilisation.....	11
1.4.5.Impact environnemental.....	12
1.4.6.En résumé.....	13
1.5.LE GAZ NATUREL.....	14
1.5.1.Caractéristiques.....	14
1.5.2.Production et préparation.....	15
1.5.3.Transport.....	15
1.5.4.Utilisation.....	16
1.5.5.Impact environnemental.....	16
1.5.6.En résumé.....	16
2.ENERGIES RENOUVELABLES.....	17
2.1.GENERALITES.....	17
2.1.1.Genèse.....	17
2.1.2.Exploitation du gisement.....	18
2.2.LE SOLAIRE THERMIQUE.....	19
2.2.1.Caractéristiques.....	19
2.2.2.Production et préparation.....	19
2.2.3.Transport.....	20
2.2.4.Utilisation.....	20
2.2.5.Impact environnemental.....	21
2.2.6.En résumé.....	21
2.3.LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	22
2.3.1.Caractéristiques.....	22
2.3.2.Production et préparation.....	22
2.3.3.Transport.....	23
2.3.4.Utilisation.....	23
2.3.5.Impact environnemental.....	24
2.3.6.En résumé.....	24
2.4.L'ENERGIE EOLIENNE.....	25
2.4.1.Caractéristiques.....	25
2.4.2.Production et préparation.....	26
2.4.3.Transport.....	26
2.4.4.Utilisation.....	27
2.4.5.Impact environnemental.....	27
2.4.6.En résumé.....	28

2.5.ENERGIE HYDRAULIQUE.....	29
2.5.1.Caractéristiques.....	29
2.5.2.Production et préparation.....	29
2.5.3.Transport.....	30
2.5.4.Utilisation.....	30
2.5.5.Impact environnemental.....	30
2.5.6.En résumé.....	31
2.6.L'ENERGIE DES MAREES.....	32
2.6.1.Caractéristiques.....	32
2.6.2.Production et préparation.....	32
2.6.3.Transport.....	33
2.6.4.Utilisation.....	33
2.6.5.Impact environnemental.....	33
2.6.6.En résumé.....	34
2.7.LA BIOMASSE.....	35
2.7.1.Caractéristiques.....	35
2.7.2.Production et préparation.....	35
2.7.3.Transport.....	36
2.7.4.Utilisation.....	37
2.7.5.Impact environnemental.....	37
2.7.6.En résumé.....	38
2.8.LE BOIS.....	39
2.8.1.Caractéristiques.....	39
2.8.2.Production et préparation.....	39
2.8.3.Transport.....	40
2.8.4.Utilisation.....	40
2.8.5.Impact environnemental.....	40
2.8.6.En résumé.....	41
2.9.BIO-CARBURANTS.....	42
2.9.1.Caractéristiques.....	42
2.9.2.Production et préparation.....	43
2.9.3.Transport.....	43
2.9.4.Utilisation.....	43
2.9.5.Impact environnemental.....	44
2.9.6.En résumé.....	44
3.TECHNOLOGIES DU FUTUR.....	45

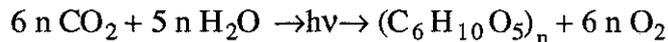
## 1. LES COMBUSTIBLES FOSSILES.

### 1.1. GÉNÉRALITÉS.

#### 1.1.1. Genèse.

L'origine commune des combustibles fossiles conventionnels (tourbe, lignite, charbon, gaz naturel) et non conventionnels (schistes bitumeux, sables asphaltiques) est la matière organique synthétisée par les végétaux (photosynthèse). Cette synthèse chlorophyllienne implique à la fois l'existence de la matière première de base, le CO<sub>2</sub> et l'eau, et la disponibilité d'une quantité suffisante d'énergie sous la forme adéquate, c'est-à-dire un rayonnement lumineux de longueur d'onde comprise dans l'intervalle 400 à 700 nm.

En réalité, la réaction de synthèse, écrite globalement pour la cellulose :



cache une réalité plus complexe.

Le mécanisme de la photosynthèse est soumis à certaines contraintes strictes qu'on ne domine pas encore entièrement à l'heure actuelle.

La plus grande partie de la matière organique formée par photosynthèse est finalement redécomposée par des microorganismes (bactéries, champignons, ...). Si cette décomposition a lieu en milieu anaérobie, la structure de la matière organique est peu modifiée. C'est ce qui a lieu dans le fond de la mer : la décomposition anaérobie des vases et alluvions est à l'origine des pétroles.

Sur terre, les végétaux recouverts de sédiments deviendront finalement de la houille.

La distinction, en bout de chaîne, entre houilles et pétroles réside donc essentiellement dans le degré de dispersion de la matière organique de base. Après la première phase d'évolution, la matière organique, appauvrie en oxygène est appelée kérogène à l'état dispersé et tourbe à l'état d'amas.

Au cours de l'évolution géologique ultérieure, l'enfouissement va se poursuivre sous de nouvelles couches de sédiments pouvant atteindre finalement des milliers de mètres d'épaisseur, là où la température est plus élevée.

C'est au cours de cette seconde étape que le kérogène donnera naissance au pétrole et au gaz naturel et la tourbe au charbon et au grisou.

En effet, à haute température, les parties moins stables des produits sont éliminées (cracking) et cela peut donner naissance d'abord à des produits liquides, puis à des produits gazeux ou à des hydrocarbures légers.

Malgré ces transformations, la structure générale de tous ces produits reste similaire.

Cependant, seule une petite fraction de la matière vivante initiale possède à l'état naturel, dès le départ, une structure proche de celle des produits pétroliers : il s'agit par exemple d'acides gras (huiles végétales naturelles).

#### 1.1.2. Exploitation des gisements.

Alors que les amas de charbon, plus ou moins affectés par des accidents tectoniques, restent exploitables sur le lieu-même de leur formation, les matières issues d'altérations, comme la tourbe, restent dispersées dans leurs roches-mères, rendant leur exploitation quasi impossible.

Le charbon peut être exploité à ciel ouvert ou par puits et galeries. Les combustibles liquides et gazeux (pétrole et gaz naturels), eux, peuvent être exploités plus facilement par forage.

### 1.1.3. Structure et composition.

La structure des combustibles fossiles a une complexité croissante à mesure que l'on passe des gaz aux liquides, puis aux solides.

Le gaz naturel est surtout formé de méthane ou  $\text{CH}_4$  (teneur > 80 %). Il est dit sec si la proportion de méthane dépasse 99 % environ. Il est dit humide s'il contient des proportions notables d'homologues "supérieurs" (ou alcanes, de formule générale  $\text{C}_n \text{H}_{2n+2}$ ); ceux-ci peuvent être extraits par dégazolinage (lavage, réfrigération, etc.).

Le pétrole est essentiellement un mélange d'hydrocarbures plus ou moins saturés, appartenant aux séries aliphatiques et aromatiques, de formule générale  $\text{C}_n \text{H}_{2n}$  ou  $\text{C}_n \text{H}_{2n+2}$ , beaucoup plus complexe que le méthane. De plus, ce mélange est accompagné de dérivés organiques oxygénés, sulfurés et azotés.

En ce qui concerne le charbon, la structure est encore beaucoup plus complexe : il s'agit d'un réseau où s'enchevêtrent les noyaux benzéniques entourés de divers radicaux et reliés par des chaînes aliphatiques.

En résumé l'évolution de la matière vivante vers les combustibles nobles entraîne une variation parallèle de sa composition chimique qui peut notamment être caractérisée par une évolution des rapports atomiques H/C et O/C.

Les valeurs moyennes du rapport H/C pour le charbon, la tourbe, le pétrole et le gaz naturel sont respectivement de 0.8, 1.1, 1.7 et 3.9.

La teneur en matières volatiles est définie comme la fraction du combustible qui s'échappe lorsqu'il est soumis à une haute température à l'abri de l'air. Plus le degré dans le processus d'houillification est avancé, moins il y aura de matières volatiles.

### 1.1.4. Autres caractéristiques.

Tout combustible est en outre caractérisé par son pouvoir calorifique, c'est-à-dire la chaleur que peut dégager sa combustion complète. On l'exprime en unité d'énergie (Joule) par unité de quantité de combustible (kg pour les combustibles solides et liquides,  $\text{Nm}^3$  pour les combustibles gazeux). Il se détermine en principe à  $0^\circ \text{C}$ . Durant la mesure, l'eau contenue dans le combustible peut rester à l'état de vapeur ou être ramenée complètement à l'état liquide : on obtient respectivement les pouvoirs calorifiques inférieur (PCI) ou supérieur (PCS), la différence entre les deux étant la chaleur de vaporisation de l'eau.

On a l'habitude d'appeler pouvoir comburivore d'un combustible la quantité d'air comburant nécessaire et suffisante pour assurer la combustion complète de l'unité de quantité de combustible.

Le pouvoir fumigène est d'autre part la quantité de gaz produite par la combustion théorique de l'unité de quantité de combustible.

### 1.1.5. Combustion.

La combustion complète à l'air d'un combustible ne peut être envisagée que si l'air comburant fournit au moins la quantité stoechiométrique d'oxygène nécessaire (c'est pourquoi on pratique en général la combustion en excès d'air).

En général cette condition, même respectée, n'empêche pas l'existence, dans les fumées, de composés imbrûlés ou partiellement oxydés, également d'oxygène non utilisé, d'azote issu de l'air de combustion et des produits normaux de combustion : le  $\text{CO}_2$  et l'eau.

Ces deux derniers composés peuvent enfin former du CO et de l'hydrogène à température élevée.

Comme le combustible n'est ni pur, ni sec, on donne le nom de cendres aux composants minéraux incombustibles qui sont mélangés au combustible, comme certains sulfates, de l'alumine, ...

## 1.2. LE CHARBON.

### 1.2.1. Caractéristiques.

Les appellations commerciales des charbons sont variables selon le degré d'houillification (décomposition biologique). Rappelons que l'élévation de ce degré, au rang des charbons, se traduit par une élévation de la teneur en carbone, une diminution de l'indice de matières volatiles et de la teneur en oxygène.

Ce degré d'houillification conditionne, bien entendu, le pouvoir calorifique.

On considère

- les houilles, dont le pouvoir calorifique est supérieur à  $23.86 \text{ MJ.kg}^{-1}$
- les charbons bruns et lignites, en dessous de cette valeur.

Les houilles sont elles-mêmes classées en 7 catégories internationales, essentiellement pour des raisons techniques et commerciales :

catégorie I	: Anthracites, maigres anthraciteux (PS = $34 \text{ MJ/kg}$ )
catégorie II	: Maigres
catégorie III	: Quart-gras
catégorie IV	: Demi-gras
catégorie V	: Trois-quarts gras, gras, gras à coke et gras à gaz
catégorie VI	: Flambant gras
catégorie VII	: Flambant secs.

La densité du charbon est située entre 1.25 pour les "flambants secs" à 1.7 pour les anthracites.

La quantité de matières volatiles est située entre 3 à 45 % : le charbon est qualifié de maigre si ce taux est faible et flambant si ce taux est élevé.

Le taux de cendres (composées surtout de  $\text{Si O}_2$ ,  $\text{Al}_2 \text{O}_3$ ,  $\text{Ca O}$  et  $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ ) se situe aux alentours de 10 %.

### 1.2.2. Production et préparation.

Lorsque le charbon est peu profond, il est exploité à ciel ouvert. Les terrains stériles recouvrant les veines sont déplacés, le charbon est alors abattu, chargé et évacué. Le paramètre déterminant pour fixer les limites économiques est le taux de découverte, c'est-à-dire le rapport en volume entre le stérile qui doit être déplacé et le charbon récupéré (en général, la limite = 10 : 1). Le matériel utilisé est constitué de foreuses, explosifs, bulldozers, pelles, ...

Quand le charbon est trop profond pour être exploité à ciel ouvert, il faut accéder aux veines par des puits et un système de galeries horizontales étagées. Les deux méthodes employées sont : par chambres et piliers, où l'on trace un réseau rectangulaire de galeries qui laissent en place des piliers pour soutenir le toit de la veine; et les longues tailles, qui consiste à creuser dans la veine de longues galeries étagées, le toit s'effondrant derrière le soutènement ou étant remblayé.

Le matériel utilisé est le pic, le marteau-piqueur, les wagonnets, les explosifs, les haveuses, ...

Les produits extraits de la mine sont calibrés et lavés, afin de séparer le charbon des matières stériles auxquelles il se trouve mélangé lors de l'abattage.

Les charbons commerciaux sont classés selon leur calibre (roches, noix, grains, boulets, braisettes, ...) : la granulométrie varie entre 3/6 mm et 80/120 mm

Le coke est le produit de la distillation de la houille à l'abri de l'air (carbonisation vers  $1\ 000^{\circ}\text{C}$ ). Il résulte un produit plus riche en carbone et contenant moins de soufre, dépourvu de substances volatiles. Il a une meilleure résistance mécanique que le charbon, une consistance stable et une très forte réactivité, du fait de sa porosité.

### 1.2.3. Transport.

Le charbon est un combustible solide : il ne se prête donc pas à un transport par pipe-lines (bien que les carboducs existent pour les granulométries faibles) et sa manutention est malaisée.

En général, les exploitations minières sont reliées par chemin de fer aux zones industrielles utilisatrices ou aux installations portuaires accessibles aux grands minéraliers et prévues pour l'embarquement de gros tonnages de charbon.

Les équipements ferroviaires et portuaires spécialement construits pour permettre la mise en valeur des gisements de charbon sont très coûteux.

Le transport par barges n'est évidemment possible que si des voies d'eau navigables relient les zones productrices aux zones consommatrices.

Enfin, les convoyeurs à bande et les camions sont surtout utilisés sur de petites distances, généralement entre une mine et une centrale proche.

### 1.2.4. Utilisation.

L'emploi dominant du charbon est sa combustion, soit dans les centrales thermiques, produisant de l'électricité, soit dans les installations de chauffage domestiques et industrielles.

Les chaudières de grande puissance des centrales thermiques sont des chaudières à charbon pulvérisé. En amont de la chaudière doivent donc se situer des installations de broyage du charbon. Un des inconvénients de cette technique est que les cendres se retrouvent en majeure partie dans les effluents des centrales qui doivent donc être dépoussiérés.

De même, le soufre contenu dans le charbon passe sous forme d'oxydes dans les gaz de combustion, ainsi que les métaux lourds. La température élevée de combustion ( $1\ 300^{\circ}\text{C}$ ) favorise également la formation d'oxyde d'azote.

Le charbon est également utilisé dans les chaudières industrielles, le chauffage collectif des locaux et les réseaux de chauffage urbain. La technique traditionnelle de combustion est encore celle de la grille : le charbon brûle sur une grille située à la base de la chaudière, un courant d'air le traversant.

C'est à ce niveau que se posent surtout les problèmes de stockage, de manipulation du charbon et d'environnement. Il ne s'agit d'ailleurs pas tant de l'émission d'oxydes de soufre ou d'azote que d'émission de poussière durant la manutention et l'évacuation des cendres.

Les cimenteries, la carbochimie utilisent également la combustion du charbon. Le coke, lui, est essentiellement employé en sidérurgie où il est le principal agent réducteur.

Le charbon peut également être transformé en hydrocarbures, par hydrogénation, il en résulte un produit fort proche du pétrole.

Le "gaz de houille", soit comme sous-produit de la cokéfaction, soit comme produit de la gazéification du charbon, n'est utilisé actuellement que pour des applications marginales.

Le rendement de combustion est variable selon l'installation, citons à titre d'exemple l'ordre de grandeur de 70 à 85 %.

### 1.2.5. Impact environnemental.

Dans le secteur de l'énergie, le charbon fait figure de paria en ce qui concerne les dégradations qu'il fait subir à l'environnement.

L'extraction du charbon pose déjà beaucoup de problèmes :

- bruit
- retombées de poussières, de cailloux, ...
- drainage acide dans les régions humides
- perte de zones naturelles (forêts, ...)
- dégradation d'exploitations agricoles
- glissements de terrain
- dépôts et sédimentation dans les rivières
- pollution de l'air lorsqu'on brûle les résidus
- danger des galeries, difficulté du travail pour les mines souterraines
- inondations et incendies des mines
- besoins énormes en eau pour le lavage
- terrils dangereux et disgracieux.

Plusieurs solutions peuvent être proposées :

- La restauration du site dans son état d'origine. Ce n'est pas toujours possible cependant, les dégâts dans le sous-sol étant parfois irréversibles. En tout état de cause, la croissance d'une végétation nouvelle demande beaucoup d'eau et de temps.
- La liquéfaction et la gazéification du charbon sur le site des gisements, ce qui permettrait d'éviter de nombreux problèmes de main d'oeuvre, d'infrastructures, d'extraction, de pollution, de protection de l'environnement. Mais les rendements sont alors nettement inférieurs; de plus, on n'a encore ni la maîtrise technique, ni la maîtrise économique de ces procédés, tout au moins à grande échelle.

La combustion du charbon pose ensuite des problèmes de pollution de l'air. La production de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) résulte directement du processus de combustion des combustibles fossiles dont le  $\text{CO}_2$  est un dérivé essentiel : par exemple, dans la combustion de 1 kg de charbon ordinaire, le 0.7 kg de carbone qu'il contient est combiné avec 1.85 kg d'oxygène atmosphérique pour produire 2.55 kg d'oxyde de carbone.

L'augmentation du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère crée l'effet de serre bien connu, dont résulterait une augmentation du niveau moyen des températures et des océans sur le globe.

Par ailleurs, l'anhydride sulfureux ( $\text{SO}_2$ ) et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) dégagés lors de la combustion du charbon réagissent avec l'eau de l'atmosphère (vapeur, pluie, brouillard) et provoquent l'apparition de dérivés acides : acides sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et nitrique ( $\text{HNO}_3$ ). Ces précipitations, emportées par le vent, sont alors conduites loin de leur origine, où elles modifient le pH des eaux de surface et dissolvent des éléments minéraux naturels : c'est le phénomène des pluies acides.

Les  $\text{NO}_x$  et le  $\text{SO}_2$  en eux-mêmes entraînent des nuisances au niveau de la respiration de l'homme et de la croissance des plantes.

Les solutions à ce problème passent par l'épuration, par la désulfuration des combustibles, l'application de techniques de combustion propres (lit fluidisé, par exemple, où le charbon, de fine granulométrie, brûle en suspension dans un courant d'air) et l'épuration des gaz de combustion.

Les résidus de la combustion, les cendres, se retrouvent dans les effluents des centrales. Le dépoussiérage des fumées par des procédés électrostatiques et les filtres à manches permet aujourd'hui d'éliminer 99,9 % des cendres.

La manutention du charbon avant et après combustion (cendres) pose des problèmes de poussières.

Ces mêmes nuisances sont d'ailleurs rencontrées durant le transport du combustible : selon certaines estimations, environ 20 % des particules solides présentes aux Etats-Unis dans l'atmosphère des régions atlantiques et montagneuses seraient dus au transport et à la manutention du charbon.

Le transport maritime du charbon, par contre, pose moins de problème que celui des hydrocarbures : on ne rencontre pas de marées noires dues au charbon.

Enfin, si le charbon est utilisé pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques, il faut encore ajouter le risque de pollution thermique sur les cours d'eau voisins et l'impact des lignes à haute tension sur l'environnement. Concernant ce dernier aspect, les nuisances sont essentiellement d'ordre visuel : l'esthétique du paysage est considérablement affectée par les pylônes disgracieux. On peut également citer les effets nocifs possibles des champs magnétiques et des champs électriques sur les hommes et sur le bétail aux alentours des lignes à haute tension.

#### 1.2.6. En résumé.

##### Avantages

- Energie thermique pour la génération de puissance électrique et pour l'industrie
- Abondant
- Bon marché
- Sécurité d'approvisionnement
- Emploi local
- Possibilités de liquéfaction et de gazéification, de fabrication de coke et sous-produits
- Diminution des importations de pétrole et de gaz
- Usage du coke en sidérurgie

##### Inconvénients

- Pollution de l'eau : thermique et chimique
- Pollution de l'air : poussières lors de l'extraction, de la manutention et du transport, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> après combustion
- Impact paysager : destruction des sites d'exploitation, lignes à haute tension, ...
- Besoin en eau et donc diminution de l'eau disponible pour l'agriculture et les usages domestiques
- Transport malaisé car produit solide

### **1.3. LA TOURBE.**

#### **1.3.1. Caractéristiques.**

Dans l'évolution vers la houillification, la tourbe constitue un intermédiaire entre les végétaux et le charbon. La tourbe contient en fait encore de la cellulose, alors que la lignite, forme primitive de la houille, n'en contient plus.

Elle est formée dans des endroits humides et marécageux. Elle contient "in situ" une grande quantité d'eau : au moins 75 %. Après séchage, elle constitue un combustible peu compact de médiocre qualité. La tourbe contient au maximum 60 % de carbone, contre, par exemple, 96 % pour les anthracites, en fin d'évolution de la houille !

Ce déficit est comblé essentiellement par l'oxygène.

Le pouvoir calorifique supérieur dépasse rarement 20 MJ/kg.

Le taux de cendres des tourbes est faible dans les tourbières de montagne (1 à 4 %), plus élevé et très variable dans les tourbières de marais, riches en dépôts minéraux calcaires (8 à 15 % et parfois plus).

#### **1.3.2. Production et préparation.**

La tourbe est extraite de la tourbière avec une forte teneur en eau.

Après exposition prolongée à l'air (plusieurs mois), son humidité se stabilise autour de 25 à 30 %. Elle est utilisée dans cet état, sous forme de briquettes plus ou moins dures, compactes et denses selon leur origine et le traitement subi avant le séchage (malaxage).

#### **1.3.3. Transport.**

Le transport sur de longues distances n'est pratiquement pas envisageable. Les "gisements" sont très dispersés, ce qui rend impossible le séchage sur le site de façon centralisée et industrielle. Il faut donc transporter la tourbe sous forme de boue humide vers l'endroit où on la traitera de façon artisanale. Ceci limite son emploi à des applications locales.

Cependant, si l'humidité pose un problème pour le transport de la tourbe à l'état brut, elle facilite la fabrication des briquettes de combustible. L'humidité interne des tourbes est mise à profit comme agent agglomérant pour obtenir ces briquettes, sous de très fortes pressions (1 000 bars), sans avoir recours à un liant extérieur de type brai ou bitume.

#### **1.3.4. Utilisation.**

L'utilisation de la tourbe ne s'envisage exclusivement que pour le chauffage domestique, dans des poêles et petites chaudières à combustible solide.

Son taux d'humidité élevé exclut l'utilisation sous forme pulvérisée.

#### **1.3.5. Impact environnemental.**

La tourbe est moins pulvérulente que le charbon : on ne rencontre donc pas les nuisances dues à son extraction et à son transport, du type : poussières, besoin en eau pour le lavage, ...

Les gisements étant fort dispersés, les risques de dégradation des sites sont également minimisés. Pourtant, l'exploitation actuelle des tourbières (essentiellement à des fins agricoles) est faite par des procédés bien souvent destructeurs (assèchement préalable, emploi

de désherbants chimiques) qui provoquent un appauvrissement du milieu, alors que les méthodes anciennes d'extraction artisanale respectaient le milieu en le rajeunissant.

En outre, les combustibles, comme la tourbe, qui possèdent une capacité de rétention d'eau élevée sont capables, après séchage, de reprendre de l'eau en se mettant en équilibre avec l'air ambiant.

Le phénomène est très rapide et peut avoir des conséquences fâcheuses.

L'absorption d'eau dégage une quantité de chaleur, qui, conjuguée à l'absorption de l'oxygène de l'air, peut conduire à des inflammations et des explosions.

En ce qui concerne la pollution chimique de l'air, les problèmes sont similaires à ceux posés par la combustion du charbon. Ils se posent simplement avec moins d'acuité étant donné la faible utilisation de la tourbe.

#### 1.3.6. En résumé.

##### Avantages

- Exploitation locale par des méthodes artisanales
- Moins de poussières
- Parfois moins de cendres
- Impacts paysagers minimes dus à l'extraction

##### Inconvénients

- Gisements dispersés
- Forte teneur en humidité
- Combustion difficilement contrôlable
- Pollution de l'air
- Forme de briquettes uniquement

## 1.4. LE PÉTROLE.

### 1.4.1. Caractéristiques.

Le pétrole est un mélange complexe de diverses substances organiques, essentiellement des hydrocarbures et quelques composés volatiles (soufre, oxygène, azote). Notons par exemple que la teneur en soufre varie sensiblement en fonction de l'origine du pétrole : de 0.2 à 3 %.

D'une manière générale, on désigne par fuel le combustible liquide résultant de la transformation du pétrole.

Le fuel a des teneurs en carbone et hydrogène qui se situent respectivement dans les fourchettes 84-86% et 11-14 %.

Le terme carburant est réservé aux produits alimentant les moteurs (essence, diesel), alors que le mot combustible est réservé aux applications thermiques (brûleurs, fours, chaudières).

Les pouvoirs calorifiques et la densité des principaux produits issus du pétrole sont résumés dans le tableau suivant :

Produit	Densité	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Essence	0.75	46.7	42.5
Fuel domestique	0.85	45.0	42.5
Fuel lourd	0.95	43.0	40.5
Pétrole	0.80	42.9	40.8
Gaz-oil (diesel)	0.87	44.8	41.6

La viscosité est également une caractéristique importante du combustible liquide, puisqu'une grande viscosité peut exiger de réchauffer le combustible avant sa mise en oeuvre.

En ce qui concerne le pétrole brut, la caractéristique essentielle est sa densité. Elle est désignée internationalement par un "degré API", selon une échelle établie par l'American Petroleum Institute. Les degrés les plus élevés correspondent à un poids spécifique bas. Les densités des pétroles sur le marché mondial varient largement : de 10° API (densité 1.0) à 50° API (densité 0.78).

Le pétrole brut le plus connu, qui est d'ailleurs une référence, est l'Arabe léger, un pétrole de qualité moyenne, soit 34° API (densité 0.86).

Enfin, on retient que pour un calcul simplifié, on peut admettre que 1 baril vaut 159 litres, que 1 tonne métrique de pétrole brut correspond environ à 7.3 barils et que l'extraction de 1 baril par jour correspond à environ 50 tonnes par an.

### 1.4.2. Production et préparation.

L'origine du pétrole est marine, mais on en trouve dans toutes les couches géologiques du début de l'ère primaire au tertiaire : cela s'explique par la migration, lent vagabondage souterrain de l'huile à travers les pores et les interstices des diverses roches composant le sous-sol, chassée par la pression des nappes aquifères.

Les hydrocarbures se retrouvent finalement dans un "piège" où ils s'accumulent pour former un gisement : ils y restent emprisonnés à l'intérieur d'une roche-magasin poreuse surmontée d'une roche-couverture imperméable, comprimés par l'eau sous pression environnante.

La découverte des gisements peut être prévue par les techniques de prospection terrestre et "offshore" : gravimétrie, magnétométrie, sismographie, ...

Ensuite, on utilise généralement la méthode de forage rotatif au trépan pour atteindre le gisement. Le "derrick", mât ou charpente pyramidale, permet de remonter et de retirer une à une les tiges du puits.

Lorsque la poche est atteinte, sous l'effet de la pression, le pétrole remonte de lui-même à la surface. Par la suite, on injecte du gaz comprimé dans le trou, puis enfin, on pompe à l'aide de pompes à balancier.

Pour lutter contre le colmatage progressif des pores de la roche pétrolifère et rétablir l'activité du gisement, il est nécessaire de "stimuler" périodiquement le puits par acidification (injection d'acide chlorhydrique), par torpillage (perforation mécanique) ou par fracturation hydraulique. On récupère ainsi, de façon classique, 20 % du pétrole contenu dans le gisement. Le reste est expulsé par des techniques diverses : drainage à l'eau, réinjection de gaz, drainage à la vapeur, drainage par le feu, fracturation nucléaire.

Après quelques traitements immédiats (séparation de certaines impuretés, extraction de l'eau salée), le pétrole brut est transporté vers les raffineries. Là, la valorisation du pétrole brut se fait par distillation fractionnée (décomposition en différents éléments à points d'ébullition élevée).

Du raffinage résultent trois grandes classes de produits, issus de trois distillations successives.

La distillation primaire élimine les éléments gazeux (méthane, éthane, propane et butane), ainsi qu'une essence légère.

La deuxième distillation isole une essence lourde, ainsi que des distillats moyens (kérosène, pétrole lampant, carburants pour moteurs à réaction), le gasoil et le fuel-oil léger (diesel).

De la troisième distillation dérivent les huiles lourdes : huiles de graissage, fuel lourd.

Les fractions lourdes peuvent enfin être valorisées par cracking (chauffage à température élevée sous pression).

### **1.4.3. Transport.**

Le pétrole brut est transporté entre le lieu du gisement et la raffinerie de diverses manières, selon les distances et les régions traversées.

Son état liquide autorise le transport par oléoducs (pipe-lines) : il s'agit d'une longue conduite, en acier à haute limite élastique (ce qui autorise une très faible épaisseur de paroi), généralement enterrée et pouvant atteindre 1.2 m de diamètre et plusieurs milliers de kilomètres de longueur.

La voie maritime est la deuxième façon la plus courante de transporter le pétrole : le pétrolier géant (supertanker) est de loin le moyen le plus économique de transporter de l'énergie sous quelque forme que ce soit. Ceci exige cependant des équipements portuaires capables de recevoir ces énormes pétroliers pouvant atteindre chacun une capacité de 500 000 tonnes.

Après transport, le pétrole brut doit être stocké dans de grandes cuves enterrées ou aériennes, en attendant le raffinage.

Quant aux produits finis, ils peuvent être transportés par oléoducs, par caboteurs de haute mer, par péniches, chalands, pousseurs, par wagons-citernes ou par camions-citernes.

### **1.4.4. Utilisation.**

L'utilisation du pétrole et des produits dérivés couvre une gamme très large.

Les essences et supercarburants sont utilisés dans les moteurs à allumage commandé (automobile, ...).

Le kérosène fournit essentiellement le carburéacteur destiné à l'aviation à réaction et accessoirement le pétrole lampant dont les applications domestiques (éclairage, chauffage, cuisine) restent marginales.

Le gazole sert à l'alimentation des moteurs Diesel de traction. Il diffère peu, par sa composition, du fuel domestique, employé pour le chauffage domestique.

Les fuels lourds, enfin, se répartissent en deux ou trois produits, selon leur viscosité et leur teneur en soufre. Ils sont utilisés essentiellement en combustion industrielle dans les centrales électriques, les raffineries, la grosse industrie chimique, les cimenteries.

Il faut enfin citer les nombreuses applications du pétrole à des fins non-énergétiques, dont la pétrochimie qui, aux Etats-Unis, utilise environ 10 % du pétrole produit.

#### 1.4.5. Impact environnemental.

Le pétrole est aujourd'hui souvent associé dans les esprits aux "marées noires" dont les conséquences sont d'autant plus graves qu'il s'agit de pétroliers géants (Amoco-Cadiz en 1978 : 220 000 tonnes de brut déversées devant les plages bretonnes).

Dans une telle catastrophe, les conséquences des dégâts sont impossibles à évaluer, en particulier du fait des ravages faits à la faune et à la flore.

Les médias associent donc souvent la pollution due au pétrole aux problèmes liés à son transport.

Le pipe-line, par contre, est plus fiable : les fuites, assez rares, peuvent être détectées par une chute de pression ou une discordance des débits; elles sont ensuite localisées en parcourant le tracé de l'oléoduc en hélicoptère.

Outre les problèmes liés au transport du combustible, il ne faut pas sous-estimer l'impact environnemental du pétrole durant les autres étapes.

- Au moment de son extraction. Incendies et explosions constituent un risque permanent pour les puits. De même un déversement accidentel par suite d'éruption de puits "off shore" peut polluer la mer.
- Au moment de son raffinage. Les émissions des raffineries doivent être strictement limitées et contrôlées afin d'éviter toute pollution de l'air, du sol et des rivières, ainsi que le bruit.
- Au moment de son stockage. Deux risques majeurs sont à craindre : l'incendie, dû à une mauvaise manipulation ou à une fuite du réservoir et la pollution des eaux due également à une fuite ou une rupture de la cuve de stockage, le pétrole (ou le fuel, l'essence, ...) se propage dans le sol par percolation et peut atteindre les nappes aquifères qu'il pollue à raison de 1 000 m<sup>3</sup> d'eau polluée par litre de produit pétrolier !
- Lors de sa combustion. Comme le charbon, le pétrole contient du soufre et sa combustion dégage du SO<sub>2</sub> et des NO<sub>x</sub>.

La concentration pondérale moyenne en soufre est même plus élevée que celle du charbon : 1.2 % pour le gasoil, 2.0 % pour le fuel léger, 4.8 % pour le fuel extra-lourd, contre, en général, aux alentours de 1 % pour le charbon. Ceci est cependant compensé par le pouvoir calorifique plus élevé du fuel (à puissance fournie égale, il faut un poids plus faible de fuel).

En outre, des solutions existent pour diminuer la pollution de l'air :

- il faut des cheminées assez hautes pour disperser les polluants
- des traitements spéciaux produisent des fuels BTS (à Basse Teneur en Soufre), qui sont exigés dans certaines zones de protection spéciale
- La combustion incomplète du fuel entraîne également le dégagement d'hydrocarbures, dont les niveaux toxiques sont divers.  
Le benzène, par exemple, produit sur le corps humain des effets identiques à ceux des radiations ionisantes.
- La production de monoxyde de carbone due aux véhicules consommant des dérivés du pétrole (essence, gaz-oil, kérosène) constitue 85 % du total des émissions de CO.  
Le CO peut réagir avec l'hémoglobine pour former du carboxy-hémoglobine, qui est relativement stable, causant une réduction de la capacité du sang à véhiculer l'oxygène.
- Enfin, comme pour le charbon, lorsque le pétrole est utilisé dans les centrales thermiques de production d'électricité, il faut y ajouter les nuisances dues aux lignes électriques à haute tension.

#### 1.4.6. En résumé.

##### Avantages

- Forme liquide : manipulable, d'usage souple et aisé
- Pouvoir calorifique élevé
- Facilité de stockage et de transport
- Evolution des matériels (brûleurs et chaudières), qui les rendent très performants
- Possibilité de remèdes à la pollution (techniques de désulfuration, ...)

##### Inconvénients

- Longs délais entre découverte et exploitation effective
- Risque de fuite et d'incendie lors du transport et du stockage
- Pollution de l'air par hydrocarbures, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>

## 1.5. LE GAZ NATUREL.

### 1.5.1. Caractéristiques.

L'éventail des gaz combustibles utilisés pour tous les besoins domestiques, commerciaux et industriels est extrêmement vaste :

- le "gaz de ville" est en général un mélange artificiel de plusieurs gaz, il contient une forte proportion de monoxyde de carbone et d'hydrogène
- les gaz de pétrole liquéfié regroupent les butanes et propanes et sont produits par les raffineries
- le gaz naturel provient de gisements de type pétrolifère, mais qui ne produisent qu'une phase gazeuse. C'est ce dernier qui concerne le présent chapitre.

La plupart des gaz naturels sont des mélanges d'hydrocarbures saturés où prédomine le méthane; ils proviennent d'accumulations souterraines de gaz seuls ou de gaz associés au pétrole. Généralement, un gaz naturel d'une provenance déterminée a une composition pratiquement constante ou évoluant lentement et de façon peu accentuée en fonction du temps.

On peut noter que, comme pour le pétrole, ils sont, sauf exceptions, loin des zones de consommation, nécessitant un transport sur de longues distances, mais aussi que, contrairement au pétrole, les réserves sont mieux réparties sur le globe.

Le gaz se trouve à l'état sec si les hydrocarbures plus lourds que l'éthane en sont virtuellement absents, ou à l'état humide, s'il contient au contraire une quantité notable de propane, de butane, de pentane, etc.

Après traitement, on classe les gaz naturels en fonction de leurs pouvoirs calorifiques : catégorie H pour les pouvoirs calorifiques élevés (38.5 à 46 MJ/Nm<sup>3</sup>) et catégorie B pour les pouvoirs calorifiques faibles (34.2 à 38 MJ/Nm<sup>3</sup>).

En dehors des hydrocarbures, on trouve souvent un ou plusieurs éléments mineurs ou impuretés :

- azote : il a pour inconvénient son caractère inerte qui diminue la valeur commerciale du gaz (en particulier son pouvoir calorifique); notons qu'il existe des procédés de dénitrogénéation
- hélium : il peut être extrait et valorisé commercialement lors de la dénitrogénéation
- H<sub>2</sub>S et CO<sub>2</sub> : ils doivent être extraits à cause de leurs propriétés corrosives
- eau : la plupart des gisements d'hydrocarbures s'étant formés en milieu aqueux, le gaz naturel est normalement saturé en vapeur d'eau; pour son exploitation, on sera amené à le déshydrater partiellement.

La teneur en soufre (sous forme d'H<sub>2</sub>S) est en général réglementée. Cependant l'ordre de grandeur de cette teneur reste faible comparé à d'autres combustibles : à puissance fournie équivalente, le gaz naturel contient environ 1 500 et 3 000 fois moins de soufre que le charbon et le pétrole respectivement.

Le poids spécifique du gaz naturel vaut environ 0.55 kg/Nm<sup>3</sup>.

La plage d'inflammabilité s'exprime en pourcentage de volume de gaz par volume de mélange gaz/air : elle va typiquement de 5 à 15 %, c'est-à-dire à un niveau moyen plus élevé que le butane et le propane. Cette plage conditionne la sécurité de manutention et de combustion du combustible.

Le gaz naturel est inodore, non toxique et beaucoup plus léger que les gaz artificiels.

Le principal problème des gaz est qu'ils sont peu interchangeables en ce qui concerne le pouvoir calorifique, la stabilité de la flamme ou la combustion : les appareils doivent être réglés spécifiquement en fonction de l'origine du gaz. A ce titre, les gaz naturels sont cependant plus homogènes que certains gaz artificiels.

### 1.5.2. Production et préparation.

Comme le pétrole, les hydrocarbures gazeux sont formés en eaux salines et, étant plus légers que l'eau de mer, ont tendance à exécuter une migration ascendante. S'ils arrivent en surface, ils s'oxydent à l'air et perdent tout intérêt particulier. En revanche, s'ils rencontrent une barrière imperméable, telle qu'une forme anticlinale, monoclinale ou autre, ils s'accumulent dans un piège.

Après une campagne de prospection similaire à celle menée pour la découverte de gisements de pétrole, le forage et l'équipement, également similaires aux installations pétrolifères, est mis en place.

L'exploitation est cependant plus aisée que dans le cas du pétrole et se prête mieux à l'automatisation : la pression dans le gisement est parfois très élevée, ce qui permet d'écouler le gaz directement à grande distance, sans compresseur.

On sépare, en tête de puits, les éléments condensés par la chute de pression et de température : le reste du traitement est effectué dans une usine spécialisée.

Il comprend le dégazolinage (enlèvement des produits condensables tels que propane et butane par traitement thermique, lavage et adsorption), la déshydratation (par refroidissement) et la désulfuration et décarbonation de manière à réduire les taux de H<sub>2</sub>S et CO<sub>2</sub> en dessous des tolérances admises.

### 1.5.3. Transport.

L'état gazeux du combustible autorise le transport du gaz naturel par gazoducs : tubes d'aciers d'une épaisseur de quelques millimètres, de diamètre variant entre 20 cm et 140 cm et s'étendant sur plusieurs centaines de km.

Pour donner au gaz une vitesse de transport suffisante, une pression est nécessaire. Au départ, on utilise la pression du gisement lui-même, puis, pour assurer la pression d'environ 70 bars tout au long du transport, de puissantes stations de compression sont installées en principe tous les 80 km. Un entretien par pistons racleurs et des inspections périodiques sont effectués pour éviter les fuites. Des règlements très stricts limitent l'emploi et le passage de gazoducs dans certaines zones.

Le gaz naturel est aussi transporté sous forme liquide, ceci surtout afin de franchir les océans (dans les navires méthaniers). Le gaz naturel est transporté à - 160° C dans des cuves en alliage aluminium-nickel et munies d'un revêtement isolant. L'opération de liquéfaction implique cependant une perte de 25 % d'énergie primaire; de plus les risques d'explosion d'un méthanier ne sont pas nuls et les coûts sont très élevés.

Le gaz est livré au consommateur après détente jusqu'à 20 mbars. Cependant, la consommation n'étant pas constante sur la journée, un stockage s'impose : les anciens gazomètres, inesthétiques, sont actuellement remplacés par des réservoirs souterrains pouvant contenir plusieurs centaines de millions de mètres cubes de gaz. Ces réservoirs sont en général situés en nappe aquifère où l'on recrée une sorte de gisement artificiel en roches poreuses et perméables ou en cavités salines créées par lessivage à l'eau douce dans les massifs salifères entre 500 et 1 400 m de profondeur.

#### 1.5.4. Utilisation.

Les utilisations domestiques ou résidentielles recouvrent essentiellement la cuisine, la production d'eau chaude et le chauffage individuel ou collectif des locaux d'habitation. Les utilisations commerciales ou tertiaires sont également des applications de combustion du gaz pour le chauffage d'hôpitaux, de magasins, de piscines, de serres, ...

Quant aux utilisations industrielles, on relève les opérations thermiques en métallurgie (fusion, forge, estampage, ...), en céramique, en cimenterie, en briqueterie, en verrerie, en fabrication textile.

Le gaz naturel alimente également des centrales électriques.

Il est également employé comme matière première de l'industrie chimique en vue de la fabrication d'engrais azotés, d'ammoniac et de matières plastiques.

En ce qui concerne la combustion, de loin l'usage le plus répandu du gaz naturel, il est facile d'équiper les chaudières en bi-combustible, fuel ou gaz, à volonté, ce qui permet à la fois d'assurer une continuité de marche et de profiter éventuellement de tarifs plus bas. Les rendements des chaudières sont excellents : souvent au-dessus de 90 %.

#### 1.5.5. Impact environnemental.

De tous les combustibles fossiles, le gaz naturel est probablement celui dont la combustion provoque le minimum de nuisances pour l'environnement. Il contient peu de soufre et de CO<sub>2</sub>; il est possible en tout cas de les éliminer par des procédés convenables.

La simplicité de sa composition permet une combustion presque complète : peu d'imbrûlés, pas de cendres, fumée sans suie, ...

L'exploitation des gisements est moins destructive que pour le pétrole et surtout pour le charbon.

Les gazoducs détruisent néanmoins souvent les biotopes qu'ils traversent.

Les risques pour l'homme sont surtout liés au danger d'explosion, accru par le fait que le gaz naturel est inodore.

#### 1.5.6. En résumé.

##### Avantages

- Pour l'utilisateur : pas de stockage de combustible sur place
- Pas de formation de cendres, pas d'encrassement des chaudières
- Moindre pollution atmosphérique
- Régulation facile, précise, souple
- Rendement élevé par la suite de la combustion parfaite
- Détection de fuite facile et rapide
- Impacts paysagers limités

##### Inconvénients

- Difficultés, risques et coût du transport
- Destruction de biotopes par les gazoducs
- Risques d'incendies et d'explosion

## 2. ENERGIES RENOUVELABLES.

### 2.1. GÉNÉRALITÉS.

#### 2.1.1. Genèse.

Certaines énergies sont dites renouvelables (énergie de gravitation, énergie solaire, énergie du vent, énergie géothermique, biogaz, ...), d'autres formes d'énergie sont non-renouvelables (charbon, pétrole, gaz naturel).

Ces appellations correspondent en fait à une classification artificielle liée à la base de temps humaine. Considérée à l'échelle temporelle de la création du globe, toute énergie est renouvelable. Tout combustible peut en effet être considéré comme dû au travail, durant des millions d'années, de l'énergie solaire : il s'agit en quelque sorte d'énergie solaire stockée et il n'y a donc aucune raison pour que le processus ne puisse pas être renouvelé, tant que le soleil est disponible. L'énergie hydraulique est due également au soleil, par le biais du cycle de l'eau, l'énergie du vent est elle aussi due à l'échauffement par le soleil des masses d'air, la bio-méthanisation n'est rien d'autre qu'une énergie du soleil convertie en énergie chimique par la photosynthèse dans les plantes, puis en énergie thermique par digestion. Dans ce cas, le rendement de la transformation est évidemment minime. Il est encore plus faible pour le pétrole ou le charbon qui résulte de la lente décomposition de ces végétaux.

En résumé, l'acteur principal des énergies est le soleil.

Le soleil convertit en permanence sa masse en énergie et la fournit à tout l'univers. Sa température est de  $6\,000^{\circ}\text{C}$  en surface.

La Terre, qui est une minuscule planète située à 150 millions de kilomètres du soleil, ne reçoit qu'une infime partie de ce rayonnement solaire (1/50 000 000). Et cependant, en dehors de l'atmosphère, la Terre reçoit encore une puissance équivalente à celle de 200 millions de centrales nucléaires, soit 10 000 fois les besoins mondiaux actuels en énergie. La population actuelle du globe consomme seulement l'équivalent de 0.008 % de l'énergie solaire absorbée par la Terre. Même en tenant compte de mauvais rendements et des surfaces disponibles limitées pour sa captation, il serait possible de couvrir, par exemple, les besoins du secteur domestique.

*c'est à dire une quantité 100 fois supérieure aux réserves prouvées de charbon, de gaz et de pétrole*

Le soleil émet son énergie sous forme de rayonnement, surtout dans l'ultra-violet. Une bonne partie de ce rayonnement est absorbé par la couche d'ozone, puis par diffusion dans les molécules d'eau en suspension dans l'atmosphère.

Enfin, le rayonnement solaire atteint la surface de la terre, essentiellement dans le spectre des longueurs d'onde visibles et des infra-rouges.

La plus grande partie du rayonnement est absorbée par la Terre et transformée en chaleur : la Terre s'échauffe en surface et sans ce rayonnement, notre globe connaîtrait une température proche du 0 absolu.

Une partie également atteint les plantes. De cette partie, 99 % sont perdus et 1 % est transformé en énergie chimique par photosynthèse.

Une troisième partie enfin sert à l'évaporation de l'eau et permet, par les chutes de pluie, de perpétuer le cycle de l'eau.

Le reste est réfléchi vers l'atmosphère et vers l'espace.

La quantité d'énergie réellement récupérable pour les besoins humains est négligeable par rapport à l'intensité de la source au départ. Et pourtant, d'une part, les ordres de grandeur restent appréciables : en dehors de l'atmosphère le rayonnement est de l'ordre de  $1\,350\text{ W/m}^2$  ("constante solaire") et au niveau du sol, on peut atteindre un maximum de  $1\,000\text{ W/m}^2$ , la

moyenne annuelle au niveau du globe atteignant  $220 \text{ W/m}^2$  (cette valeur moyenne est d'ailleurs pratiquement la valeur relevée pour le Brésil).

D'autre part, il s'agit réellement d'énergie renouvelable en ce sens que, inlassablement, le cycle se perpétue et que l'énergie solaire est délivrée en permanence, qu'on l'utilise ou non : il suffit donc de la stocker afin de pouvoir disposer des quantités suffisantes à nos besoins.

Donc, pour distinguer les énergies, il est peut-être préférable de parler "d'énergie-flux" et "d'énergie-stock". Quand nous utilisons du pétrole, du gaz naturel, du charbon ou de l'uranium, nous prélevons sur le patrimoine énergétique de l'humanité.

Ce n'est en revanche pas le cas lorsque nous consommons de l'énergie hydraulique ou solaire.

C'est davantage de cette "énergie-flux" dont il sera question dans cette ~~première~~ <sup>seconde</sup> partie.

### **2.1.2. Exploitation du gisement.**

Malgré la quantité énorme d'énergie qui arrive sur la terre, il y a des inconvénients, qui s'opposent à son exploitation et qui l'empêchent d'être utilisée dans la mesure que le font espérer les chiffres.

L'énergie solaire incidente n'est pas disponible d'une façon uniforme sur toute la terre : elle diminue avec la latitude croissante.

Elle est également soumise à de fortes fluctuations : rythme des saisons, rythme jour-nuit.

L'énergie solaire arrive donc à la surface de la terre à l'état très dilué.

Plusieurs solutions s'offrent à nous pour remédier à cet inconvénient :

- disposer des surfaces gigantesques de collecteurs solaires
- utiliser des collecteurs qui absorbent aussi le rayonnement diffus (ciel couvert)
- concentrer l'énergie incidente par des techniques de miroirs concaves
- stocker l'énergie solaire pour compenser le déphasage entre l'offre et la demande
- orienter les surfaces de captation vers les rayons du soleil (le sud pour l'hémisphère nord, le nord pour l'hémisphère sud)
- utiliser aussi les autres formes de l'énergie solaire disponibles sur la terre : l'énergie éolienne notamment
- profiter au maximum de ce que la Nature a déjà stocké comme énergie dans les cours d'eau et les plantes.

## 2.2. LE SOLAIRE THERMIQUE.

### 2.2.1. Caractéristiques.

La façon la plus simple de capter l'énergie provenant du rayonnement solaire est de la convertir en énergie thermique.

L'effet de serre est exploité pour toutes les applications "basse-température" (inférieure à 100° C). Le rayonnement chauffe une surface, noire de préférence, qui est exposée face au soleil (souvent au sud pour l'hémisphère nord et au nord pour l'hémisphère sud, verticalement ou avec une pente égale à la latitude du lieu).

Cette surface absorbe idéalement un maximum de radiation de 0.4 à 1.7  $\mu\text{m}$  (partie visible du spectre surtout) et devrait réémettre un minimum de radiation de longueurs d'ondes supérieures à 2  $\mu\text{m}$  (infrarouge thermique).

Pour cela, un vitrage couvre la surface absorbante : le verre est en effet transparent pour la lumière visible et relativement opaque pour les radiations infrarouges de grandes longueurs d'onde.

L'ensemble surface absorbante/vitrage est isolé thermiquement de l'ambiance extérieure afin de perdre un minimum de chaleur ainsi récoltée.

Enfin, un fluide caloporteur (air, eau, ...), en passant entre le vitrage et l'absorbeur, <sup>ou dans des tuyaux brossés sur l'absorbeur,</sup> draine la chaleur et l'amène vers un volume à grande inertie thermique servant de stockage.

Parfois, la surface absorbante peut elle-même servir de tampon thermique.

La seconde façon de capter le rayonnement solaire est de le concentrer vers le point focal d'un réflecteur parabolique où selon la taille du système, il est possible d'atteindre des températures de 150° C à 4 000° C. La chaleur est alors exploitée sur place ou drainée vers l'utilisateur.

Le rendement de collecte est le rapport entre l'énergie thermique transportée vers le stockage ou l'utilisation et l'énergie solaire reçue : il peut atteindre 90 %, mais, en moyenne annuelle, dépasse rarement 50 %.

On emploie souvent le terme fraction solaire pour exprimer la fraction d'énergie gratuite dont l'utilisateur peut disposer par rapport à la charge thermique totale à fournir.

Pour obtenir cette partie d'énergie gratuite, on a évidemment enlevé l'énergie électrique ou mécanique consommée par les pompes et les ventilateurs qui drainent la chaleur. Ces auxiliaires représentent souvent le point faible d'une installation.

La fraction solaire idéale est de l'ordre de 80 % pour les applications de chauffage de l'habitat : au-delà, le coût des installations devient prohibitif.

### 2.2.2. Production et préparation.

Les absorbeurs plans sont en général des feuilles métalliques polies, en cuivre ou en aluminium, recouvertes d'un revêtement de chrome noir mat. Cet absorbeur est placé dans un caisson isolé thermiquement et recouvert d'un vitrage, simple ou double.

Dans certaines applications, les absorbeurs ne sont pas intégrés à des caissons individuels, mais sont placés sous une toiture vitrée.

L'absorbeur peut également être un mur vertical, peint en noir, qui sert en même temps de tampon thermique.

Dans le cas des concentrateurs, on peut imaginer soit des collecteurs solaires munis de quelques miroirs cylindrico-paraboliques, soit un immense réflecteur parabolique de plusieurs dizaines de m<sup>2</sup>.

### 2.2.3. Transport.

Pour les applications basse-température, il faut toujours transporter la chaleur vers le volume de stockage, puis du stockage vers le système de distribution au moyen d'un fluide caloporteur.

Si ce fluide est l'air, il est mis en mouvement par convection naturelle ou par ventilateur, il lèche la surface absorbante plane et est soufflé vers l'utilisation ou dans un volume poreux de stockage, par exemple, un lit de cailloux.

Si ce fluide est l'eau, on lui ajoute en général un antigel (glycol), puis elle est mise en mouvement par thermocirculation ou par circulation forcée au moyen d'une pompe. La chaleur est extraite de l'absorbeur par un ensemble de petits tubes sertis ou brasés sur la plaque métallique, puis emmenée vers l'utilisation ou vers un système de stockage : réservoir d'eau enterré ou aérien, volume de terre muni d'un échangeur, matériau à changement de phase, ...

Dans le cas du chauffage de l'habitat, le système de distribution de la chaleur est en général de type "basse température", chauffage par le sol, ventilo-convecteurs, radiateurs surdimensionnés, ..., ce qui autorise une température de fluide inférieure à 40° C.

Dans les installations solaires à concentration, la chaleur est utilisée sur place ou peut être transformée localement en électricité qui est alors transportée sous forme classique.

### 2.2.4. Utilisation.

- Chauffage des bâtiments : soit de façon passive, par de grandes surfaces vitrées orientées vers le soleil, un mur de masse et une circulation d'air, soit de façon active, par des collecteurs solaires placés en toiture et un tampon de stockage à court terme (quelques jours) ou à long terme (stockage intersaisonnier).

Un ordre de grandeur pour le solaire actif : en climat tempéré, il faut au minimum 50 m<sup>2</sup> d'absorbeurs et 5 m<sup>3</sup> de stockage à court terme en eau pour une maison unifamiliale.

- Préparation de l'eau chaude sanitaire : au moyen de collecteurs solaires à eau placés en toiture ou sur un terrain et d'un réservoir de stockage de l'eau chaude.

Ordre de grandeur : pour une famille, 4 à 6 m<sup>2</sup> de collecteurs solaires, 100 à 200 litres de stockage.

- Dessalement de l'eau de mer : par distillation solaire.

Ordre de grandeur : une lame d'eau de 20 mm dans un bac chauffé par énergie solaire produit par jour et par m<sup>2</sup> environ 6 à 7 litres d'eau.

- Cuisson des aliments par petits fours solaires à concentrateur, séchage des produits agricoles, serres, ...
- Stations électro-solaires : on concentre la chaleur vers un système de conversion du rayonnement en énergie thermique, puis en électricité par une machine à vapeur à piston. On peut ainsi créer de petites "centrales thermiques" de 100 kW à 2 MW.

### 2.2.5. Impact environnemental.

Utilisée de manière ponctuelle et à petite échelle, l'énergie solaire n'entraîne aucune nuisance environnementale.

Cependant, si son usage devait se généraliser, il faudrait certainement tenir compte

- de l'impact esthétique : si une toiture solaire peut parfaitement s'intégrer harmonieusement à l'architecture, il est plus difficile d'intégrer au paysage des champs de collecteurs de plusieurs hectares, un four solaire de 100 m<sup>2</sup> ou un volume de stockage en surface de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>.
- de la destruction du sol et du sous-sol : l'espace disponible en surface étant limité, on enterre les réservoirs de stockage dans le sol, ce qui nécessite un remaniement de grands volumes de terre. Par ailleurs, le chauffage de tels volumes enterrés jusqu'à parfois 80 ou 90° C, peut entraîner des perturbations des cycles de végétation et de la mécanique des sols.  
En particulier, certains systèmes profitent de nappes aquifères pour stocker la chaleur dans des volumes d'eau naturels : l'élévation de température favorise certaines réactions chimiques ou biologiques qui peuvent nuire à l'environnement.  
Par exemple : formation de calcaire, altération de l'argile, augmentation des concentrations de potassium, de calcium, absorption par la roche du fer et du magnésium, dissolution du ciment des roches, hydrolise des minéraux silicatés, ...
- de pollution souterraine : en cas de colmatage des drains d'injection ou de soutirage de la chaleur en aquifère, on effectue des traitements chimiques susceptibles de polluer l'eau (injection ponctuelle d'acide chloridrique). Egalement, des fuites de liquide caloporteur sont toujours possibles : l'eau glycolée peut pénétrer dans le sol et polluer les nappes.
- de bruit et de poussière : dans les installations solaires à air pulsé, le ventilateur génère souvent un bruit continu très désagréable; en outre les systèmes pourvu d'un stockage en lit de cailloux génèrent de la poussière qui est diffusée dans le bâtiment.
- de pollution industrielle : la fabrication des composants solaires fait notamment appel à la métallurgie qui peut, à son tour, poser les problèmes classiques liés aux activités industrielles (métaux lourds, effluents, ...).
- de pollution de l'atmosphère : l'énergie solaire est souvent liée aux pompes à chaleur. En effet, le niveau de température du fluide reste souvent trop bas pour une utilisation directe, il faut donc passer par une pompe à chaleur pour relever le niveau de "qualité" de l'énergie. Or, la pompe à chaleur utilise le cycle de Carnot sur un fluide frigorigène : il faut donc tenir compte des nuisances dues au fréon.

### 2.2.6. En résumé.

#### Avantages

- Utilisation sans rejets dans l'environnement
- Energie inépuisable
- Différentes applications possibles : thermiques, haute ou basse température, ou non thermiques
- Réalisable assez facilement pour de petites collectivités, des immeubles, des groupes d'habitations, ...

#### Inconvénients

- Uniquement possible en zones ensoleillées, sinon nécessité de grands volumes de stockage
- Contraintes physiques : toitures solides, grandes surfaces nécessaires, ...
- Prix élevé
- Pollutions possibles à cause du système de stockage de la chaleur et de la fabrication des composants solaires
- Difficilement réalisable à grande échelle

## 2.3. LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.

### 2.3.1. Caractéristiques.

La conversion directe de la lumière en électricité par des cellules photovoltaïques, ou "photopiles" exploite l'effet photovoltaïque qui transforme, dans un semi-conducteur, les photons lumineux en électrons.

Une photopile se présente sous la forme d'une cellule mince, circulaire s'il s'agit de matériau monocristallin, de quelques dizaines de centimètres carrés.

Typiquement, la tension fournie par une cellule est de l'ordre de 0.6 volt et la puissance disponible varie, selon la taille, de 0.05 à 1.2 watt.

Les cellules sont assemblées en série pour fournir une tension exploitable (en général 12 V) et en parallèle pour délivrer un courant suffisant.

Les panneaux ainsi formés sont protégés mécaniquement par un encadrement métallique et sont recouverts d'une isolation transparente. Un panneau d'environ 40 cm de côté délivre une puissance d'environ 15 watt-crête, c'est-à-dire avec un ensoleillement de  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  (par temps clair, lorsque les rayons du soleil frappent perpendiculairement la cellule). La cellule monocristalline au silicium était jusqu'à présent la plus développée, et aussi la plus répandue. Elle est constituée d'une pastille de silicium très pur et monocristallin sur laquelle une métallisation sous forme de grille permet la récupération du courant électrique.

*Le rendement maximal théorique des cellules haut de gamme est de 47 %.*

Le rendement d'une telle cellule est le rapport de l'énergie électrique disponible à l'énergie solaire incidente. Pratiquement, des chercheurs australiens ont atteint aujourd'hui un rendement de 24 % en utilisant une technologie évoluée qui allie la purification du semi-conducteur, l'amélioration de la fabrication et du dopage, et le perfectionnement des couches protectrices et anti-reflets.

Depuis quelques années, la part du marché du silicium mono-cristallin diminue pour des raisons de coût, au profit d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que l'arséniure de gallium (Ga As), le diséléniure d'indium et de cuivre (Cu In Se<sub>2</sub>) ou le sulfure de cadmium (Cd S) et également d'autres structures, telles que le silicium polycristallin (plusieurs petits cristaux au lieu d'un seul grand) et le silicium amorphe (forme non-cristalline permettant la fabrication de plus grandes surfaces de cellules).

Si le coût de fabrication diminue avec ces solutions alternatives, le rendement diminue également : à titre d'exemple, le rendement actuellement atteint pour le silicium polycristallin est de l'ordre de 17 %, et n'est que de 12 % pour le silicium amorphe.

### 2.3.2. Production et préparation.

Un système photovoltaïque comporte les éléments suivants :

- un panneau photovoltaïque pouvant être constitué de plusieurs "modules",
- une batterie d'accumulateurs si on souhaite un stockage de l'électricité,
- une diode anti-retour qui évite la décharge des accumulateurs à travers le panneau solaire,
- un régulateur de charge et de décharge des accumulateurs,
- le récepteur électrique, s'il fonctionne en courant continu,
- éventuellement un onduleur pour convertir le courant continu en courant 220 V alternatif.

On place les panneaux solaires selon les mêmes contraintes que celles requises pour les collecteurs thermiques :

- orientation : vers le soleil,
- inclinaison : environ la latitude du lieu ou pente variable selon la saison,
- pas d'ombre portée.

Il existe une multitude d'installations solaires locales de quelques kW. Il existe également de véritables centrales électriques solaires, comme celle de Carissa Plain en Californie, construite en 1984 et fournissant 6 MW d'électricité pour le Pacific Gas et les compagnies d'électricité.

### 2.3.3. Transport.

Dès l'instant où l'énergie solaire est transformée en électricité, elle peut être aisément transportée vers d'autres endroits, l'électricité étant sans doute le vecteur d'énergie le plus souple et le moins cher à l'heure actuelle.

Il faudra bien entendu éviter de trop grandes distances entre production et utilisation, surtout si l'on travaille en courant continu.

Si un onduleur est présent en bout de chaîne, la forme du vecteur électrique est compatible avec celle du réseau, rendant ainsi possible toutes les applications domestiques classiques.

A l'instar du solaire thermique, le problème de l'énergie solaire photovoltaïque vient de la nécessité d'un stockage. En effet, il existe un déphasage entre le captage d'énergie solaire et son utilisation sous forme d'électricité.

De plus, l'accumulateur permet la fourniture d'une puissance élevée sur un temps court, tout en conservant une puissance installée faible.

Les accumulateurs Plomb/acide ou Nickel/Cadmium, de capacité variable selon l'application (10 à 3 000 AH), sont en général installés via un régulateur de charge.

On estime à 93 % le "rendement" global de stockage de l'énergie électrique dans les accumulateurs.

### 2.3.4. Utilisation.

Pour les applications courantes, il est actuellement impossible de concurrencer par l'énergie photovoltaïque le réseau électrique alimenté de façon classique (nucléaire, charbon, fuel).

Le domaine de rentabilité est limité aux cas où la distance de l'application par rapport au réseau est au minimum de 1 km et où l'investissement en système photovoltaïque reste inférieur au coût de raccordement au réseau. L'ordre de grandeur actuel des coûts est 0.25 à 0.3 dollars par kWh, soit environ 6 fois le coût de l'énergie produite par les combustibles fossiles.

*En coût d'investissement, il faut compter environ 10 000 dollars par kW-crête installé si on inclut l'installation et les fournitures.*

Le générateur photovoltaïque peut donc résoudre les problèmes suivants :

- difficultés d'accès, isolement des sites
- coût d'installation de lignes électriques particulièrement élevé
- coût d'exploitation élevé pour des équipements de faible consommation.

Les applications typiques sont :

- télécommunications (relais hertzien, relais TV, relais radio-téléphone, ...)
- électrification rurale
- éclairage public dans des zones éloignées
- pompage d'eau
- signalisation (routière, aérienne, maritime, ...)
- détection, protection (commandes de vannes de sécurité, système d'alarme)
- stations de mesures (stations automatiques météorologiques, mesures de débit, de niveau, comptage de trafic, ...)
- calepettes, camping, ...

*à l'heure actuelle tout au moins,*  
En résumé, ce n'est pas l'énergie solaire photovoltaïque qui permet de réaliser de grosses économies d'énergie (sauf peut-être sur l'éclairage public); elle autorise cependant des applications qui n'auraient peut-être pas vu le jour autrement.

### 2.3.5. Impact environnemental.

L'incidence sur l'environnement de l'énergie solaire photovoltaïque est minime. Elle est limitée à l'impact paysager qu'entraînent les champs de panneaux solaires dans un site vierge.

L'énergie photovoltaïque permet la fourniture d'électricité sans bruit, sans rejets et en l'absence d'une infrastructure de pylônes inesthétiques lorsque l'utilisation est locale.

Une pollution est éventuellement à craindre au niveau des matériaux employés pour la fabrication et la mise en oeuvre des systèmes photovoltaïques :

- l'arséniure de gallium est très dangereux s'il est rejeté à l'environnement : il faut soit éviter les rejets, soit préférer d'autres semi-conducteurs
- les matériaux utilisés pour l'encapsulation peuvent également nuire à l'environnement : des solutions de matériaux alternatifs existent cependant
- les accumulateurs contiennent des métaux lourds très nocifs pour l'environnement (Plomb, Cadmium) : il faut donc les manipuler avec les précautions d'usage.

La critique souvent émise en ce qui concerne l'énergie solaire photovoltaïque est la nécessité de consacrer une surface énorme aux installations.

Une récente étude du Work Watch Institute a cependant démontré que la surface de terrain nécessaire pour produire 1 MW photovoltaïque est inférieure à celle nécessaire pour produire 1 MW par le charbon, si on y inclut les mines. Elle est par ailleurs de 20 à 50 fois inférieure à celle occupée par une centrale hydroélectrique.

Concernant les émissions dans l'environnement, l'US Department of Energy estime que toute la chaîne de production d'énergie à partir de cellules photovoltaïques, fabrication comprise, ne rejette en CO<sub>2</sub> que 0.6 % de ce qu'émet une centrale thermique à combustible fossile et nécessite 50 fois moins d'eau que l'industrie du charbon.

### 2.3.6. En résumé.

#### Avantages

- Entretien réduit
- Autonomie (évite l'approvisionnement en carburant ou remplace des piles)
- Respect de l'environnement
- Pas de pièce en mouvement, ni d'usure, ni de bruit
- Ne nécessite pas de températures élevées, ni de fluides sous pression

#### Inconvénients

- Nécessité de batteries d'accumulateur
- Coût élevé pour des applications domestiques
- Emploi limité aux zones éloignées du réseau électrique

## 2.4. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.

### 2.4.1. Caractéristiques.

Le vent provient de l'échauffement irrégulier par le rayonnement solaire de la surface de la terre, qui crée différentes zones de température, de pression et de densité, et donc un mouvement de l'air. La rotation de la terre engendre des circulations atmosphériques permanentes, que les circonstances locales et les conditions saisonnières et journalières peuvent fortement influencer.

L'énergie cinétique disponible dans le vent dépend de la masse d'air en mouvement (volume, densité) et de sa vitesse, dont on évalue des valeurs moyennes au cours du temps.

L'énergie réellement récupérable est directement proportionnelle à la surface interceptée par le dispositif de récupération (éolienne), et est une fonction cubique de la vitesse du vent : un doublement de la vitesse du vent multiplie la puissance par un facteur 8.

Le rendement de conversion est influencé par une multitude de facteurs : diamètre de l'éolienne, angle d'inclinaison et surface des pales, rendements mécaniques et électriques de l'alternateur, ... Un rendement de 60 % est un maximum théorique et une valeur de 30 % est assez typique.

A titre d'exemple, une éolienne de 34 m de diamètre peut fournir 400 kW en site dégagé lorsque la vitesse du vent est supérieure à 15m/s.

Les plus grands aérogénérateurs fournissent 3 MW avec des pales de près de 100 m de diamètre !

Un paramètre important des éoliennes est le facteur de puissance (capacity factor) qui se définit comme le rapport entre l'énergie effectivement produite par une turbine pendant un temps donné et l'énergie qu'elle aurait délivré si elle avait fonctionné à sa puissance nominale pendant la même période; il est de l'ordre de 30 ... 35 %. Le coût de l'électricité produite par des centrales éoliennes est, à égalité d'énergie fournie, du même ordre de grandeur que celui de l'électricité hydraulique, nucléaire ou produite par des centrales thermiques au fuel ou au charbon. Il est nettement inférieur au coût relatif à l'énergie solaire photovoltaïque.

L'estimation préalable des ressources dépend de la topographie, de la saison et de l'heure du jour; elle est très difficile à réaliser.

L'évaluation d'un "gisement" éolien est plutôt effectué sur un site donné, pressenti pour le placement d'une éolienne, par un enregistrement de la vitesse et de la direction du vent durant une période de temps caractéristique, puis par une évaluation de l'énergie éolienne annuelle disponible.

Il est également possible, s'il existe déjà un réseau de mesure du vent dans une région, de dresser des cartes comportant des lignes "iso-vent", c'est-à-dire des lignes d'égale valeur d'énergie éolienne annuelle.

Sur base de ces cartes, on peut choisir les sites appropriés.

De façon générale, on choisit des sites dégagés (on évite les zones montagneuses ou difficiles d'accès), et susceptible de le rester (pas de construction d'immeubles prévues, pas de végétation en croissance, ...).

On optera pour les sites présentant une vitesse moyenne du vent élevée à 10 m de hauteur (> 5 m/s), mais cependant avec des variations annuelles, saisonnières et journalières acceptables et en évitant des vents extrêmes, des rafales, et une trop grande turbulence. En général, on préfère les crêtes aux collines, ou alors les collines à pente douce et celles situées en terrain dégagé.

Le profil journalier ou saisonnier du vent doit correspondre d'assez près à celui de la consommation.

Enfin, il convient de minimiser la distance entre le site de captage et l'utilisation.

#### **2.4.2. Production et préparation.**

L'appareil utilisé pour capter l'énergie du vent est l'éolienne.

Il s'agit d'une roue munie de pales ou d'une hélice, mue par le vent et qui transmet mécaniquement son énergie soit à une pompe à piston, dans le cas des éoliennes de pompage, ou à un alternateur (ou une dynamo), dans le cas des aérogénérateurs.

L'éolienne de pompage est une roue munie de six à seize pales obliques, de diamètre allant de 1.5 m à plus de 6 m. Elle tourne à 80 tours par minute au maximum et s'oriente dans le vent par un système de girouette.

Les petits aérogénérateurs sont des engins à hélice bipale ou tripale qui s'orientent dans le vent et possèdent un freinage aérodynamique en cas de vitesse de rotation trop importante.

Le diamètre de l'hélice n'excède pas 3 ou 4 m et la puissance fournie varie de 24 à 5 000 W.

Ces aérogénérateurs sont en général couplés à une dynamo, puis à une batterie d'accumulateurs adaptée à l'utilisation.

Ils sont réservés aux applications locales, notamment dans les sites isolés (fermes, ...).

Lorsque la taille de l'aérogénérateur augmente, on utilise de préférence des systèmes à 2 pales en raison de la contrainte du poids. Ces éoliennes sont couplées à des alternateurs qui peuvent fournir le courant électrique sur le réseau vers l'utilisation. Elles tournent plus lentement que les petits aérogénérateurs et sont donc pourvues d'un système de démultiplication. Au-delà d'une puissance de 0.5 ... 1 MW, on préfère installer plusieurs éoliennes tripales, c'est ainsi qu'il existe, notamment le long des côtes californiennes, de véritables champs d'éoliennes.

Si les éoliennes les plus courantes sont les appareils à axe de rotation horizontal, il existe cependant également des éoliennes à axe vertical, soit constituées de 2 ou 4 pales semi-sphériques décalées (c'est le rotor Savonius, basé sur le même principe que les anémomètres à coupelles), soit constituées de 2 immenses pales cintrées (c'est l'éolienne de Darrieus).

#### **2.4.3. Transport.**

Comme pour les capteurs photovoltaïques, les petits aérogénérateurs à usage "domestique" ne sont justifiés que lorsque la distance par rapport au réseau électrique est grande et l'investissement inférieur au coût de raccordement.

La difficulté, dans le cas de ces petits appareils est la nécessité de stockage de l'énergie électrique au moyen d'accumulateurs 12 V. Au rendement de conversion éolienne, il faudra alors ajouter les contraintes liées à la capacité, à la maintenance et à la décharge des accumulateurs.

Cependant, dans le cas de champs d'éoliennes, on transporte l'énergie électrique jusqu'à l'utilisation par des techniques classiques de lignes aériennes ou enterrées.

Dans les pays nordiques, certaines éoliennes servent à la production de chaleur. Pour ces applications, le stockage d'énergie s'effectue alors thermiquement.

A l'autre extrémité de l'échelle, pour les applications ponctuelles, limitées à une cinquantaine de watts (voiliers, camping, ...) on a imaginé des micro-éoliennes transportables.

#### 2.4.4. Utilisation.

Des applications domestiques sont possibles pour les habitations isolées du réseau électrique, pour alimenter tous les récepteurs non calorifiques.

Les éoliennes mécaniques sont utilisées pour le pompage d'eau dans les exploitations agricoles, notamment pour abreuver le bétail et pour l'irrigation : elles sont couplées à une pompe à piston placée au bas de l'engin et au-dessus de la nappe d'eau. Pour une roue de 2 m, et un pylône de 6 m, on peut espérer pomper l'eau avec un débit de 3 500 litres par jour en moyenne.

Les éoliennes individuelles trouvent également des applications pour l'alimentation des phares et des balises maritimes, des relais de télécommunication, sur les bateaux, dans certaines îles, près des fermes isolées, dans les chalets de montagne, les campings, les villages de brousse.

Quant aux champs d'éoliennes, ils peuvent bien entendu fournir l'électricité, de façon classique, pour n'importe quelle application.

#### 2.4.5. Impact environnemental.

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est probablement celle qui rencontre le plus d'opposants.

Dans une centrale éolienne, parfois constituée de plusieurs milliers d'appareils, l'impact visuel est le prix qui est payé pour l'absence de toute autre pollution invisible. C'est un fait inévitable : les endroits les plus venteux sont souvent les plus beaux, et les plus "sauvages". Une mise en place des machines en respectant autant que possible le site d'installation est, par conséquent, vitale.

Une crainte très commune est également de voir la construction et l'exploitation d'une centrale éolienne perturber l'écologie locale : vie des occupants du terrain, remise en état des abords après construction, impact sur la vie des oiseaux. Ces inconvénients ne semblent cependant pas toujours justifiés : durée assez courte de la construction, possibilité d'exploiter les terrains dont les éoliennes n'occupent qu'une petite partie, impact sur la vie animale du même ordre que celui causé par les pylônes haute-tension.

Les nuisances sonores, elles, ne sont pas à minimiser. Bien que n'étant en général pas supérieures à ce que l'on rencontre en site industriel durant la journée, ce type de nuisance est moins accepté en zone "vierge", la nuit comme le jour. Une éolienne moderne émet un niveau de bruit de 45 dBA à une distance d'environ 200 mètres, ce qui est considéré comme acceptable : c'est la continuité du bruit qui est gênante.

Il existe aussi des possibilités d'interférences avec les télécommunications. Cependant des solutions existent à ce problème : amplification locale, connexion par câble, éviter la proximité d'aéroports, ...

Au niveau de la sécurité, les turbines éoliennes modernes sont équipées de systèmes de commande sophistiquée qui donnent des avertissements en temps opportun sur les pannes possibles des nombreux composants de la machine.

Certains accidents ont été enregistrés jadis, essentiellement pour des raisons d'organisation médiocre ou de manque de respect des règlements de sécurité.

Notamment, il existe actuellement sur la plupart des éoliennes un système de "mise en berne" automatique des pales de l'hélice en cas de vent trop violent.

Enfin, citons pour mémoire, comme nous l'avons fait pour l'énergie photovoltaïque, l'inconvénient environnemental des systèmes de stockage de l'énergie électrique : plomb, cadmium, ...

#### 2.4.6. En résumé.

##### Avantages

- Energie parfaitement distribuée sur le globe
- Utilisations nombreuses, adaptables selon la taille de l'éolienne
- Adaptables au courant continu, alternatif et à la transmission mécanique
- Régulation simple et efficace
- Installation aisée
- Entretien minimum

##### Inconvénients

- Parfois inesthétique, occupe du terrain
- Bruyant
- Sensible aux vents violents
- Investissement souvent important
- Nécessite souvent le stockage par batteries
- Pour les grands aérogénérateurs : démarrage nécessitant un vent d'au moins 5 m/s

## 2.5. ENERGIE HYDRAULIQUE.

### 2.5.1. Caractéristiques.

Il est superflu de rappeler l'extraordinaire puissance de l'eau : il suffit de s'imaginer les destructions provoquées par les torrents, l'érosion autour des fleuves, les inondations, les raz-de-marée, ... Si l'eau possède une capacité de destruction, elle peut aussi développer un travail utile : en descendant du haut des collines et des montagnes, l'eau porte en elle une énergie considérable, gratuite et inépuisable, la "houille blanche".

Rappelons qu'ici encore c'est le soleil, par le cycle de l'eau (évaporation, nuages, vent, pluie) qui permet d'une part d'accumuler l'énergie potentielle de l'eau sur les sommets et, d'autre part, de la transformer en énergie cinétique par les cours d'eau qui dégringolent vers la vallée et vers les océans.

Si on ne l'exploite pas, cette énergie est perdue sous forme de chaleur dans les pierres et les océans.

Il est possible de récupérer l'énergie hydraulique par des centrales, de toutes tailles.

La sélection d'un site commence par la mesure de l'énergie récupérable liée à la quantité d'eau disponible et à la hauteur de chute de celle-ci.

Le débit d'un cours d'eau varie selon la saison et d'une année à l'autre.

L'idéal est de mesurer le débit (par flotteur ou par déversoir) durant la période la plus longue possible.

On peut distinguer trois types de chutes exploitables :

- les hautes chutes, supérieures à 100 ... 150 m pour lesquelles on met en oeuvre des travaux importants de canalisation. Les débits sont en général assez faibles, mais cela est compensé par la puissance élevée de l'eau tombant à grande vitesse;
- les chutes moyennes, entre 15 m et 100 m, avec des débits plus élevés et des canalisations de diamètre plus faible;
- les basses chutes, entre 1 m et 15 m, valables uniquement pour des usages locaux et pour lesquels un bassin de retenue doit être construit. Les débits sont élevés, mais la vitesse d'écoulement est réduite.

La puissance hydraulique disponible est proportionnelle au produit hauteur x débit.

Dans certains cas où la dénivellation est importante, mais continue, sans accident du type chute, il est possible d'exploiter l'énergie hydraulique au fil de l'eau en plaçant simplement le système de récupération d'énergie dans le courant.

De façon plus générale, le système de récupération peut être de deux types : la roue à aubes, pour les petites chutes et les applications au fil de l'eau et la turbine, mieux adaptée à la conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique.

Cette conversion s'opère au moyen d'un alternateur ou d'une dynamo placée en bout d'arbre de la turbine ou de la roue, éventuellement par l'intermédiaire d'une démultiplication.

Le seuil de rentabilité d'une minicentrale construite, par exemple pour vendre l'énergie électrique aux distributeurs d'électricité, est situé aux alentours de 1 MW installé. Le rendement total (mécanique + électrique) peut atteindre 80 %.

Les microcentrales, à usage local, ont une puissance variant entre 5 et 30 kW environ et un rendement plus faible, de l'ordre de 50 %.

### 2.5.2. Production et préparation.

Dans les centrales d'une certaine importance, on est amené à aménager le site d'exploitation. Le plus souvent, il faut construire :

- un ouvrage de prise d'eau,
- un barrage de retenue pour stocker l'eau en période d'abondance,

- une conduite forcée,
- une usine à une ou plusieurs turbines,
- un canal de fuite pour restituer l'eau turbinée.

La roue à aubes, bien que datant de l'époque biblique est loin d'être obsolète car mieux adaptée et plus économique que la turbine à hélice pour les stations de petite puissance.

On distingue en général les roues mues d'en-dessus (overshot water wheel) et les roues mues d'en-dessous. Les premières peuvent être utilisées pour des dénivellations jusqu'à une dizaine de mètres et des débits de 1 à 30 m<sup>3</sup>/s : l'eau est guidée vers la roue, puis tombe par gravité sur les aubes.

Les secondes sont plus adaptées aux petites dénivellations (3 m maximum), mais aux plus grands débits (jusqu'à 100 m<sup>3</sup>/s) : l'eau pousse les aubes par le dessous de la roue.

Les roues à aubes de conception ancienne tournent lentement et sont utilisées pour la conversion en énergie mécanique (de plus en plus rarement) ou en énergie électrique grâce à une démultiplication.

Les roues à aubes modernes s'appellent turbine Francis pour les chutes moyennes et turbine Pelton, conçue pour les hautes chutes : il s'agit de roues horizontales munies d'augets en périphérie. Les turbines Pelton autorisent des vitesses de rotation jusqu'à 1 000 tours par minute.

Les turbines à hélice sont à 4 ou 8 pales disposées autour d'un moyeu. Les pales peuvent être orientables, comme dans les turbines Kaplan, bien adaptées aux basses chutes. Pour les centrales au fil de l'eau, on opte en général pour ce type de turbine, incluse, avec l'alternateur dans un bulbe robuste et étanche.

L'alternateur est relié à l'arbre de la turbine avec un manchon d'accouplement, il crée le courant alternatif.

Le régulateur maintient constante la vitesse de rotation de la roue ou de l'hélice. Il agit sur le débit d'eau amené.

Comme pour les éoliennes, l'énergie électrique peut être stockée dans des accumulateurs, utilisée localement ou distribuée sur le réseau.

### **2.5.3. Transport.**

Sous forme mécanique, il est illusoire de transporter l'énergie très loin : les roues à aubes utilisées dans les moulins et les scieries sont d'un temps révolu. Actuellement, l'énergie hydraulique est surtout transformée en électricité et les contraintes sont alors identiques à celles rencontrées pour les éoliennes.

### **2.5.4. Utilisation.**

Exceptés les usages locaux dans les endroits isolés, mais situés en bordure d'un cours d'eau, les centrales hydroélectriques sont considérées, au même titre que les centrales nucléaires ou les centrales thermiques, comme productrices d'énergie électrique pouvant être distribuée de façon classique par les lignes aériennes ou enterrées et servant à de multiples usages industriels ou domestiques.

### **2.5.5. Impact environnemental.**

A priori, on pourrait croire que l'énergie hydraulique en elle-même a un impact négligeable sur l'environnement : pas de rejet, pas de pollution de l'eau, pas beaucoup de bruit. Cependant, la présence d'un barrage sur un cours d'eau a quelquefois une incidence irréversible sur le bilan écologique à long terme.

Parfois, le barrage peut créer un environnement meilleur pour certaines espèces animales ou végétales, puisqu'il aide à diminuer l'impact négatif des crues et de l'érosion.

Il faut cependant être conscient que dès qu'un barrage existe, il y a aussi création d'une lagune ou d'un lac là où précédemment il y avait un courant d'eau. On inonde un écosystème existant, encourageant l'accumulation de sédiments et probablement, fournissant aux moustiques un magnifique terrain d'élevage.

En outre, la présence de cette réserve d'eau entraîne, derrière le barrage, l'élévation du niveau de la nappe, par infiltration, et l'abaissement de celui-ci en aval.

D'autres modifications résultent de la construction du barrage, d'autant plus appréciables que le barrage est haut et large

- la création d'une barrière dans l'écosystème, au même titre qu'une autoroute dans une forêt : les animaux et en particulier les poissons rencontrent un obstacle dans leur migration.  
L'introduction d'échelles à poissons résoud cependant une partie du problème.
- la modification de la flore locale...
- dans les régions à faible pluviosité, l'évaporation de l'eau des barrages entraîne une concentration des éléments polluants
- la vase riche en matières minérales et en matières organiques, retenue au niveau du barrage, ne peut plus fertiliser des zones agricoles en aval.

Enfin, il existe un impact visuel non négligeable : non seulement la présence d'un immense ouvrage en béton endommage le paysage, mais, de plus, certaines zones particulièrement agréables sont complètement inondées.

#### 2.5.6. En résumé.

##### Avantages

- Source inépuisable, sans rejets dans l'environnement
- Indépendance énergétique dans les lieux éloignés du réseau et dans les régions fort accidentées
- Frais de fonctionnement faible et très grande fiabilité des machines
- Compatibilité avec le réseau électrique existant

##### Inconvénients

- Nécessité d'une puissance installée minimum pour atteindre le seuil de rentabilité car investissement initial élevé (prix de revient au kWh produit en général supérieur à celui des autres centrales)
- Difficulté de trouver un site adéquat, à la fois accidenté, présentant un cours d'eau, mais une possibilité d'installation d'infrastructures locales et sans entraîner de modifications trop graves sur l'environnement
- Production dépendante des conditions de pluviosité
- Impact visuel négatif
- Impact écologique souvent irréversible

## 2.6. L'ÉNERGIE DES MARÉES.

### 2.6.1. Caractéristiques.

La marée correspond au mouvement pseudo-périodique de la mer ou de la terre dont la principale forme connue est la marée océanique astronomique.

Le potentiel générateur de cette marée provient de deux types de forces :

- la pesanteur terrestre
- la gravitation due essentiellement au soleil et à la lune.

Lorsque les actions des deux astres s'ajoutent, elles représentent moins de 1/10 000 000 de celle de la pesanteur, cependant, agissant sur une masse d'eau considérable, elles provoquent un mouvement qui, bien que négligeable à l'échelle des profondeurs des océans, est néanmoins très sensible en surface, sur les côtes.

La périodicité des marées possède trois harmoniques : la première évolution est lente comme la déclinaison des astres, qui atteint ses valeurs extrêmes deux fois par mois lunaire pour la lune et deux fois par an pour le soleil; la seconde évolution est plus rapide, comme l'angle horaire, qui retrouve une même valeur chaque jour, c'est le terme diurne; la troisième évolue comme le double de l'angle horaire, c'est le terme semi-diurne.

Par ailleurs, la configuration des bassins océaniques modifie beaucoup, par effet de résonance, l'amplitude de la réponse de l'océan à la force génératrice.

Si on ajoute encore l'effet de la force de Coriolis et la pression de l'eau, on obtient un phénomène très complexe et très variable selon les endroits.

Sur les côtes de l'Atlantique, par exemple, le type semi-diurne lunaire est prépondérant : on observe deux pleines mers et deux basses mers par jour lunaire (24H50); l'heure des pleines mers retarde en moyenne de 50 minutes par jour.

Le marnage (écart entre la hauteur de la basse mer et celle de la pleine mer suivante) évolue au cours du temps, il est maximal lorsque la lune passe par ses tropiques : il peut atteindre 14.6 m au Mont-Saint-Michel (France).

Au voisinage du sol marin, le frottement apporte des modifications au modèle du mouvement et est aussi la cause de la dissipation d'énergie mécanique en chaleur. On peut calculer que la puissance moyenne ainsi dissipée dans les marées est de l'ordre du million de méga-watts, soit environ l'équivalent de l'énergie moyenne de toute nature consommée par l'humanité. Elle est malheureusement très dispersée et on ne peut envisager de la capter rentablement que dans les localités où le marnage est très grand. En outre, la puissance captée suit pratiquement le rythme lunaire, alors que la puissance consommée suit le rythme solaire. Il est donc nécessaire de répartir cette énergie captée sur de grands espaces, voire plusieurs pays. Ces difficultés expliquent le faible nombre d'applications de cette récupération d'énergie. La seule usine marémotrice fonctionnant dans le monde est celle de La Rance en France (Bretagne); sa production annuelle approche actuellement le demi-million de MWh.

### 2.6.2. Production et préparation.

Une première approche est de stocker l'eau à marée montante, puis, à marée descendante, de la laisser s'écouler à travers une turbine.

Une seconde approche, plus récente, est de profiter à la fois de la montée et de la descente de l'eau.

Le choix d'un site marémoteur nécessite la recherche de régions à fortes marées, doublées d'une possibilité d'aménagement d'un vaste réservoir d'eau utilisable. L'isolation du site de captage du reste de la mer peut également constituer un aspect important.

Les aménagements comprennent, dans l'ordre :

- une écluse
- l'usine proprement dite avec ses groupes de conversion d'énergie
- une digue-morte
- un pertuis de vannage.

La technologie est basée sur l'utilisation de groupes bulbes qui contiennent une turbine à hélice du type Kaplan couplée à un alternateur enfermé dans un bulbe étanche.

A La Rance, chaque groupe fournit 10 MW et il existe actuellement 24 groupes de ce type en activité.

L'exploitation française a permis de démontrer les remarquables possibilités des chutes de faible hauteur, et cela au moyen de groupes bulbes capable de fonctionner aussi bien en turbine qu'en pompe (lors de la descente de l'eau et lors de sa montée), avec une faible dénivellation, comme cela est le cas pour les centrales "au fil de l'eau" installées sur les rivières.

### **2.6.3. Transport.**

Les usines marémotrices ne peuvent se justifier que pour des puissances de production importantes (200 - 300 MW au minimum). Dans ces conditions, il sera toujours envisagé une production "industrielle" d'énergie électrique, distribuée classiquement par un réseau de pylônes et de câbles électriques.

### **2.6.4. Utilisation.**

Ici encore, l'électricité produite peut servir à tous les usages, industriels ou domestiques.

### **2.6.5. Impact environnemental.**

Les usines marémotrices n'impliquent que très peu de nuisances sur l'environnement : pas de rejet à l'atmosphère, pas de rejet à la mer, peu de bruit, ...

L'impact visuel est limité et n'est certainement pas plus problématique que celui des installations portuaires.

Le seul impact possible est l'éventuelle dégradation de l'écologie marine locale.

Si, comme à La Rance, on installe l'usine dans un fleuve côtier (la Rance), sur lequel la marée agit, l'impact peut être un peu plus gênant et du même ordre que celui d'un barrage ordinaire. En effet, dans ce cas spécifique, on a créé, à 4 km de l'embouchure, un barrage de 750 mètres de long, un bassin de 220 ha et d'un volume maximal de 184 millions de m<sup>3</sup> qui forme certainement une barrière écologique non négligeable pour les poissons et autres espèces aquatiques.

#### 2.6.6. En résumé.

##### Avantages

- Aucun rejet dans l'environnement
- Energie disponible, inépuisable
- Exploitation à la fois de la montée et de la descente de l'eau

##### Inconvénients

- Importance et durée des travaux
- Investissements considérables
- Choix très délicat d'un site marémoteur

## 2.7. LA BIOMASSE.

### 2.7.1. Caractéristiques.

Lors de la photosynthèse, les végétaux absorbent l'énergie solaire. La biomasse ainsi produite est la forme la plus ancienne d'énergie du monde végétal. Toutes les formes de matériau végétal et leurs dérivés, y compris les résidus des forêts et des cultures, les déchets animaux, les eaux résiduelles et les composants organiques des déchets collectifs et domestiques font partie de la biomasse.

La ressource essentielle est le carbone fixé de manière renouvelable par le processus de la photosynthèse.

La conversion de la biomasse en énergie est peut-être l'option énergétique renouvelable la plus complexe sur les plans technique, économique et social :

- diversité des propriétés chimiques et physiques
- volume
- coût du transport.

On fait en général une distinction entre la conversion de déchets et de résidus, qui accroît le bilan énergétique et le rendement de l'activité économique existante (comme l'agriculture par exemple) et la culture de produits de la biomasse à des fins énergétiques (comme la forêt par exemple).

On distingue également trois catégories, selon l'origine de la biomasse :

- les résidus forestiers et ceux du traitement du bois
- les résidus agricoles et les déchets animaux
- les cultures énergétiques.

Les formes de conversion sont nombreuses : tout simplement, la paille peut être brûlée pour alimenter un gazogène; par gazéification (chauffage à 700 - 1 000° C en présence d'oxygène), on peut également lui faire fournir de l'énergie mécanique; par pyrolyse (chauffage à 300 - 700° C à l'abri de l'air), on peut obtenir des combustibles liquides ou gazeux; par hydrolyse, on fabrique des sucres et des alcools; par fermentation à l'abri de l'air, on la transforme en gaz méthane dont l'utilisation domestique est aisée.

On peut également valoriser les feuilles sèches, les fanes de primeurs, les déchets de houblon, des vignes, le lisier d'animaux, les ordures ménagères, les gadoues, les eaux d'égoûts, les algues microscopiques d'eau douce, les jacinthes d'eau, les boues de station d'épuration.

Enfin, le bois est un combustible, au même titre que le charbon ou le pétrole.

A cause de leur grande importance et de leur spécificité, le bois de chauffage et les biofuels seront abordés dans des chapitres séparés.

### 2.7.2. Production et préparation.

Les procédés de conversion sont nombreux : pyrolyse, hydrogazéification, hydrogénation, distillation, hydrolyse, compostage, digestion aérobie, digestion anaérobie. Cependant, à des fins de production à grande échelle d'énergie sous forme transportable et facile à utiliser, nous aborderons essentiellement la fermentation méthanique dans les digesteurs.

Pour qu'une fermentation se déroule convenablement, la réaction doit s'effectuer :

- à l'abri de l'air (anaérobie)
- aux environs de 35° C
- dans un milieu légèrement alcalin
- en présence de micro-organismes microbiens favorisant la production de méthane.

→ Typiquement, le digesteur est une cuve étanche, par exemple une fosse en béton à demi enterrée, que l'on charge de façon discontinue, en fonction de la biomasse disponible. Le gazomètre est une cloche coulissant au-dessus de cette cuve et recevant le gaz méthane formé.

La première étape du processus est la préfermentation à l'air libre, où la teneur en eau des déchets doit être maintenue entre 65 % et 75 %, ainsi les conditions d'alcalinité s'établissent d'elles-mêmes et les températures s'égalisent dans la masse de matière.

Après plusieurs jours, la matière fraîche commence à se décomposer, la température atteint 60 ... 70° C et il y a dégagement de gaz carbonique, d'ammoniac, de gaz sulfuré.

Après cette étape a lieu la fermentation à l'abri de l'air, à température plus basse (35 ... 37° C), qui produit le méthane. La phase maximale de production est atteinte trois semaines après le début de cette seconde étape, le processus complet durant une quinzaine de semaines.

En fin de cycle, la fosse est vidangée et nettoyée en vue de préparer une nouvelle charge.

Le gaz est évacué par un tuyau au-dessus de la cloche du gazomètre; il contient en général au moins 60 % de méthane, et son pouvoir calorifique supérieur n'excède pas 20 MJ/Nm<sup>3</sup>. Après épuration, le biogaz peut atteindre 35 MJ/Nm<sup>3</sup> et 95 % de méthane.

A plus grande échelle, on utilise des appareils à chargement continu, qui évitent d'avoir à ouvrir et recharger la fosse, mais qui exigent un approvisionnement régulier en matières fermentescibles fraîches. Ils sont constitués de tuyaux d'approvisionnement et d'évacuation, éventuellement munis de pompes hélicoïdales.

Il est enfin possible d'alimenter, avec le gaz, un moteur fixe et de produire de l'électricité, avec un rendement de l'ordre de 90 %.

La production globale d'une installation, ainsi que sa taille, dépendent de l'endroit d'exploitation et de la source de la biomasse.

On peut citer, à titre d'exemple

- un ordre de grandeur de 1 m<sup>3</sup> de gaz formé par jour et par animal pour du fumier de bovin fermentant dans des cuves de 10 m<sup>3</sup>,
- 1 m<sup>3</sup> de gaz par jour pour du lisier de porc,
- une usine de traitement des déchets solides domestiques traitant 1 850 tonnes par jour dont environ 30 % de matière est convertie en biométhane
- un digesteur de station d'épuration traitant entre 150 et 900 m<sup>3</sup> de matière, pour produire l'équivalent de 100 à 250 GJ thermiques par jour (on peut par exemple compter, pour cette application, un ordre de grandeur de 4 tonnes de gaz produites par an par équivalent-habitant),
- un digesteur de brasserie produisant 2 000 à 2 500 m<sup>3</sup> de méthane par jour,
- ...

### 2.7.3. Transport.

Le transport de la biomasse à grande distance est exclu. Pratiquement, il faut envisager des digesteurs localisés auprès des décharges, des installations agricoles, des stations d'épuration, éventuellement en regroupant quelques producteurs ensemble, puis le transport du gaz produit, par des procédés classiques, gazoducs par exemple. Le stockage du gaz peut se faire par gazomètres souples ou gazomètres à cloche, mais il faut reconnaître qu'il est assez dangereux. Si le processus fournit de l'électricité, on retrouve les problèmes de stockage de l'énergie déjà rencontrés pour les conversions éolienne et photovoltaïque.

#### 2.7.4. Utilisation.

L'usage du biométhane pourrait être exactement identique à celui du gaz naturel, essentiellement la combustion dans les chaudières à des fins industrielles ou domestiques. Pourtant, l'essentiel de l'utilisation reste locale. Le biométhane est, par exemple, un carburant idéal pour les exploitations agricoles : il s'agit d'autoproduction d'énergie.

La combustion du biométhane peut se faire avec des brûleurs ordinaires, pour autant que l'on effectue un réglage de façon à conserver un rapport volumétrique air/gaz carburant idéal (souvent de 6 à 10).

Si le biogaz sert à alimenter un moteur thermique entraînant à son tour une génératrice, l'électricité produite peut être distribuée aux localités proches. A titre d'exemple, à Achères, en France, on exploite une station d'épuration pour produire 70 000 m<sup>3</sup> de gaz par jour qui, transformé en électricité assure 70 % des besoins de 215 000 habitations.

#### 2.7.5. Impact environnemental.

Un des avantages de la fermentation méthanique est qu'elle permet d'éliminer l'essentiel des nuisances des déjections animales sur l'environnement. Le pouvoir polluant des lisiers d'un élevage important pose souvent un problème sanitaire et écologique difficile à résoudre : envahissement des plans d'eau par des algues proliférantes, par des larves et des têtards; odeurs désagréables, mouches, risques de contamination.

Le coût de l'épuration biologique est élevé et cette opération n'annule pas complètement les dangers de pollution des cours d'eau. La fermentation méthanique supprime ces méfaits.

L'utilisation de la biomasse, de manière générale permet d'exploiter nos déchets, plutôt que de les combattre.

Il ne faut cependant pas sous-estimer les impacts négatifs du biogaz. Quand il est mélangé à l'air, dans des proportions de 5 à 14 % en volume, le méthane peut exploser à la moindre étincelle.

Si le même problème est rencontré avec le gaz naturel, il faut reconnaître que les systèmes de sécurité sont plus sophistiqués dans ce cas que dans les installations, parfois artisanales, des exploitations agricoles ou de stations d'épuration.

Le biogaz contient, comme le gaz naturel, une certaine proportion de soufre qui participe à la pollution en SO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Dans le choix des matériaux de construction, on essaiera d'éviter, dans la mesure du possible, ceux qui demandent une importante structure industrielle pour leur fabrication (aluminium, plastiques, etc). Même dans la digestion anaérobie, le perfectionnisme technologique entraîne un gaspillage, car les hauts rendements demandent un matériel élaboré.

Enfin, les effluents des digesteurs, débarrassés de leurs odeurs, peuvent être utilisés comme engrais, mais il convient d'être très prudent : la teneur en métaux lourds ou autres polluants peut s'avérer toxique pour l'environnement.

### 2.7.6. En résumé.

#### Avantages

- Valorisation et diminution des nuisances des déchets
- Simplicité des installations
- Faible coût de production
- Utilisation partout dans le monde, y compris dans les pays pauvres

#### Inconvénients

- Combustible de moins bonne qualité que le gaz naturel
- Danger d'explosion à la production, au transport et au stockage du biogaz
- Difficulté d'alimentation des digesteurs en biomasse
- Difficulté de la collecte et du transport de la biomasse.

## 2.8. LE BOIS.

### 2.8.1. Caractéristiques.

Le bois reste dans le Monde la première source d'énergie primaire : 60 % de l'énergie consommée en Afrique et 90 % dans les pays sahéliens, mais également 4 à 5 % en France.

Les produits forestiers à finalité énergétique sont les branches des arbres dont les grumes sont destinées au sciage, ainsi que les perches de taillis ou d'éclaircies, mais aussi les déchets de scieries et d'industries papetières.

Hormis la fabrication de bio-méthane par les déchets forestiers (voir chapitre précédent), l'exploitation énergétique se fait exclusivement par combustion, dans des cheminées (feux ouverts), des poêles ou des chaudières et pour le chauffage de locaux.

La biomasse forestière est essentiellement composée d'eau et de trois polymères végétaux, la cellulose, les hemicelluloses et la lignite.

Le bois est constitué de 48 à 50 % de carbone, 42 à 46 % d'oxygène, 6 à 7 % d'hydrogène et 0 à 2 % d'azote.

L'humidité et la teneur en cendres varient selon le produit : l'écorce possède 50 à 70 % d'humidité et une teneur en cendres pouvant atteindre 9 %, alors que le bois provenant de déchets de menuiserie (copaux secs) ne présente que 13 à 18 % d'humidité et une teneur en cendre de 0 à 1.5 %. Le pouvoir calorifique inférieur varie selon l'essence : de 16.7 MJ/kg pour le bouleau et le peuplier sec à 19.7 MJ/kg pour le pin sec.

La masse volumique du bois est située entre 400 et 900 kg/m<sup>3</sup> (la masse volumique du stère varie de 250 à 500 kg/m<sup>3</sup>) et la teneur en matières volatiles est très élevée : de l'ordre de 70 à 75 %.

La combustion du bois se déroule en trois phases : une phase de séchage, où l'eau contenue dans le bois s'évapore, une phase de pyrolyse où, sous l'effet de la chaleur, les matières volatiles se dégagent, leur combustion se déroule par apport d'air secondaire et enfin, une phase où le résidu charbonneux (les braises) achève sa combustion.

La contrainte essentielle des foyers de combustion du bois est la nécessité d'une chambre chaude pour faciliter le séchage et ultérieurement les réactions chimiques de la combustion. Il convient également d'apporter suffisamment d'air pour éviter la formation d'imbrûlés et de goudrons. Les cendres contiennent, selon l'essence du bois, du sodium, du potassium, du calcium, du magnésium, du fer, de l'aluminium, du silicium, ...

### 2.8.2. Production et préparation.

*essentiellement*  
L'exploitation du bois passe par une série d'opérations parfois assez longues, difficilement automatisables et dépendant souvent des conditions climatiques. Il s'agit de l'abattage des arbres, de l'élagage, du débardage, du ramassage, du sectionnement en rondins, du transport, du sciage, du broyage ou du déchiquetage, de l'alimentation du système de chauffage, du contrôle de la combustion, puis de la récolte des cendres.

A grande échelle, on peut imaginer des forêts planes, accessibles, plantées en sol fertile pour cet usage précis, des engins motorisés assurant les opérations d'abattage, d'élagage et de débardage. Le sciage peut être assuré par de grandes scies circulaires alimentées automatiquement, le broyage ou le déchiquetage peut se réaliser grâce à des marteaux broyeurs, des déchiqueteuses à tambour, à vis ou à disque. L'alimentation du foyer peut être effectuée par vis d'Archimède, par injection cyclonée de matériau déchiqueté ou par grille inclinée et tapis roulant.

Un équipement de manutention, par exemple un extracteur à racleurs, peut collecter les mâchefers en bas des grilles et même les cendres pulvérulentes.

Dans de très bonnes conditions, on peut espérer un rendement moyen de 80 %.

Les pertes se font par les fumées, le CO, les cendres et le rayonnement. Avec les cheminées à feu ouvert, 10 à 20 % seulement de l'énergie potentiellement contenue dans le bois sert à chauffer la pièce.

### **2.8.3. Transport.**

Le transport depuis la forêt jusqu'à l'utilisation est assuré par la route, le chemin de fer, les voies navigables, les mers. Afin de conférer aux unités de production de chaleur à bois une automaticité et une souplesse d'utilisation comparables à celles utilisant d'autres combustibles, les équipements de combustion disposent de matériels pour le stockage du combustible. Il s'agit de silos en métal ou en maçonnerie implantés en système aérien ou enterré.

Le remplissage peut se faire par des équipements de manutention ou par gravité. Ces stockages doivent être couverts, aérés et leur sol doit permettre une éventuelle évacuation d'eau.

### **2.8.4. Utilisation.**

Il s'agit exclusivement d'équipements destinés au chauffage d'habitat individuel : cheminées à feu ouvert, avec ou sans récupérateurs de chaleur; ensemble bloc foyer/échangeur/récupérateur/fluide caloporteur (insert); cuisinières, poêles ou chaudières de chauffage central à eau chaude. Le matériel peut être à tirage naturel ou à tirage forcé par des ventilateurs ou des extracteurs.

### **2.8.5. Impact environnemental.**

Le bois représente dans les régions boisées une solution économique et, raisonnablement mené, un chauffage peu polluant, renouvelable.

Toute la nuance est dans cette condition "raisonnablement mené".

L'entretien d'une forêt destinée au chauffage passe parfois par son appauvrissement, son uniformisation.

La pratique d'achat du bois pour le chauffage encourage la déforestation. A grande échelle comme en Afrique ou en Asie, l'usage du bois comme source d'énergie a été la cause principale du déboisement et de la désertification des régions arides. Le résultat en est une augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En fait, l'aspect "renouvelable" de l'énergie-bois n'est que relatif : il faut parfois le temps d'une vie humaine pour faire pousser un arbre susceptible de servir comme bois de chauffage !

Le débardage des arbres abîme considérablement les forêts. Les engins motorisés utilisés dans la forêt consomment eux-mêmes beaucoup d'énergie, polluent l'air et sont bruyants.

Par ailleurs, la combustion n'étant jamais parfaite, les fumées contiennent des polluants qui peuvent être classés en trois catégories :

- les particules en suspension dans les produits de combustion : celles de petit diamètre (< 2.5 µm) sont plus dangereuses car leur temps de déjour dans l'air est long et leur taille les rend facilement respirables. Le danger est l'allergie et les irritations.
- les hydrocarbures et les composés organiques condensables, souvent appelés goudrons : plusieurs centaines sont identifiés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques étant

considérés comme les plus dangereux pour l'homme, ils accroissent les risques de cancer du poumon.

- les gaz, tels que CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, hydrocarbures légers, NO<sub>x</sub>. Le CO étant le principal et aussi le plus dangereux pour l'homme.

On ne trouve pas de soufre dans le bois ce qui est l'un de ses gros avantages.

Les cendres contiennent une proportion non négligeable de métaux lourds qu'il faut évacuer.

Le bois est donc loin d'être un combustible écologique. Evidemment, la pollution peut être limitée plus facilement dans le temps et dans l'espace que pour les produits pétroliers.

Les actions à engager sont notamment :

- éviter la formation de gaz de pyrolyse dans le magasin de combustible (en amont du foyer) en situant celui-ci à l'extérieur de l'appareil ou en le maintenant à basse température;
- optimiser la combustion dans la zone primaire de combustion en limitant l'étendue de celle-ci et en y maintenant une température élevée;
- favoriser la destruction des émissions lors de la combustion secondaire en augmentant la turbulence, le temps de séjour et la température;
- réduire les émissions par des filtres, une postcombustion catalytique, ...

#### 2.8.6. En résumé.

##### Avantages

- Source d'énergie naturelle
- Renouvellement possible
- Chaleur agréable
- Utilisation des déchets forestiers : branches, bois mort
- Absence de soufre

##### Inconvénients

- Faibles rendements
- Déforestation, détérioration des forêts
- Pollution de l'air au moment de l'abattage et de la combustion
- Nécessité d'évacuer les cendres
- Manutention difficile car forme solide peu compacte
- Contrôle de la combustion malaisé

## 2.9. BIO-CARBURANTS.

### 2.9.1. Caractéristiques.

On appelle biocarburants les carburants produits à partir de matières végétales, appelées encore biomasse.

Par rapport aux combustibles, utilisés dans des foyers pour le chauffage d'habitations ou à des fins industrielles, les carburants se définissent par leur usage dans les moteurs à explosion.

Ces moteurs sont de types divers :

- à allumage commandé, où le mélange air-carburant est comprimé, puis allumé au moment opportun par l'étincelle d'une bougie. Le taux de compression est compris entre 9.5 et 10
- Diesel, où le taux de compression est compris entre 15 et 17 et ne concerne que l'air de combustion, le carburant n'étant injecté qu'en fin de compression.

L'indice d'octane d'un carburant est un nombre qui caractérise le pouvoir antidétonnant d'un carburant : plus il est élevé, plus il supporte sans cliquetis, une compression importante, gage d'un bon rendement du moteur.

L'indice de cétane est pour les carburants Diesel l'équivalent de l'indice d'octane pour les carburants à essence.

Les biocarburants ordinairement fabriqués sont :

- les hydrocarbures, presque équivalents aux dérivés du pétrole, mais obtenus par synthèse, notamment à partir d'huiles végétales;
- les produits oxygénés, essentiellement alcools et éthers organiques.

Parmi ces derniers, l'éthanol est le principal carburant produit par fermentation de la biomasse.

Il est obtenu à partir des sucres présents à l'état plus ou moins polymérisé dans le monde végétal : betteraves sucrières et canne à sucre, où le sucre est directement sous la forme de saccharose mais aussi topinambour, blé, maïs, bois, ... où un procédé, par exemple une hydrolyse, peut conduire à des sucres (fructose, glucose, maltose, ...).

Tous ces sucres sont fermentescibles et peuvent être convertis en éthanol et en CO<sub>2</sub> par fermentation. Celle-ci est anaérobie et catalysée par une enzyme produite par une levure : *Saccharomyces cerevisiae*. En pratique, 100 kg de sucre peuvent produire un maximum de 51 kg d'éthanol et 49 kg de CO<sub>2</sub>.

On notera l'importance du dégagement de CO<sub>2</sub>, ainsi qu'une dissipation de chaleur non négligeable.

Le produit de la fermentation est le vin qui, outre l'éthanol, contient les vinasses, c'est-à-dire des résidus non fermentés. On sépare l'éthanol par distillation jusqu'à une concentration en éthanol de 96 % en masse. Cette étape consomme cependant de l'énergie : 20 % du contenu énergétique de l'alcool produit.

L'éthanol possède un indice d'octane de 106 (contre 97 à 99 pour les supercarburants).

Quant aux huiles végétales, elles s'obtiennent par pressage de produits oléagineux suivi d'une extraction par solvant et d'une réaction chimique, dite de transestérification, qui crée un ester méthylique ou éthylique, d'indice de cétane 49 (contre 50 pour le gazole).

Le méthanol, lui, est essentiellement produit par synthèse à partir de gaz naturel, mais aussi à partir de matières végétales, comme le bois. Le principe est de sécher d'abord le bois, puis de

le chauffer à près de 1 000° C. Dans un premier temps, la matière végétale va s'échauffer et donc se pyrolyser, puis le résidu solide, le charbon végétal (charbon de bois), va passer à l'état gazeux. Le gaz sera alors condensé en un liquide comprenant essentiellement du méthanol.

Pour une usine autonome pouvant produire 500 t de méthanol par jour, il faut : 2 350 t de bois vert, contenant 45 % d'humidité, et 670 t d'oxygène. La réaction est globalement endothermique : elle peut réutiliser l'énergie contenue dans les gaz dégagés lors de la pyrolyse.

### 2.9.2. Production et préparation.

Un grand nombre d'exploitations agricoles produisent du biocarburant pour leur propre usage, à partir de pommes de terre, de riz ou de maïs.

La matière végétale est tout d'abord chauffée sous pression de vapeur pour en faire une purée. L'enzyme diastase convertit alors l'amidon de cette purée végétale en sucre. La diastase est trouvée dans le malt, notamment d'orge.

Enfin, le sucre est transformé en alcool par divers types de fermenteurs :

- fermenteurs agités en cascade
- procédé BIOSTIL, où un recyclage important des vinasses est opéré.

En ce qui concerne la production de méthanol, au niveau mondial, ce sont les gazogènes à lit fluidisé fonctionnant à l'oxygène qui sont les plus avancés.

Le produit final est stocké en cuves avant utilisation.

### 2.9.3. Transport.

A l'instar du biogaz, la biomasse, matière première des biocarburants, se transporte moins facilement que le produit final. Il est donc préférable de concentrer les unités de fabrication à proximité des producteurs de biomasse et de transporter l'alcool obtenu par voie classique (route, chemin de fer).

### 2.9.4. Utilisation.

Les biocarburants, surtout les alcools, sont destinés à alimenter les véhicules automobiles ordinaires.

Néanmoins, leur forte enthalpie massique de vaporisation rend difficile les démarrages à froid. Il convient donc plutôt d'utiliser des mélanges contenant, en volume, 90 % de méthanol et 10 % de fractions légères hydrocarbonées.

Pour l'éthanol, ce problème de démarrage ne se pose pas. Il est, de plus, possible d'utiliser de l'alcool non déshydraté (à 96°).

*Leur indice d'octane élevé permet une* *et le*  
De cette manière, les biocarburants oxygénés apportent même des avantages par rapport à l'essence : augmentation du taux de compression, et donc gain de rendement, possibilité de réduire les émissions. L'usage des composés oxygénés en forte concentration implique probablement un autre type de moteurs automobiles. Une alternative est d'introduire les biocarburants en faible concentration dans les carburants actuels de manière à rendre insensible la substitution. Dans ces cas, les véhicules doivent éventuellement être légèrement modifiés : réglage de la richesse, mélange d'alcools lourds afin d'éviter la séparation des phases alcool et eau, extraction des produits volatils créés par le mélange essence-alcool.

Pour une concentration en alcool de 5 à 7 % dans l'essence, on peut considérer qu'un litre de biocarburant vaut exactement un litre de carburant ordinaire.

Les principaux pays qui l'utilisent sont :

- le Brésil, à raison de 15 à 20 % en volume d'éthanol dans l'essence; de plus, un réseau spécial de distribution d'éthanol pur a été développé et environ 1.8 million de véhicules l'utilisent;
- les Etats-Unis (10 % d'éthanol);
- l'Allemagne (3 % de méthanol).

Une modification importante du carburant a des conséquences économiques fondamentales au niveau des raffineries, du réseau de distribution et des véhicules.

C'est pourquoi les stratégies nationales privilégient actuellement l'introduction de faibles pourcentages de biocarburants dans l'essence.

### 2.9.5. Impact environnemental.

Outre le fait que l'alcool peut valoriser des entreprises locales et des déchets agricoles ou forestiers, il peut également constituer une amélioration par rapport aux produits actuels en ce qui concerne la pollution atmosphérique.

En effet, la richesse minimale peut être abaissée de 0.15 en moyenne, avec pour conséquence une réduction de l'émission d'oxydes de carbone et d'azote. Les émissions d'aldéhydes sont du même ordre de grandeur qu'avec un carburant classique.

Par ailleurs, les composés oxygénés, grâce à leurs bons indices d'octane, apporteraient dans le carburant les derniers points d'indice, apportés actuellement par le plomb (qui apporte 6 points d'indice d'octane) ou, dans l'essence sans plomb, par le procédé de reformage qui coûte beaucoup d'énergie supplémentaire à la raffinerie.

Enfin, un usage plus intensif des biocarburants réduirait d'autant les nuisances liées à l'extraction, au transport et au traitement des produits pétroliers.

En conclusion, sans affirmer que les biocarburants sont sans danger pour l'environnement, on constate qu'ils améliorent la situation par rapport aux carburants traditionnels.

### 2.9.6. En résumé.

#### Avantages

- Augmente l'autonomie nationale en matière de carburants
- Valorise des entreprises locales et des déchets agricoles et forestiers
- Un peu moins de pollution atmosphérique que les carburants ordinaires
- Carburant à haut indice d'octane, pouvant remplacer le plomb dans l'essence.

#### Inconvénients

- Biomasse difficilement transportable
- Nécessité de régler les moteurs des véhicules
- Parfois problème de démarrage à froid

### 3 . TECHNOLOGIES DU FUTUR.

Aucune source d'énergie, actuelle ou future, n'est ni complètement "propre", ni tout à fait évidente à mettre en oeuvre. Dans la mesure où un choix est possible, il faut mettre dans la balance l'impact sur l'homme et son environnement des diverses sources, en considérant le cycle complet de leur production, ainsi que les difficultés d'exploitation des gisements, du transport et du stockage de l'énergie.

A supposer dès lors que le décideur puisse aujourd'hui choisir la ou les source(s) d'énergie correspondant le mieux à ses besoins, à ses disponibilités et à l'état actuel de la technologie, le choix risque d'être fort différent dix années plus tard. Si donc une option à long terme doit être prise actuellement dans une région, il convient de prendre en compte dans les critères de décision l'évolution de la technologie qui permettra peut-être dans 5 ou 10 ans de changer fondamentalement les données du problème.

Il est difficile de faire l'inventaire des espoirs actuels. Citons simplement quelques tendances.

- Augmentation de la taille et des possibilités des pipelines, pour transporter plus facilement les combustibles solides, liquides ou gazeux des lieux d'extraction vers les centrales locales, parfois au détriment du transport de l'énergie sous forme électrique.
- Les techniques de désulfuration du charbon et du pétrole avant combustion commencent à être au point et économiquement rentables.
- La gazéification du charbon sous pression avec de l'air, suivie par un lavage des gaz pour enlever l' $H_2S$  ou la liquéfaction du charbon utilisant un minimum d'hydrogène, semblent des techniques particulièrement prometteuses.
- La technologie du stockage de l'énergie électrique évolue : on est passé des batteries au plomb aux accumulateurs nickel-cadmium. Que nous réservent les supraconducteurs dans ce domaine ?
- Le stockage de l'énergie sous sa forme thermique évolue également : le stockage chimique dans des réactions réversibles et le stockage sous forme de chaleur latente dans des matériaux qui changent de phase sont probablement deux voies d'avenir.
- Dans les centrales thermiques, on améliore les rendements des turbines et on met en oeuvre la magnétohydrodynamique (MHD) pour générer de l'électricité à partir de l'énergie thermique. On utilisera aussi des alternateurs cryogéniques à supraconducteurs et donc à très haut rendement.
- Les moteurs des véhicules évoluent : le moteur à explosion a peut-être fait son temps. Sera-t-il remplacé par une turbine à gaz ou à vapeur ou par un moteur électrique ?
- Le rendement des cellules solaires photovoltaïques ne cesse de croître et leur prix ne cesse de baisser. Il est certain que l'évolution technologique, dans ce secteur, conjugué à l'amélioration des systèmes de stockage de l'énergie électrique, peuvent modifier fondamentalement les données du problème et "démocratiser" l'usage des panneaux solaires.
- L'hydrogène peut être produit par un bon nombre de procédés : distillation de l'air liquide, reformage du pétrole à la vapeur, électrolyse de l'eau. Une fois produit, il constitue une forme d'énergie que l'on peut à la fois stocker et transporter, puis restituer chez l'utilisateur sous une forme quelconque. Actuellement, les coûts de sa production, de son stockage et de son transport demeurent élevés, mais l'hydrogène reste un vecteur d'énergie fort intéressant.

## BIBLIOGRAPHIE.

- Ashrae. (1985). *Ashrae Handbook-Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta (USA).
- Association A<sup>3</sup> E<sup>2</sup> Th. (1982). *Aide-mémoire du thermicien*. Publié par les Ed. Européennes thermique et industrie (Paris, France).
- Bacq, R. (1982). *L'énergie solaire et les pompes à chaleur*. Guide Marabout n° MS495, Verviers (Belgique).
- Consensus*. (1977). *Revue d'information sur l'énergie*. CEN/SCK, Mol (Belgique).
- Cosse-Manière, C. (1979). *Le soleil et nous*. Sofredir, Palaiseau (France).
- de Montbrial, Thierry. (1978). *L'énergie : le compte à rebours*. Ed. JC Lattès (France).
- FNDAE. (1992). *Application de l'énergie photovoltaïque à l'alimentation en eau potable dans les zones rurales*. Documentation technique, FNDAE, n° 12.
- Garvey, G. (1972). *Energy, Ecology, Economy*. W.W. Norton & Company, New York (USA).
- Girardet, H. et J. Seymour. (1990). *Sauvons la planète*. Hachette (France).
- Giraud, A., Suissa, A., Coiffard, J. et D. Cretin. (1991). *Géopolitique du charbon*. Economica. Paris (France).
- Golding, E.W. (1976). *The generation of electricity by wind power*. SPON, London (UK).
- Hackleman, M. (1974). *Wind and windspinners*. Peace Press, Culver City, California (USA).
- Hamm, H.W. (1967). *Low cost development of small water power sites*. VITA (USA).
- Harrison, R.M. (1990). *Pollution : causes, effects and control*. Royal Society of Chemistry, Cambridge (UK).
- Hottel, H.C. and J.B. Howard. (1971). *New Energy Technology*. MIT Press, Cambridge (USA).
- Justus, C.G. et J.L. Plazy. (1980). *Vent et performances des éoliennes*. Ed. SCM, Paris (France).
- Kelley, D.R. (1977). *The energy crisis and the environment : an international perspective*. Praeger publishers, New York (USA).
- Lacas, L. (1980). *Le guide des énergies douces*. Dargaud, Neuilly-sur-Seine (France).
- Lagrange, B. (1979). *Biométhane 1 et 2*. Edisud, Aix-en-Provence (France).
- Les techniques de l'ingénieur*. (Paris). volumes A3 et B2I.
- Merrill, R. and T. Gage. (1978). *Energy primer : solar, water, wind, and biofuels*. Dell publishing, New York (USA).
- Nicolas, J. (1987). *Le stockage thermique : état de l'art*. Services de Programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles (Belgique).
- Patigny. (1988). *Emploi des combustibles et technique de la chaleur*. Cours MECA 2160 - Faculté des Sciences Appliquées - UCL (Belgique).

- Perrier, J.L. (1979). *Energie solaire : état actuel des applications*. Ed. Techn. et Scient. françaises, Paris (France).
- Poncelet, J.P. (1987). *Production et utilisation de l'énergie*. Cours FUL (Arlon).
- Putnam, P.C. (1974). *Power from the wind*. Van Nostrand Reinhold Company, New York (USA).
- Revue Systèmes solaires "Spécial Eolien"*. n° 61/62. (1990).
- Sproull, W.T. (1972). *Air pollution and its control*. Exposition press, New York (USA).
- UNEP. (1991). *Urbain air pollution*. UNEP/GEMS Environment Library n° 4.
- United States Department of Agriculture (1982). *Energy research for the farm : an overview*. Agriculture Information Bulletin, n° 447. (USA).
- Wagner, F. (1981). *L'énergie solaire - une alternative pour demain ?* Cahiers économiques - BIL - Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).

ajout:

ANDERSON, D., AHMED, K. (1993)

Les énergies renouvelables: où en est-on?

Finances & Développement, juin 1993, 40-43