

Roger Cadiergues

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES



(Guide RefCad : nR09.a)



La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective», et d'autre part que les analyses et courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration «toute reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite».

TABLE DES MATIÈRES DU GUIDE

Contenu	page
1. Panorama des énergies renouvelables	3
6.1. Le cadre de ce guide	3
2. La biomasse énergie	4
2.1. Panorama de la biomasse énergie	4
2.2. L'avenir de la biomasse énergie	5
2.3. La biomasse primaire	6
2.4. Le problème général du bois	7
2.5. Bois, plaquettes et granulés	7
2.6. La biomasse énergie secondaire	8
2.7. Le biogaz	8
3. L'hydraulique	10
4. La géothermie	11
4.1. La température du sol et les géothermies	11
4.2. Le montage géothermique type	11

Contenu	page
5. L'éolien	13
5.1. La structure du vent	13
5.2. Les éoliennes de parcs terrestres	14
5.3. Les éoliennes off-shore	14
5.4. Les performances éoliennes	15
6. Le solaire	16
6.1. Le solaire : survol	16
6.2. Le solaire passif	17
7. Le solaire thermique actif	18
7.1. Le classement des systèmes actifs	18
7.2. Les capteurs solaires	18
7.3. La performance des capteurs solaires	19
7.4. La théorie du capteur plan	20
7. Les combustibles renouvelables	22

LE CADRE DE CE GUIDE

Ce guide regroupe les données de base relatives à ce qu'on appelle les «énergies renouvelables»: la biomasse, l'hydraulique (applications locales), la géothermie, le solaire thermique passif ou actif.

Le solaire, comme la biomasse, sont les énergies renouvelables essentielles dans nos applications. Attention : il ne s'agit que d'une présentation générale, regroupant les données communes que l'on réutilise avec davantage de détails dans les guides spécialisés, par exemple les services d'eau chaude.

Remarques complémentaires sur le contenu :

. nous avons ajouté un chapitre sur les «combustibles renouvelables» ;

. les données relatives au **solaire photovoltaïque** sont classées dans un autre guide :

nR13. La production d'électricité (voir chapitre 3)

Chapitre 1

1. PANORAMA DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

1.1. LE CADRE DE CE GUIDE

LE RÔLE ACTUEL DES SOUCIS D'ÉNERGÉTIQUES

Il est régulièrement fait référence à la «crise de l'énergie», c'est-à-dire au manque à terme d'énergie en quantité suffisante. En fait, à chaque crise l'analyse des énergies disponibles, en particulier des réserves de combustibles en sous-sol, ont permis de montrer que ce risque était souvent surévalué, toutes les ressources du sous-sol n'ayant pas jusque là été prises en compte.

En fait le risque principal est surtout dû au développement de l'effet de serre dans l'atmosphère (avec risque de réchauffement climatique), effet lié à l'usage prédominant de combustibles dont la combustion dégage du CO₂, qui est l'un des principaux gaz de l'atmosphère à l'origine de l'effet de serre. De ce fait c'est surtout sous ce deuxième angle (celui du risque lié au réchauffement climatique) que l'on parle aujourd'hui des «économies d'énergie» alors qu'il s'agit plutôt de «mauvais choix énergétique». D'où l'importance des analyses qui suivent.

LES DEUX CLASSES D'ÉNERGIES

Il est désormais classique de classer les énergies de la manière suivante :

- . d'une part les *énergies non renouvelables*, un domaine correspondant essentiellement à celui des combustibles extraits du sous-sol,
- . et d'autre part les *énergies renouvelables*, dont le stock n'entre pas dans la catégorie précédente.

Cette définition est, en fait, souvent très simpliste, l'énergie nucléaire n'étant pas, par exemple, classée comme «renouvelable» alors qu'elle ne participe pas au développement de l'effet de serre.

Pour plus de clarté dans le langage, nous classerons souvent les énergies en quatre catégories :

- . celle des **combustibles non renouvelables**, issus du sous-sol,
- . celle des **combustibles renouvelables**, examinés plus loin,
- . celle des **énergies nucléaires**, normalement neutres quant à l'effet de serre,
- . celle des **énergies «naturelles»** (soleil, vent, marrées, etc..).

Ici nous adoptons le premier classement distinguant *énergies renouvelables* et *énergies non renouvelables*.

LA DÉFINITION OFFICIELLE DES «ÉNERGIES RENOUVELABLES»

Une loi de 2009, que nous prendrons pour base, précise les définitions adoptées dans les documents publics (lois et arrêtés) de la manière suivante :

Article 19 (extraits) «Les sources d'**énergies renouvelables** sont les énergies éolienne, solaire, géothermique, aérothermique, hydrothermique, marine et hydraulique, ainsi que l'énergie issue de la biomasse, du gaz de décharge, du gaz d'épuration d'eaux usées et du biogaz.

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.»

L'IMPORTANCES DES DIFFÉRENTES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les énergies renouvelables sont, actuellement et en France, classables par importance de la manière suivante :

- . 1. La **biomasse** (chapitre 2),
- . 2. L'**hydraulique** (chapitre 3),
- . 3. La **géothermie** (chapitre 4),
- . 4. L'**éolien** (chapitre 5),
- . 5. Le **solaire** (chapitre 6).

auxquels nous ajouterons les «*combustibles renouvelables*» (chapitre 7).

Chapitre 2

2. LA BIOMASSE ÉNERGIE

La biomasse, comme le solaire, sont les énergies renouvelables essentielles dans nos applications : le chapitre qui suit concerne uniquement la biomasse-énergie.

Attention : il ne s'agit que d'une présentation générale, regroupant les données communes que l'on retrouvera dans plusieurs applications.

2.1. PANORAMA DE LA BIOMASSE ÉNERGIE

L'UTILISATION DE LA BIOMASSE-ÉNERGIE : UNE AMBITION RÉCURRENTÉ

Ce qu'on appelle aujourd'hui la biomasse couvre en fait de multiples produits organiques, allant du plus simple (le plus évident : le bois) au plus indirect et au plus complexe chimiquement, les produits issus de la méthanisation par exemple. Le présent livret tente de faire la synthèse de cette multiplicité afin de faciliter la présentation des multiples solutions que les outils **AuxiCad** auront à prévoir dans ce domaine.

S'AGIT T'IL D'UNE ÉNERGIE TOTALEMENT RENOUVELABLE

La biomasse énergie est quasi-systématiquement considérée comme «**énergie renouvelable**», alors que ce n'est pas toujours très évident. L'utilisation du bois-énergie suppose qu'on assure, par ailleurs, une reforestation correcte, assez loin d'être neutre énergétiquement. D'une manière générale les présentations françaises courantes négligent les «**énergies grises**», celles correspondant aux activités annexes : préparation et transport des combustibles, remises en état diverses (reforestation comprise), etc. L'exemple le plus net est celui des *déchets ménagers*, dont la collecte et le transport représentent la moitié (en ordre de grandeur) des valeurs sur le plan des bilans économiques et énergétiques.

LA BIOMASSE ÉNERGIE ET L'EFFET DE SERRE

L'utilisation de la biomasse met en évidence l'insuffisance courante - hélas trop fréquente - qui consiste à considérer que le seul gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone (CO₂). En oubliant le méthane (CH₄), qui est justement dégagé par de nombreux processus organiques. Un oubli d'autant plus regrettable que le méthane a, schématiquement, quatre fois plus d'action que le CO₂. Les réglementations les plus courantes ne tiennent pourtant compte que du CO₂. alors que la récupération (et la combustion) du méthane, dégagé par exemple par les décharges, conduirait à des bilans économiques et énergétiques très positifs en matière d'effet de serre.

L'AVANTAGE DE LA BIOMASSE : LE STOCKAGE

La plupart des énergies renouvelables (en particulier celles vues dans les chapitres qui suivent) ont toutes le même défaut, celui de n'être pas stockables :

- . l'énergie solaire est nulle à certaines heures ou insuffisante pour des raisons météorologiques,
- . l'énergie éolienne l'est également pour des raisons météorologiques (vent trop faible ou trop fort).

Au contraire l'énergie issue de la biomasse, avec les biocombustibles en particulier, est ajustable aux besoins instantanés à chaque moment.

LA BIOMASSE ÉNERGIE FACE AU POIDS DES TRADITIONS

La tradition, et les «souvenirs d'antan» avec ses foyers ouverts (les fameuses «cheminées»), peut avoir des effets psychologiques et commerciaux nocifs. Il serait souhaitable qu'on abandonne les nostalgies au bénéfice de considérations plus ingrates, mais essentielles si l'on veut vraiment faire du **développement durable** optimisé. La biomasse peut y jouer un rôle fondamental, mais pas forcément celui que, parfois, on imagine.

2.2. L'AVENIR DE LA BIOMASSE ÉNERGIE

LA BIOMASSE ÉNERGIE INDIVIDUELLE FACE À SES DIFFICULTÉS

La tradition, et bien des publications laissent croire que les systèmes individuels, qu'il s'agisse de foyers ouverts ou de poêles, constituent des réponses simples et économiques aux exigences actuelles. En fait le développement mal contrôlé des systèmes individuels tels que poêles ou analogues, utilisant le bois sous différentes formes, et ce sans connaissance sérieuse (plus ou moins traditionnelle mais oubliée) des problèmes que posent deux exigences fondamentales :

- . d'abord une alimentation correcte et suffisante en **air neuf**, laquelle est très souvent plus ou moins incompatible avec la réduction drastique actuellement prévue pour la perméabilité à l'air des locaux habités ;
- . ensuite l'oubli fréquent (il n'y a plus guère de «fumistes») que ces systèmes exigent des conduits particuliers et spécifiques d'évacuation des gaz brûlés, des **conduits de fumée** qui ne peuvent pas être confondus avec ceux désormais habituels pour le chauffage central individuel, au gaz en particulier.

LE PROBLÈME FONDAMENTAL DE SÉCURITÉ

L'insuffisance d'air neuf, sinon même l'absence de conduits de fumée adéquats, font qu'il y a émission de CO₂, et surtout de monoxyde carbone (CO) très toxique. Sans compter les impuretés solides diverses. Ce qui a - surtout dans les habitats modestes très peu ventilés - deux conséquences très néfastes ou désagréables : pollution dangereuse de l'air, salissure des parois.

Le risque le plus important est, bien sûr, le risque de dégagement de CO dans les ambiances habitées. Ce risque est tel que, dans certains pays ou avec certains matériels, il y a présence obligatoire d'un détecteur d'oxyde de carbone (CO) suspendant la combustion en cas de dépassement des teneurs limites (assez vite atteintes).

LA BIOMASSE ÉNERGIE CENTRALISÉE

L'un des obstacles les plus fréquents au développement de la biomasse énergie tient à la négligence de solutions qui sont aujourd'hui plus que défendables - surtout en production d'électricité : le recours à des **installations centralisées utilisant la biomasse**, en particulier les déchets. C'est là, sans aucun doute, sous réserve de bien organiser le bilan CO₂, et de maîtriser les effets du méthane (CH₄), que devrait se situer l'avenir le plus important de la biomasse énergie.

LES PERSPECTIVES DE LA BIOMASSE ÉNERGIE

Le domaine de la biomasse énergie est, en fait, constitué de multiples secteurs qui n'ont pas tous la même importance ainsi que le souligne la table suivante.

BIOMASSE ENERGIE : PERSPECTIVES (1985 : AFME) :		
Source	Gisement [Mt matières sèches]	Energie récupérable [Mtep/an]
Agriculture :		
Céréales (paille)	21	2,5
Mais (rafles, tiges)	6,8	1,8
Autres déchets de culture	5,8	1,8
Vigne (sarments)	2,6	1,0
Elevage (fumiers, lisiers, fientes)	15,8	3,2
Forêt :		
Déchets d'abattage	0,9	0,4
Industrie du bois	9,0	3,2
Ecorces	0,6	0,2
Potentiel non exploité	15,0	6,0
Autres :		
Industries agro-alimentaires	0,9	0,3
Ordures ménagères	5,5	2,2
Boues de stations d'épuration	1,3	0,3

- De nombreux efforts ont été consentis afin de développer le marché de la biomasse énergie, et afin de promouvoir la qualité des produits amont. Nous noterons surtout ici :
- . les actions «**bois énergie**» de l'ADEME,
 - . le soutien au **biogaz agricole**,
 - . les actions européennes en particulier pour les spécifications concernant les **granulés**.

2.3. LA BIOMASSE PRIMAIRE

LES DEUX ASPECTS DE LA BIOMASSE

La **biomasse**, constituée des matières «vivantes», peut être classée en deux catégories (classement propre à ce guide) : la *biomasse primaire* et la *biomasse secondaire*.

1. Nous appelons ici **biomasse primaire** celle qui comprend le bois et les différents végétaux utilisés comme combustibles, quel que soit leur état physique (solide, etc.). Cette biomasse est traitée dans la présente fiche, le bois (sous forme de bûches ou de dérivés tels que les plaquettes) étant présenté plus en détail à la suite.

2. Nous appelons ici **biomasse secondaire** celle qui est constituée de *déchets* issus de matières organiques, végétales ou non.

Quelle que soit la catégorie la biomasse est classée «**énergie renouvelable**». La raison en est la suivante.

LE CYCLE DU CARBONE

Avant toute combustion la biomasse absorbe le CO₂ de l'air au travers diverses réactions chimiques, dites de **photosynthèse**. C'est ainsi que la réaction type en **photosynthèse** des végétaux peut se traduire par la formule suivante, donnée ici à titre d'illustration :



Lors de la combustion il y a, à l'inverse, dégagement de dioxyde de carbone (CO₂) : c'est ce cycle (quasi-neutre) du CO₂ qui fait que la biomasse est classée «énergie renouvelable». En voici un exemple.

La quantité de carbone contenue dans une forêt étant directement proportionnelle au volume de bois présent, bien que variant certes selon les essences et les peuplements, on a pu calculer que la photosynthèse se produisant *au sein de la forêt française* piégeait (chiffes 1006) 66 millions de tonnes de CO₂ par an, soit entre 15 et 20 % des émissions annuelles françaises de CO₂. Le phénomène, sur le plan du développement durable, est donc assez fondamental.

BIOCOMBUSTIBLES ET BIOCARBURANTS

La biomasse peut être utilisée énergétiquement sous deux formes :

- . soit sous forme de **combustible**, dans les *chaudières* ou équipements de même type,
- . soit sous forme de **carburant**, dans les *moteurs*.

Dans le premier cas on parle de **biocombustible**, dans le second cas de **biocarburant**.

Les **biocombustibles** se présentent sous des formes très diverses, et peuvent être :

- . soit du bois (sous différentes formes),
- . soit des végétaux spécifiques, ou des résidus solides de la biomasse,
- . soit des déchets solides ou liquides,
- . soit des gaz résultant de traitements divers.

Les **biocarburants**, assez nombreux; sont victimes de discussions multiples sur leur rôle dans le cycle du carbone. Ils ne nous concernent qu'assez marginalement, et ne seront pas examinés ici.

LES COMBUSTIBLES DÉRIVÉS

Il existe un certain nombre de gaz issus de la transformation de matières organiques qui peuvent, plus ou moins, revendiquer le titre d'énergies renouvelables, et qui appartiennent aussi bien à la biomasse primaire qu'à la secondaire (déchets). Ce sont en particulier, parmi ceux qui peuvent nous concerner, les combustibles suivants :

- . le méthane (le biogaz),
- . l'hydrogène (le bio-hydrogène),
- . le gaz naturel (le bio-SNG).

Le **biogaz** (pour l'essentiel du méthane) est traité page suivante. Les autres gaz (bio-hydrogène et bio-SNG) sont des produits annexes qui ne sont pas présentés dans cette édition.

Le biogaz *d'origine agricole* fait, depuis 2011, l'objet d'une plus grande attention, avec la fixation de tarifs assez élevés de vente de ce combustible aux producteurs d'électricité.

L'IMPORTANCE DU BOIS

Sur le plan pratique, c'est le **bois** - sous des différentes formes - qui constitue l'apport actuel le plus important de la biomasse énergie : les familles essentielles de ce combustible sont traitées à la page suivante.

2.4. LE PROBLÈME GÉNÉRAL DU BOIS

LES CARACTÉRISTIQUES DE BASE

Sur le plan de la combustion il est essentiel de bien distinguer :

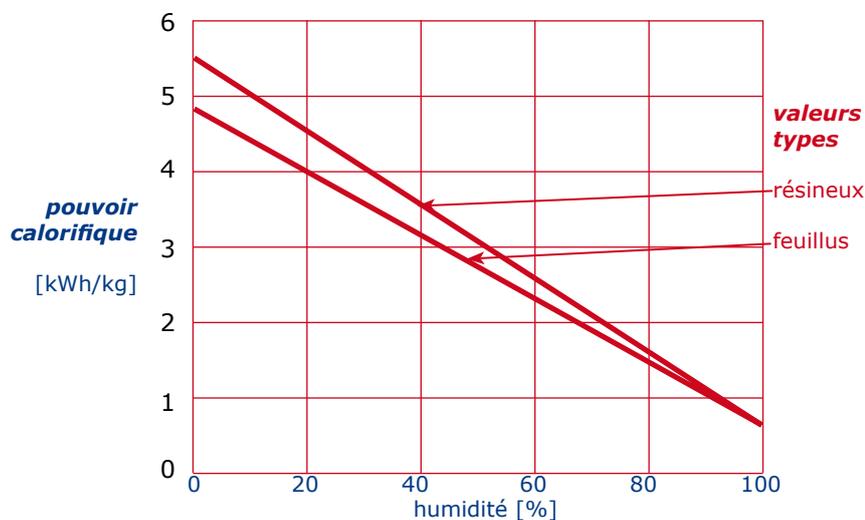
. les bois «*durs*», souvent classés comme «**feuillus**» (chêne, châtaignier, charme, hêtre, ormeau, et éventuellement pommier, etc.), d'une masse volumique brute de l'ordre de 560 [kg/m³], dont la flamme est courte et le charbon incandescent durable,

. et les bois «*tendres*», souvent classés comme «**résineux**» (peuplier, pin, sapin, saule, tilleul, tremble, etc.), d'une masse volumique brute de l'ordre de 420 [kg/m³], dont la flamme est longue, le charbon brûlant rapidement.

LA TENEUR EN HUMIDITÉ

La **teneur en humidité**, paramètre essentiel, est variable selon le degré de séchage : le bois coupé à la fin de l'automne ou en hiver contient en moyenne 70 à 80 % d'eau, cette teneur pouvant descendre assez rapidement à 40 à 50 %. Après une exposition normale à l'air, sous protection contre la pluie, cette teneur peut assez naturellement ne pas dépasser 15 à 20 %.

Cette teneur en humidité influe fortement sur le pouvoir calorifique apparent (voir schéma ci-dessous).



2.5. BOIS, PLAQUETTES ET GRANULÉS

LES DIFFÉRENTES FORMES DU BOIS COMBUSTIBLE

Les différentes formes du bois combustible, ici prises en compte, sont les suivantes :

- 1a. le bois de feu (bûches),
- 1b. les plaquettes forestières,
- 1c. les granulés, ou pellets,
- 1d. les copeaux et les sciures,
- 1e. les pailles, citées ici pour mémoire.

LE BOIS DE FEU D'ORIGINE FORESTIÈRE

Le bois de feu d'origine forestière le plus fréquent se présente sous forme de **bûches**, résidus des coupes mettant à part les produits marchand de la menuiserie. Ces bûches, de différentes longueurs (en principe 25, 33, 50 ou 100 [cm]), sont utilisées dans les foyers ouverts, les poêles et les chaudières. Pour que la combustion soit correcte les bûches doivent être suffisamment sèches, et ne pas contenir plus de 25 % d'eau environ. Ce qui peut être atteint après un stockage extérieur de l'ordre de 2 ans, 6 mois suffisant si ce stockage est à l'abri des intempéries.

LES PLAQUETTES FORESTIÈRES

Issues de l'exploitation des forêts les **plaquettes** sont fabriquées sur place par déchiquetage. Ces plaquettes, de faible épaisseur (de l'ordre de 0,5 [cm]), sont faciles à manipuler par suite de leur petite taille (4 à 5 cm en taille type, 10 cm maximum). Elles sont surtout utilisées sur place (lorsqu'il s'agit d'applications énergétiques). Mais elles sont également, de plus en plus, ouvertes à des usages extérieurs à l'industrie forestière (il est prévu une livraison de 400 000 [t/an] de plaquette dite «forestière» vers 1010-2012).

Dans ce dernier cas les caractéristiques types sont les suivantes (vente à la tonne ou au mètre cube apparent) :

- . humidité un peu forte (raisons diverses) de 20 à 30 % ;
- . masse volumique apparente, variable selon l'humidité, de 250 à 350 [kg/m³] ;
- . pouvoir calorifique inférieur, fort variable selon l'humidité, de l'ordre de de 2,5 à 3 [kWh/kg], soit de l'ordre de 10 [MJ/kg].

Adaptées aux **chaudières automatiques** les plaquettes sont aujourd'hui souvent remplacées (hors industrie forestière) par les **granulés**, mieux contrôlés en qualité - ce qui est très important pour la maintenance des générateurs. Les granulés (à fourniture identique de chaleur) coûtent néanmoins 2,5 à 3 fois ce que coûtent les plaquettes.

LES GRANULÉS (OU PELLETS)

Les **granulés**, technique relativement récente venant d'Autriche, constituent l'un des modes d'utilisation des produits forestiers ayant le plus de succès actuellement. A base de sciure de bois compressée à chaud (à 90 °C, avec fonte de la lignine qui agrège l'ensemble), ils sont normalement très peu humides, et très facilement manipulables et utilisables en chaudières automatiques. Ils se présentent sous la forme de petits cylindres aux dimensions suivantes, fonction du fournisseur :

- . diamètres de 5 à 10 [mm],
- . longueurs de 10 à 30 [mm].

Les caractéristiques types sont :

- . une humidité de 7 à 12 %, parfois un peu moins,
- . une teneur en cendres inférieure à 0,7 %, parfois même inférieure à 0,5 % (sur matières sèches),
- . une masse volumique apparente de 650 à 700 [kg/m³],
- . un pouvoir calorifique inférieur de 4,7 à 5,0 [kWh/kg] (5,1 pour les granulés bien secs = 19 [MJ/kg]).

LES COPEAUX ET LE SCIURES

Ces sous-produits du travail du bois ne sont plus normalement utilisés qu'aux travers de dérivés tels que les granulés. Ils sont donc, essentiellement, cités ici pour mémoire.

2.6. LA BIOMASSE SECONDAIRE EN UTILISATION DIRECTE

Nous appelons ici «biomasse secondaire» tous les produits organiques, ou assimilables, autres que le bois : il s'agit souvent de déchets - utilisés directement ou après transformation en applications énergétiques.

LA CARACTÉRISTIQUE DE BASE

Dans le secteur ici concerné la caractéristique la plus importante est le pouvoir calorifique, exprimé ici en kilowattheure par kilogramme [kWh/kg], et non pas en unité S.I., laquelle est le joule par kilogramme, ici le mégajoule par kilogramme [MJ/kg] pour mieux s'adapter aux ordres de grandeur. Si vous avez à faire des conversions utilisez la relation suivante :

$$1 \text{ [kWh/kg]} = 3,6 \text{ [MJ/kg]}$$

PANORAMA DES DÉCHETS

De façon très générale on peut classer les déchets de la manière suivante :

- . les **déchets courants** (déchets des papiers sous toutes leurs formes, déchets de la voirie et des marchés, etc.), dont le pouvoir calorifique est voisin de 5 [kWh/kg] ;
- . les **ordures ménagères**, dont le pouvoir calorifique varie généralement selon les saisons entre 1,5 et 2,2 [kWh/kg] ;
- . les **déchets professionnels** (déchets des activités professionnelles telles que la construction ou les industries du bois, etc.), de pouvoirs calorifiques très variables, mais voisins des précédents ;
- . les **déchets verts**, dont le pouvoir calorifique est voisin de 5,5 [kWh/kg] (5,2 à 5,8 en fait) ;
- . les **boues des stations d'épuration** (STEP), qui ne sont normalement utilisées - au plan énergétique - qu'à travers les procédures décrites au paragraphe suivant.

2.7. LE BIOGAZ

LE BIOGAZ

La dégradation par fermentation (en l'absence d'oxygène) de la biomasse et de ses déchets conduit à la production de **biogaz**, surtout constitué de **méthane** (CH₄). De sorte qu'ici l'essentiel des procédés peut être classé dans le cadre de la **méthanisation**, procédé purement chimique illustré page suivante.

L'ensemble des processus équivaut, pour l'essentiel, à une fabrication de méthane, aboutissant au mélange suivant dit «biogaz» :

- . 55 à 65 % de méthane (CH_4),
 - . 35 à 45 % d'acide carbonique (H_2CO_3),
- les impuretés (H_2S pour l'essentiel) représentant moins de 1 %.

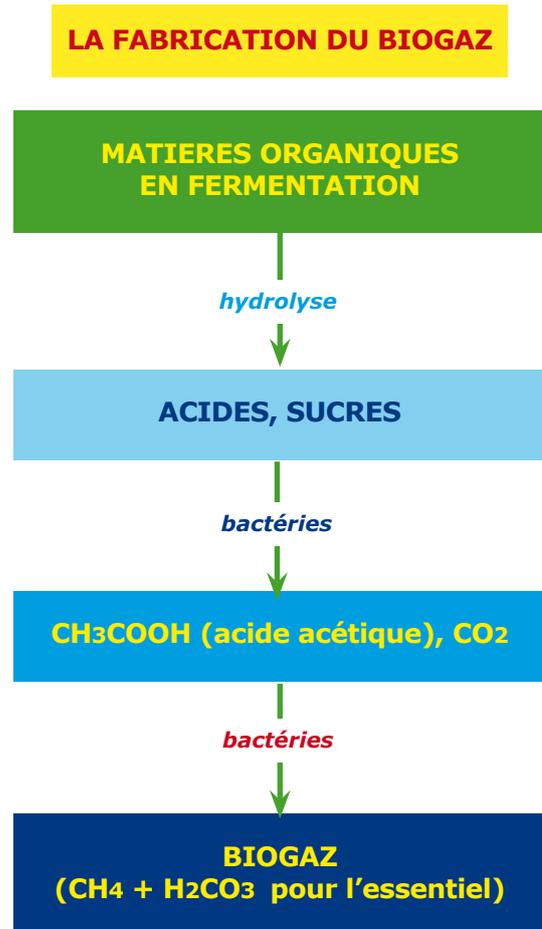
Le méthane, s'il est rejeté à l'atmosphère, étant un gaz à très fort effet de serre, son utilisation comme combustible est très important en développement durable. L'utilisation des déchets par méthanisation est donc un aspect essentiel, même si l'on ne classe pas les déchets dans les énergies renouvelables. La technique s'applique aussi bien aux déchets agricoles (au tarif de rachat réglementé) qu'aux déchets ménagers.

LES RÉACTEURS DE MÉTHANISATION

Ces réacteurs - dits souvent «**digesteurs**» - sont des cuves (en béton ou en acier) où séjourne la matière en fermentation pendant une vingtaine de jours. Cette matière y est régulièrement brassée de façon à limiter les effets de décantation et la formation éventuelle d'une croûte en surface. Elle est, de plus et en cas de nécessité, régulièrement chauffée.

La production de biogas dépend très fortement de l'origine des déchets, qui peuvent correspondre aux trois grandes catégories suivantes :

- . les déchets ménagers,
- . les déchets agricoles,
- . les déchets industriels (agro-alimentaire).



Chapitre 3

3. L'HYDRAULIQUE

LES PETITS BARRAGES

Une solution décentralisée intéressante consiste à développer les petits barrages (10 à 100 kW). Il en existait environ 100 000 de ce type vers 1900, il en subsiste environ le tiers, qui peuvent être équipés de turbines efficaces de production d'électricité. De telles installations viennent compléter les centrales électriques hydrauliques collectives de moins de 5 MW mais souvent de plus de 5 MW, l'utilisation étant réservée au réseau public. Il existe, toutefois, des cas où une chute d'eau locale peut être directement utilisée, plus ou moins indépendamment du réseau extérieur. De telles installations, dites «**micro-hydrauliques**», ont des puissances de l'ordre de *quelques dizaines de kilowatts*.

LA REFORTE DES MOULINS

La plupart des réalisations microhydrauliques récupèrent les installations d'anciens moulins : il existe encore un peu moins de 2000 centrales électriques de ce type qui sont en activité. Il existait environ 100 000 barrages de ce type vers 1900, 1/3 environ pouvant manifestement être équipés de turbines efficaces, avec des puissances comprises entre 10 et 100 kW. Encore faut-il vaincre les difficultés qui résultent de la loi sur l'eau de 2006, mais un **tel système peut être prévu dans le cadre d'un projet de développement durable** si la situation est favorable, même si c'est relativement rare.

Il existe une procédure très spécifique d'autorisation administrative, autorisation indispensable pour utiliser l'énergie des cours d'eau. Il existe également une organisation dédiée à cette application : le *Groupement des producteurs autonomes d'électricité* (www.gpae.fr) qui fédère les propriétaires de centrales et peut servir de centre de renseignement.

LES TECHNIQUES À UTILISER

Les roues à aubes, qui équipaient les anciennes chutes, peuvent être utilisées dans les cas les plus modestes. Sinon il faut recourir à des turbines standards (de 20 à 750 kW en ordre de grandeur) qui sont faciles à mettre en oeuvre pour des chutes d'eau de 1 à 5 [m]. Pour des chutes plus importantes on peut utiliser des turbines Kaplan, certaines étant également utilisables aujourd'hui pour des chutes plus faibles. Pour les pentes importantes (en montagne ou moyenne montagne) il faut recourir à un canal de dérivation solide (en béton) et à des turbines de type Pelton.

Dans tous les cas, hors rendement, la puissance est schématiquement fournie par la formule :

$$\langle \text{PUISSANCE} \rangle = \langle \text{DÉBIT} \rangle \times \langle \text{HAUTEUR DE CHUTE} \rangle .$$

Chapitre 4

4. LA GÉOTHERMIE

4.1. LA TEMPÉRATURE DU SOL ET LES GÉOTHERMIES

LA GÉOTHERMIE

La **géothermie** consiste à utiliser les températures plus ou moins élevées du sous-sol en profondeur. Voici les phénomènes qui sont en cause.

L'ÉQUILIBRE GÉOTHERMIQUE

Le sol reçoit des profondeurs un flux dit **flux géothermique**, en moyenne de l'ordre de $1,5 \mu\text{W}/\text{m}^2$. Ce flux s'oppose à celui reçu, à la surface, de l'atmosphère, ce qui entraîne un certain équilibre qui se traduit, dans les terrains sédimentaires, par un **gradient géothermique** (augmentation de température avec la profondeur) de l'ordre de $3,3 \text{ °C}$ pour 100 m en moyenne, les valeurs réelles (selon les terrains) variant entre 3 à 5 °C pour cent mètres.

LES NAPPES PROFONDES

De ce fait, les nappes aquifères profondes sont à des températures pouvant être assez élevées, mais variant avec la situation géologiques. Ce qui se conduit à des capacités géothermiques variables, se traduisant par des températures plus ou moins élevées de réchauffement des fluides en contact thermique avec les eaux du sous-sol. Ce qui conduit au classement suivant.

LES «GÉOTHERMIES»

On distingue généralement - selon la température du fluide réchauffé - quatre classes de géothermie : ce sont les suivantes.

1. Géothermie très basse énergie : chauffage du fluide à $20-60 \text{ °C}$ (ex. chauffage de serres) ;
2. Géothermie basse énergie : chauffage du fluide à $60-80 \text{ °C}$ (ex. chauffage urbain de Melun) ;
3. Géothermie moyenne énergie : chauffage du fluide à $70-150 \text{ °C}$ (ex. vapeur d'eau pour petite centrale de production d'électricité en Alsace) ;
4. Géothermie haute énergie : chauffage du fluide à $140-400 \text{ °C}$, uniquement en sites sismiques (ex. installation de Bouillante en Guadeloupe).

LES CAPACITÉS GÉOTHERMIQUES MÉTROPOLITAINES

Voici, schématiquement les particularités régionales françaises :

- . pour de l'eau à 30 °C une partie de l'Ile de France et une partie de l'Alsace,
- . pour de l'eau à 50 °C d'autres parties de l'Ile de France et de l'Alsace voisines des précédentes, ainsi qu'une partie du Sud-Ouest, de l'Ile de France, de l'Orléanais, du Berry, ou une petite zone autour de Nîmes, Valence ou Clermont-Ferrand,
- . pour de l'eau à 100 °C une zone très étroite de l'Alsace.

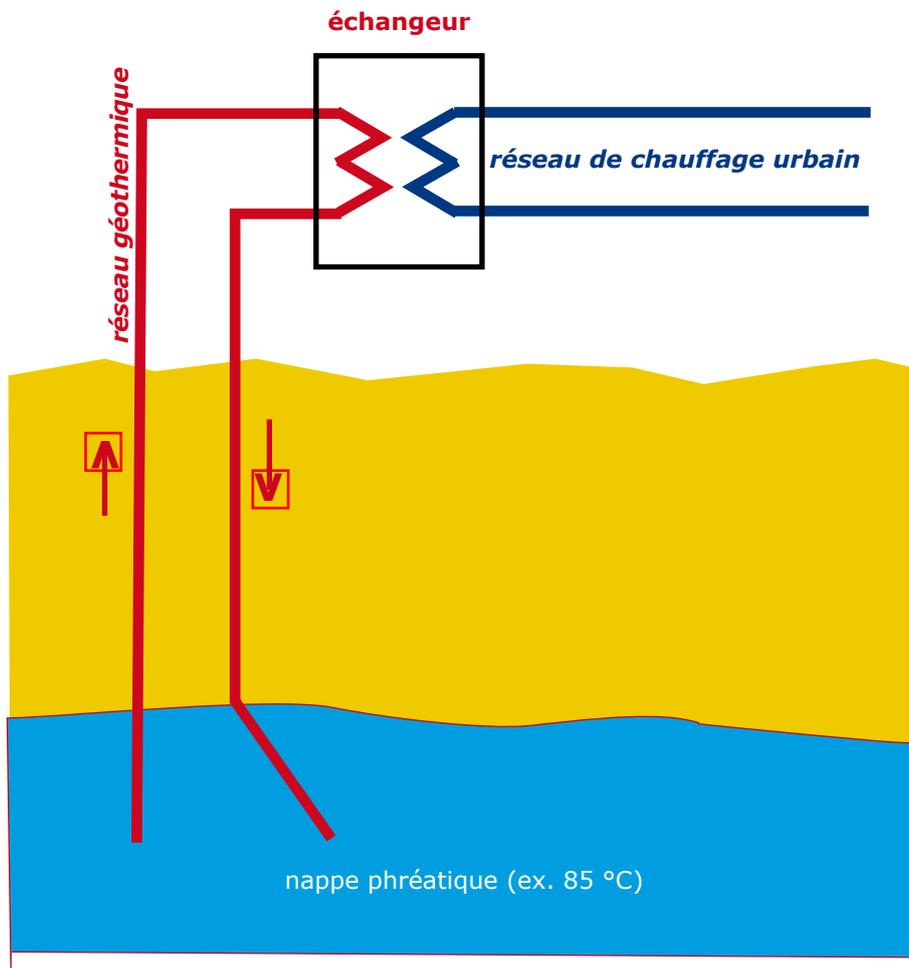
4.2. LE MONTAGE GÉOTHERMIQUE TYPE

En France l'essentiel des opérations géothermiques types sont basées sur l'utilisation - pour du chauffage urbain en général - de nappes phréatiques permettant de porter l'eau utilisée en chauffage :

- soit sous forme d'eau chaude (ex. 80 °C),
- soit sous forme d'eau surchauffée (plus de 110 °C).

Le schéma de la page suivante illustre le premier domaine d'application.

Montage géothermique type



Chapitre 5

5. L'ÉOLIEN

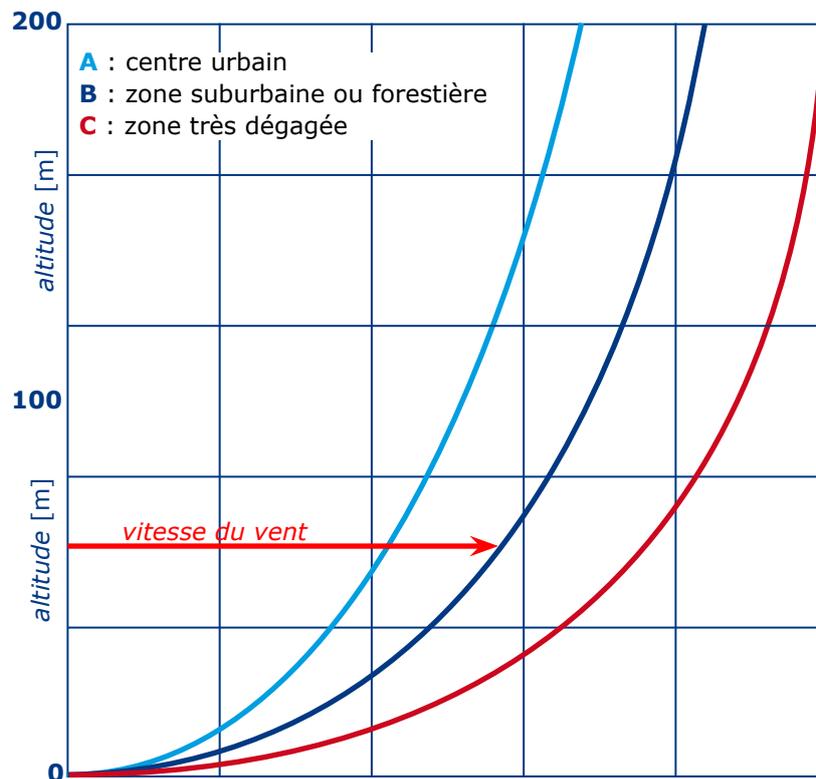
5.1. LA STRUCTURE DU VENT

LA RÉFÉRENCE MÉTÉOROLOGIQUE

La vitesse du vent, exprimée en mètre par seconde [m/s], est mesurée traditionnellement dans les observatoires météorologiques, en espace dégagé, à 10 [m] au-dessus du sol. C'est la valeur prise souvent comme référence, qu'il s'agisse de valeur climatique moyenne (mensuelle, annuelle) ou de valeur météorologique à un heure donnée de chaque jour.

LE GRADIENT VERTICAL DE VITESSE DU VENT

D'une manière générale la vitesse du vent croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du sol, mais le profil des vitesses en résultant dépend du relief et de la structure des obstacles et constructions au sol. Et ce non seulement dans la zone construite elle-même, mais même assez loin au voisinage. La figure ci-dessous illustre les principes de ces phénomènes, les profils indiqués étant surtout des exemples.



LE RÔLE DE LA VITESSE DU VENT

L'importance cruciale de la vitesse du vent apparaît dès qu'on formule la puissance maximale que peut fournir un éolienne, cette puissance maximale P [W] étant fournie par la formule suivante :

$$P = (\rho/2) A w^3$$

- . ρ [kg/m³] étant la masse volumique de l'air,
- . A [m²] la surface du rotor face au vent,
- . w [m/s] la vitesse du vent,

l'intervention de la puissance 3 avec la vitesse traduisant bien l'importance de ce paramètre, cependant que la présence de la surface A du rotor souligne l'importance de la taille de l'éolienne.

LE RÔLE DE LA STRUCTURE

Bien entendu les données précédentes ne concernent que la puissance maximale que peut fournir une éolienne. Il faut, en plus, faire intervenir les paramètres structuraux faisant appel au rendement de transformation de la puissance théorique à la puissance réelle, ce qui souligne l'importance de la qualité de conception de l'éolienne, et en particulier de son rotor. De plus la surface A est la surface face au vent, d'où l'intérêt d'un rotor qui s'oriente automatiquement avec la direction du vent.

Tous ces éléments font que les éoliennes performantes sont celles présentées au paragraphe suivant.

5.2. LES ÉOLIENNES DE PARCS TERRESTRES

LES DIFFÉRENTS TYPES D'ÉOLIENNES

Le succès psychologique des éoliennes a favorisé le développement de nombreux produits. En fait, ce sont les éoliennes que nous dirons ici «de parcs» qui constituent l'essentiel, les autres types d'éoliennes étant examinés à la page suivante (page **nR53.3**). y compris celles qui sont intégrées au bâti et qui - de ce fait - séduisent certains réalisateurs malgré leur rendement médiocre.

LES ÉOLIENNES DE PARCS

Les parcs éoliens utilisent essentiellement (dans notre pays) des unités possédant les caractéristiques types suivantes (illustration ci-contre) :

- une capacité unitaire de 2 MW (*puissance nominale*),
- avec une nacelle, placée entre 90 et 105 mètres de hauteur, qui contient les pièces essentielles,
- . des pales de 45 mètres de long,
- . le tout aboutissant à un encombrement horizontal de 90 mètres (souvent plus de 150 m de haut).

Chaque unité pèse 250 tonnes, dont 72 tonnes pour la nacelle placée entre 90 et 105 mètres de hauteur au bout du mât.

D'autres éoliennes peuvent avoir des caractéristiques plus lourdes, mais sont encore rares : la plus grosse éolienne (allemande, de 6 MW), possède un rotor de 126 m de diamètre, fixé à 131 m de hauteur.



5.3. LES ÉOLIENNES OFFSHORE

L'IMPLANTATION MARITIME (OFFSHORE)

L'implantation des éoliennes terrestres peut se heurter à de multiples obstacles. Ce qui a conduit à envisager - et réaliser - des installations en mer. Cette solution, à priori très intéressante par suite des caractéristiques du vent en mer, se heurte à trois obstacles :

- . le coût de la solution offshore par rapport à l'implantation terrestre (de l'ordre de presque le double),
- . le rôle du fond d'océan sur lequel sont fixés les mats éoliens, ce qui exclut certains fonds ne permettant pas une rigidité suffisante ;
- . la limitation raisonnable de la profondeur d'eau acceptable, au maximum de l'ordre de 50 mètres.

LES ÉOLIENNES FLOTTANTES

Avec les éoliennes «flottantes» il s'agit d'éviter les contraintes en matière de qualité du sol et en matière de profondeur. L'exemple type est celui d'éoliennes flottantes de grande puissance (ex. 3 MW), avec un moyeu situé à 80 mètres au-dessus de l'eau et des pales de plus de 110 mètres de diamètre. Au lieu d'être fixées au fond les éoliennes flottantes reposent sur une plate-forme métallique semi-submersible, lestée et ballastée. Plusieurs fermes éoliennes de ce type sont actuellement prévues pour ces prochaines années.

5.4. LES PERFORMANCES ÉOLIENNES

L'IMPORTANCE DE LA TAILLE

Une **éolienne de parc** (de type désormais classique) possède les caractéristiques suivantes :

- . un rotor de 70 [m] de diamètre sur un mat de 80 [m],
- . une puissance crête de l'ordre de 2 [MW].

Pour éviter les inconvénients liés parfois à ces dimensions importantes on a tenté de développer des «**éoliennes locales**» possédant des caractéristiques plus modestes mais néanmoins avec des dimensions encore un peu encombrantes :

- . par exemple un rotor de 10 [m] de diamètre sur un mat de 15 [m],
- . pour une puissance de crête de 15 [kW].

LES MINIÉOLIENNES

D'où l'idée de réaliser, en revenant sur des exemples anciens, des **mini-éoliennes**, généralement plus ou moins intégrées au bâtiment. Possédant par exemple les caractéristiques suivantes :

- . un rotor de 1,75 [m],
- . pour une puissance de crête de moins de 70 [W].

En fait la puissance de crête de ces mini-éoliennes ne dépasse généralement pas 30 à 70 [W], ce qui leur enlève beaucoup d'intérêt, surtout compte-tenu de l'action défavorable du bâtiment et du site (plus ou moins urbain) sur les caractéristiques du vent. C'est dire le faible intérêt des éoliennes qui se veulent intégrées au bâti.

RETOUR SUR LES PRODUCTIONS

Les indications précédentes concernent les puissances de crête. En fait ce qui compte c'est la production annuelle qui - elle - dépend du site. Très schématiquement, et à titre d'illustration, pour une zone suffisamment ventée et pour les éoliennes décrites plus haut, on peut s'attendre aux productions annuelles :

- . de plus de 5 000 000 [kWh/an] pour l'éolienne de parc,
- . de l'ordre de 40 000 [kWh/an] pour l'éolienne locale (15 m de hauteur maximum),
- . et de l'ordre de 100 [kWh/an] pour la mini-éolienne.

Bien qu'il ne s'agisse que d'exemples, ceux-ci indiquent très nettement :

- . qu'il y a de très grandes différences entre les divers systèmes éoliens,
- . que les mini-éoliennes ont de faibles productions (ce qui est confirmé par l'expérience sur le terrain),
- . et que la solution des parcs avec des hauteurs de mats de 80 à 100 [m] au moins, est celle qui se justifie sur le plan des performances.

Chapitre 6

6. LE SOLAIRE

6.1. LE SOLAIRE : SURVOL

L'UTILISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE : UNE AMBITION DÉJÀ ANCIENNE

En bâtiment la prise en compte du rayonnement solaire est une exigence assez fondamentale, qui peut se traduire par trois catégories de dispositions.

1. Le solaire joue, normalement, un rôle fondamental dans la conception même des bâtiments, les choix architecturaux classiques le prenant en compte au plan de l'orientation des bâtiments et des vitrages.
2. Cette prise en compte peut également donner lieu à des dispositions archi-tecturales particulières, ce qu'il est convenu d'appeler le **solaire passif**, le «mur Trombe» en étant l'illustration principale.
3. Il est également possible de faire appel à des systèmes spécifiquement conçus pour utiliser l'énergie solaire, basés sur l'emploi de dispositifs captant directement le rayonnement : les *capteurs*. Dans ce cas, où l'on fait appel à des dispositifs très spécifiques, nous disons qu'il s'agit de **solaire actif**.

LE SOLAIRE PASSIF ET LA CONCEPTION DES BÂTIMENTS

Les points essentiels de la conception «solaire» des bâtiments, y compris les dispositifs spécifiques de solaire passif, son traités plus loin, dans les fiches auxquelles il vous faudra vous reporter, qui renvoient elles-mêmes à d'autres livrets.

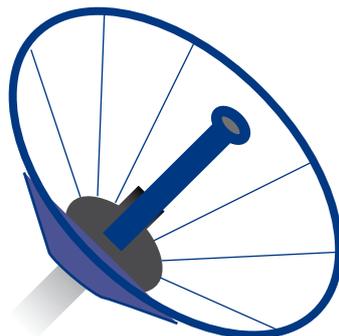
LE SOLAIRE ACTIF

Les systèmes actifs utilisent des capteurs chargés de recueillir le rayonnement solaire direct et diffus. Les différents systèmes que nous retenons sont les suivants :

- . ceux qui utilisent des **capteurs thermiques**, utilisés pour le chauffage des piscines, la production d'eau chaude, le chauffage d'ambiance (voir chapitre 7) ;
 - . les **fours solaires**, destinés à des usages «haute température» (voir ci-dessous) ;
 - . les capteurs destinés à la production directe d'électricité par **panneaux photovoltaïques** (chapitre 8).
- Les systèmes solaires **actifs** à base de capteurs thermiques peuvent être utilisés : soit pour produire de l'**eau chaude** dans les services classiques d'eau chaude, soit pour réchauffer l'eau des **piscines**, . soit pour **chauffer** des locaux, soit pour produire de la **chaleur à usage professionnel**, soit pour produire (indirectement) du **froid** - pour la climatisation en particulier.

EN ANNEXE : LE SOLAIRE ACTIF HAUTE TEMPÉRATURE

On a, depuis longtemps, cherché à utiliser l'énergie solaire pour des températures voisines de 100 °C ou plus. Dans ces systèmes (les «fours solaires») on concentre optiquement le rayonnement, la figure ci-dessous illustrant l'une des tentatives d'A. Mouchot à l'Exposition Universelle de 1878. Entre 1864 et 1878 diverses installations solaires réalisées par A. Mouchot ont permis de fournir de la vapeur basse pression pour la production d'électricité. Les résultats obtenus sur une installation réelle ont été malheureusement de rentabilité insuffisante. Depuis lors d'autres tentatives ont eu lieu, en particulier en France (Odeïho), mais sans succès significatif. Il est, néanmoins, régulièrement question de reprendre le sujet.



6.2. LE SOLAIRE PASSIF

LE CLASSEMENT DES SYSTÈMES SOLAIRES ADOPTÉ

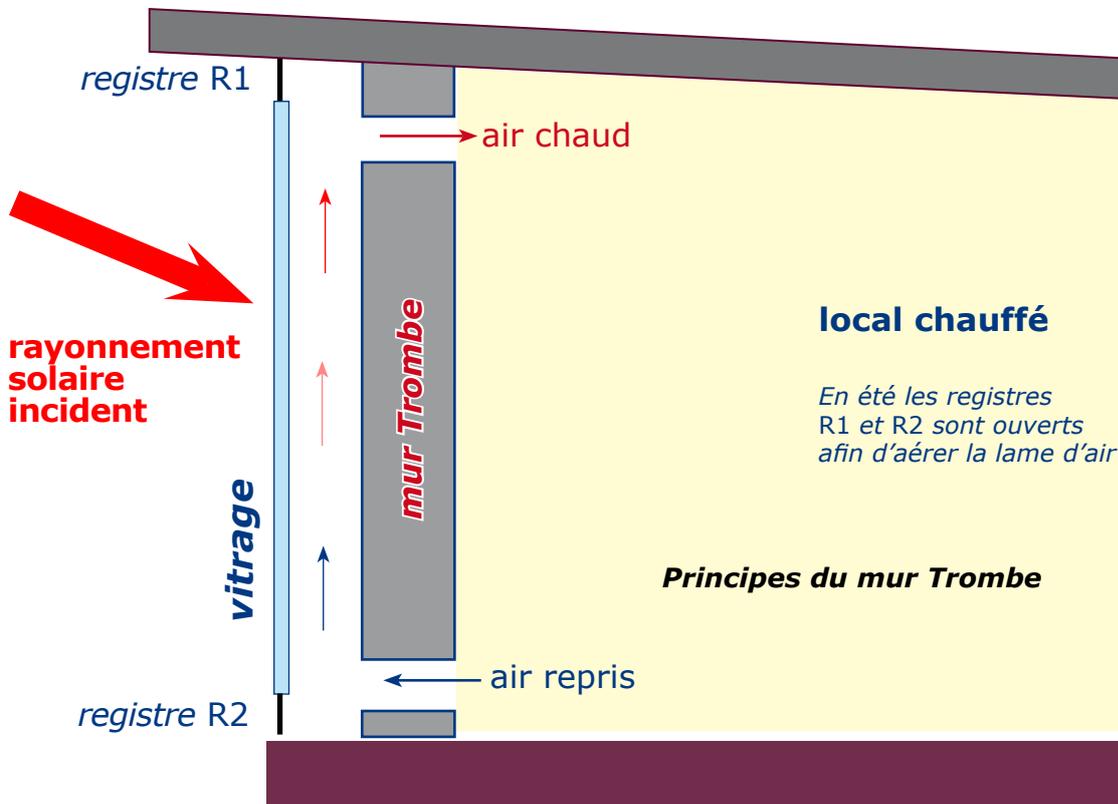
- En laissant de côté les fours solaires, nous retenons trois catégories de systèmes :
- . le **solaire thermique passif**, examiné plus en détail à la suite,
 - . le **solaire actif thermique**, présenté au chapitre 7,
 - . et le **solaire actif photovoltaïque**, présenté au chapitre 8.

LE SOLAIRE PASSIF

Nous appelons «**solaire passif**» toute technique qui permet de réduire les besoins de chauffage grâce à une conception adéquate du bâti, *sans recourir - sauf pour l'appoint - à des installations spécifiques* telles que celles que nous examinerons dans le cadre du solaire actif.

Nous retenons ici deux procédés passifs :

- . la récupération **par les vitrages**, utilisant une intégration naturelle et forte au bâti, présentée plus en détail au livret ME20. Les vitrages ;
- . l'utilisation de murs extérieurs sous la forme que nous appelons **héliodynamique**, dits souvent «**murs Trombe**» (du nom de leur «inventeur» français), système dont les principes sont illustrés au schéma ci-dessous;



En dehors de la solution qui consiste à utiliser - pour le chauffage d'ambiance - les apports gratuits à travers les vitrages normaux, le solaire thermique passif est essentiellement représenté par le «**mur Trombe**» (du nom de son auteur), illustré ci-dessus. L'air ascendant, contenu dans la lame d'air derrière le vitrage, s'échauffe sous l'action du soleil, et se répartit alors dans le local arrière (dit «local chauffé» dans le schéma).

Ce système n'a connu que très peu d'applications. De plus son efficacité est, malheureusement, insuffisante dans le cadre des développements actuels.

Chapitre 7

7. LE SOLAIRE THERMIQUE ACTIF

7.1. LE CLASSEMENT DES SYSTÈMES THERMIQUES ACTIFS

LE CLASSEMENT COURANT

Il est commode de distinguer cinq systèmes :

1. Les **services d'eau chaude de piscine**,
2. Les **chauffe-eau solaires individuels**, dits souvent «CESI», le système le plus courant,
3. Les **services solaires d'eau chaude**, en habitat collectif ou bâtiment tertiaires,
4. Les **systèmes solaires combinés** (eau chaude + chauffage), dits souvent «SSC».
5. Les **systèmes solaires de chauffage** seul (systèmes actifs simples, soit à eau, soit à air).

D'une manière générale ce sont surtout des systèmes utilisés dans les productions d'eau chaude, en complément de productions de chaleur à combustion ou électriques.

LE CAS PARTICULIER DES PISCINES

Alors que dans les autres systèmes l'eau chaude doit être produite à une température de 45 à 60 [°C], l'eau chaude fournie aux piscines doit l'être à une température de 30 [°C]. Comme nous le verrons par la suite cette distinction a beaucoup d'importance quant au choix de l'équipement de captation de l'énergie solaire (les **capteurs**).

LE CAS PARTICULIER DU CHAUFFAGE

Bien que la publicité et les actions officielles considèrent la fonction «chauffage» comme essentielle, en particulier à travers les systèmes SSC, il faut reconnaître que le chauffage solaire actif est mal adapté aux bâtiments modernes bien isolés. En effet, dans ce dernier cas, les besoins essentiels se situent à des périodes non, ou très mal ensoleillées.

7.2. LES CAPTEURS SOLAIRES

LES CAPTEURS DE BASE

Le solaire thermique utilise des capteurs chargés de recueillir, localement, le rayonnement solaire. Ces capteurs (thermiques) appartiennent à l'une des quatre catégories suivantes :

- . ou bien il s'agit d'**absorbeurs**, de simples tubes méplats en général, permettant de réchauffer l'**eau des piscines** intérieures ou extérieures de quelques degrés (3 à 4 K en général),
- . ou bien il s'agit de **capteurs plans à eau** les plus courants en France, utilisés surtout dans les **services d'eau chaude**, plus rarement en **chauffage à eau chaude** ;
- . ou bien il s'agit de **capteurs plans à air**, rares en France, servant à réchauffer l'air dans les systèmes de **chauffage à air chaud** ;
- . ou bien il s'agit de **capteurs à tubes sous vide**, fournissant un fluide (frigorigène en général) à d'assez hautes températures, capteurs surtout destinés à des installations spécifiques, assez rares en France.

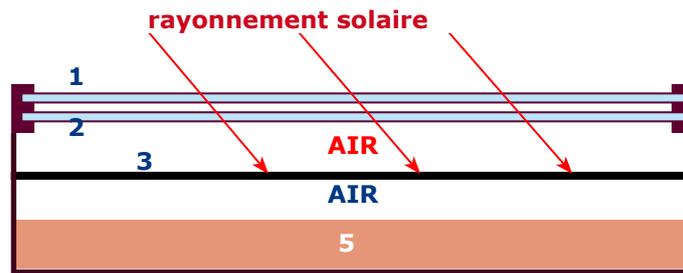
LES ABSORBEURS SIMPLES

Les absorbeurs sont les capteurs **les plus simples, ne comportant pas de vitrage**. Ils sont utilisés pour le réchauffage d'eau de piscine (jusqu'à 30 °C selon certaines conventions). Ce sont, aujourd'hui, des nattes flexibles ou des ensemble de tubes en matériaux de synthèse de couleur noire, peu coûteux. Ils sont couramment dénommés «**moquettes solaires**». Ils se raccordent tout simplement sur le circuit de filtration d'eau de piscine, sous réserve que la puissance de la pompe de filtration le permette.

LES CAPTEURS À AIR

Peu utilisés actuellement les **capteurs à air**, normalement utilisables en chauffage à air chaud, et surtout pour le préchauffage de l'air de ventilation, fonctionnent schématiquement comme indiqué page suivante.

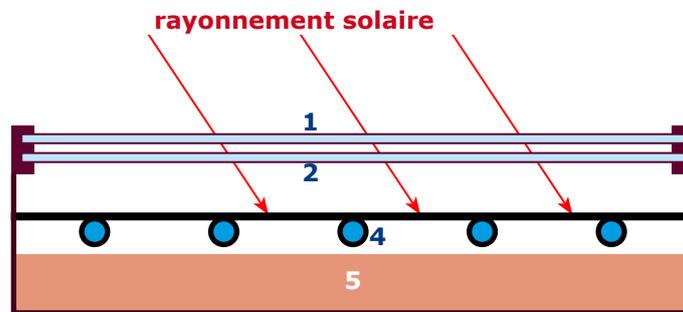
La structure type des capteurs à air est indiquée ci-dessous avec les significations suivantes :
1 et 2 : vitrages; **3** : plaque absorbante (métallique noire) ; **5**: isolant.



LE PRINCIPE DES CAPTEURS À EAU

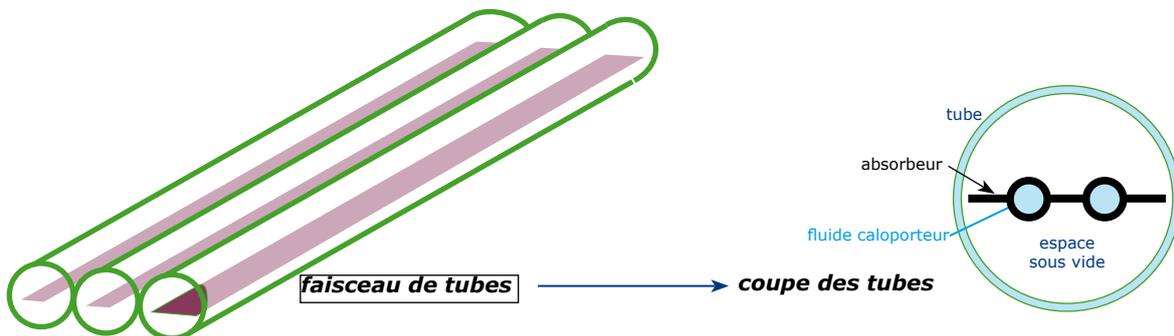
Les capteurs les plus courants sont conçus comme indiqué ci-dessous. Ils utilisent l'eau (chauffée par le soleil) comme fluide caloporteur grâce aux dispositions suivantes :

- 1 et 2** sont les vitrages laissant passer le rayonnement solaire mais isolant thermiquement la partie suivante du capteur ;
- 3** est la plaque (métallique noire) absorbant le rayonnement solaire ;
- 4** représente un tube (à eau) évacuant la chaleur reçue par la plaque ;
- 5** représente l'isolant évitant les transferts thermiques vers le bas.



LE PRINCIPE DES CAPTEURS SOUS VIDE

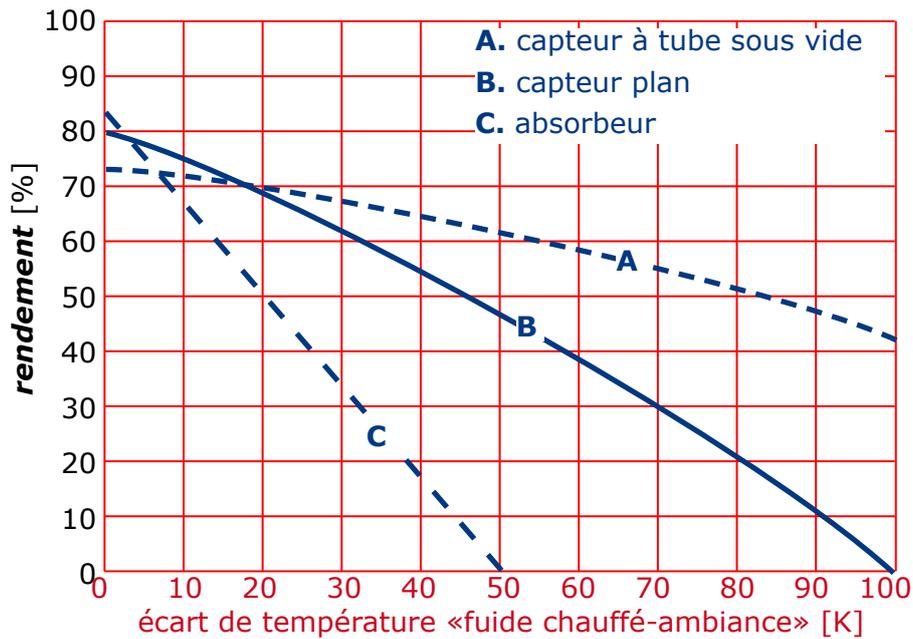
Pour améliorer le rendement des capteurs, et pour pouvoir atteindre des températures suffisamment élevées, ont été mis au point des capteurs à base de **tubes sous vide**. Plusieurs configurations ont été envisagées, la solution la plus simple figurant ci-dessous, les tubes étant alors regroupés sous la forme de panneaux plans.



7.3. LA PERFORMANCE DES CAPTEURS SOLAIRES

LE RENDEMENT NORMALISÉ DES CAPTEURS THERMIQUES

Les capteurs thermiques sont caractérisés par leur courbe de rendement, établie **pour un flux solaire incident donné**. Vous trouverez au schéma de la page suivante trois courbes types, correspondant aux catégories de base que nous venons de décrire (capteurs à air exclus). Ces courbes sont fournies pour un flux solaire incident de $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, l'abscisse étant l'écart de température entre le fluide chauffé et l'air environnant le capteur. De tels résultats doivent être fournis pour chaque modèle de capteur commercialisé, avec référence à la norme d'essai (**EN 12975, 12976, 12977**).



Présentation normalisée

La présentation précédente - *normalisée* - repose sur les conventions suivantes, le flux surfacique incident étant fixé conventionnellement à $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$:

- . figure en abscisse l'écart de température ($T_f - T_e$), T_f étant la température de sortie du fluide chauffé et T_e [°C] la température extérieure,
- . figure en ordonnée le **rendement**, c'est à dire la rapport entre l'énergie thermique récupérée et le flux incident.

7.4. LA THÉORIE DU CAPTEUR PLAN

La théorie du capteur plan a fait l'objet, depuis les années 1940, d'un grand nombre de publications tournant autour des mêmes concepts, en particulier :

- . le **rendement optique** η_0 égal au flux absorbé par rapport au flux reçu,
- . le **rendement du capteur** η égal au flux récupéré (sur l'eau pour les capteurs à eau) par rapport au flux reçu.

LE RENDEMENT OPTIQUE

Grâce aux études précitées tous les constructeurs de capteurs solaires utilisent sensiblement les mêmes structures transparentes et absorbantes. De ce fait les rendements optiques se situent tous dans une plage relativement limitée ($\eta_0 = 0,6$ à $0,8$).

L'ISOLATION DU CAPTEUR

Les pertes thermiques sont gouvernées par le coefficient des transmission $K \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$ du capteur vers l'ambiance. Les capteurs courants du commerce possèdent généralement les valeurs suivantes.

- . Capteurs plans courants : $K = 4 \pm 0,2 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$;
- . Capteurs avec tubes sous vide : $K = 1,5 \pm 0,4 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$;
- . Capteurs de type «moquette» : $K = 22 \pm 4 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$.

LE RENDEMENT GLOBAL

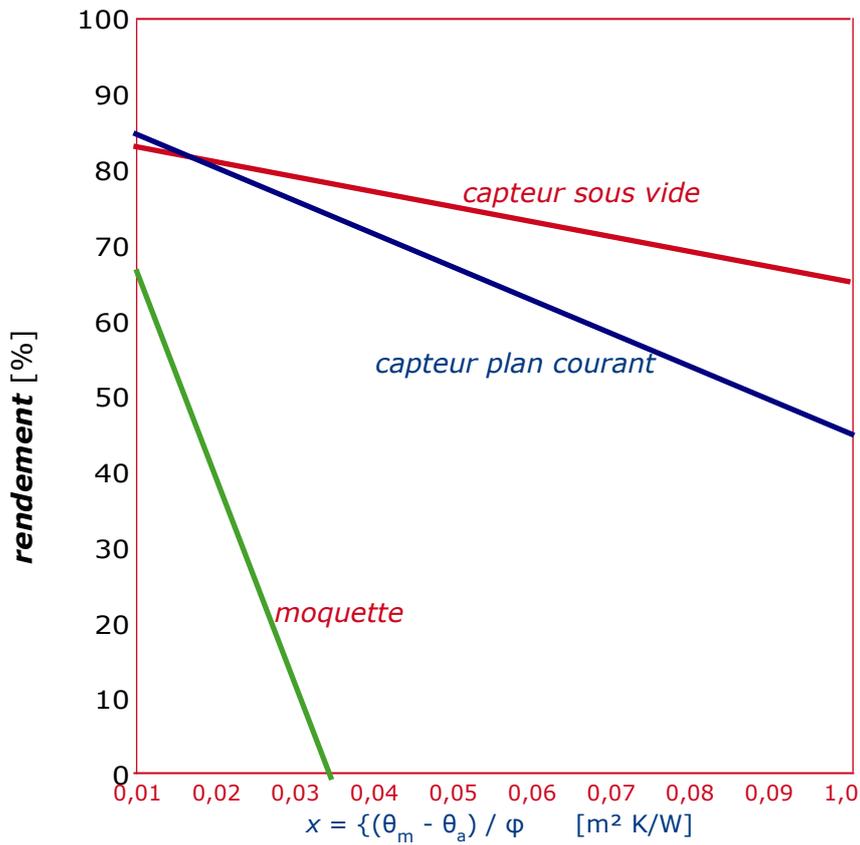
Le rendement du capteur (η) dépend du rendement optique et de l'isolation précédente, les calculs thermiques élémentaires conduisant à l'expression suivante :

$$\eta = \eta_0 - K \{(\theta_m - \theta_a) / \varphi\}$$

- . θ_m [°C] étant la température moyenne du fluide (entrée plus sorties divisé par deux),
- . θ_a [°C] étant la température d'ambiance,
- . φ étant le flux surfacique solaire $\text{[W/m}^2\text{]}$ reçu par le capteur.

L’AFFICHAGE DU RENDEMENT GLOBAL

Le mode de calcul précédent conduit à une présentation du rendement des capteurs autre que celle prévue pour les essais normalisés. C’est ainsi que sur le diagramme du paragraphe 7.3 l’abscisse fait intervenir la température de sortie du fluide, les rendements étant alors représentés par des *courbes*, tandis que si l’on fait intervenir la température moyenne de fluide (moyenne entre températures d’entrée et de sortie) les valeurs du rendement sont représentées par des *droites*. C’est ce que démontre la figure suivante, θ_m [°C] étant la température moyenne du fluide chauffé, θ_a [°C] la température d’ambiance, et ϕ [W/m²] le flux surfacique solaire incident



Chapitre 8

8. LES «COMBUSTIBLES RENEUVELABLES»

DE QUOI S'AGIT T'IL ?

Les énergies renouvelables sont finalement, et par définition technique :

- . en dehors de celles qui ne rejettent aucun carbone à l'atmosphère,
- . **celles qui rejettent un quantité de carbone égale à celle qui a été puisée** précédemment dans l'atmosphère.

Ce sont ce que nous appelons les «combustibles renouvelables», qui ne sont encore qu'au stade du développement.

En voici un exemple.

1. En utilisant l'énergie du vent on produit de l'**électricité**, mais celle-ci n'est pas renvoyée au réseau public, étant directement utilisée pour fournir de l'**hydrogène**, lequel sert de médium intermédiaire.
2. En absorbant du **carbone** de l'atmosphère qu'on combine avec l'hydrogène précédent on obtient du **méthane** (CH₄), qui sert de médium de stockage pour lutter contre les incertitudes du vent.
3. Ce méthane sert finalement de **combustible gazeux** traditionnel dans les installations de production de chaleur à combustion.

Le point important est le suivant : la combustion du méthane rejette du carbone à l'atmosphère, mais ce n'est pas autre chose que le carbone absorbé dans l'atmosphère au début du cycle.