

La valorisation de la biomasse ligno-cellulosique et le dimensionnement de l'installation de chauffage

Dominique LOIR-MONGAZON
Chargé de mission énergie-climat



I) Le chauffage de l'exploitation

La première source de biomasse est actuellement le bois. L'utilisation de 4 m³ de bois-énergie permet d'économiser une tonne de pétrole (tep) et d'éviter en moyenne l'émission de 2,5 tonnes de CO². Les forêts du nord-est de la France représentent un énorme potentiel pour les plaquettes ou les granulés de bois. La forêt alluviale des plaines rhénanes offre la plus forte productivité primaire nette d'Europe avec 17 à 18 tonnes de matière sèche par hectare et par an (Stroffek *et al.*, 1999).

Les plaquettes résultent du broyage du bois provenant de déchets industriel ou de forêts gérées durablement alors que les granulés sont fabriqués à partir de sciures provenant des scieries.

On peut chauffer la maison d'une exploitation agricole avec moins d'un ha de céréales ou environ 200m de haies déchiquetés en plaquettes. Ces moyens de chauffage sont déjà très utilisés dans les pays d'Europe du nord et leur fiabilité est démontrée.

Besoins en chauffage d'une maison de 120 à 130 m²
(Maison ancienne mal isolée 200 kWh/m²/an)

	Fuel	Bois buche 20% Hum	Plaquettes 25% Hum	Granulés à 8% Hum	Sarments vigne
PCI en kWh/kg	10	4.8	4	5	3,8
Equivalence énergétique (kg ou l)	1,0 l	2.1	2.5	2,0	2,6
Besoins / an	2500 l	5.2 T	6.3 T (25 m ³)	5 T (7 m ³)	6,5 T
Besoins en ha					3,2 ha
Valeur unitaire	0,74 €/l	70 €/stère	70 €/T	220 €/T	
Prix du kwh en €	0,082	0,048	0,022	0,052	
Coût annuel en euro	2050	1200	550	1300	

	HVB*	Tourteau 12%MG	Colza	Gaz naturel	Propane
PCI en kWh/kg ou (m ³ pour gaz)	9,9	5	6,8	11.6	12.8
Equivalence énergétique (kg ou l)	1,0 l	2,0	1,5	0.86 m ³	0.78
Besoins / an	2500 l	5 T	3,75 T	2150 m ³	1.95 T
Besoins en ha	2,5 ha	2,4 ha	1 ha		
Valeur unitaire	0,5 €/l	150 €/T	230 €/T	0,73 €/m ³	1200 €/T
Prix du kwh en €	0,05	0,03	0,033	0,063	0.09
Coût annuel en euro	1250	750	825	1575	2400

Le gaz naturel est tarifé en kwh PCS avec 1 kwh PCS = 1,11 kwh PCI

Rq : Le prix du kWh a été établi en tenant compte des rendements des appareils de chauffage

Rq: Le volume réel d'un stère varie en fonction du diamètre et de la longueur de coupe (voir tableau ci dessous)

Longueur de coupe	Diamètre	
	Ø 20 cm	Ø 10 cm
Billons de 1 mètre	0,67	0,57
Bûches de 0,50 m	0,83	0,71
Bûches de 0,33 m	0,93	0,8
1 M.A.P sec = 0,25 tonne à 25% d'H = 0,67 stère = 0,50 m³ de bois rond		

Les nouveaux modèles de chaudière ou de poêle polycombustible sont capables d'assurer une combustion optimale de ces différentes formes d'énergie de façon automatisée et avec un très bon rendement (**plus de 90%**) pour les chaudières à condensation (*le combustible est amené progressivement du silo de stockage vers le foyer au moyen d'une vis sans fin*). On compte parmi ceux-ci des chaudières individuelles ou collectives, des poêles qui sont des poêles à granulés de bois ou à plaquettes, des brûleurs pour remplacer celui de votre chaudière. Tous ces dispositifs sont maintenant disponibles sur le marché. On aura aussi bientôt des équipements à monter sur les vieilles cuisinières à bois les rendant ainsi plus efficaces et faciles d'usage ainsi que des inserts.

On trouve des poêles à partir de 3 300 €, des brûleurs à partir de 1000 €. L'investissement est compris entre 7000 et 15000 euros pour les chaudières à granulés et entre 12000 € et 18000 € pour les petites chaudières automatisées à plaquettes avec le silo. Le surcoût par rapport à une chaudière fuel pour la même puissance est amorti au bout de 3 à 5 ans. Il faut savoir que pour toute acquisition d'un appareil de chauffage au bois labellisé Flamme verte (*chaudières ou appareils indépendants*), vous bénéficiez d'une défiscalisation de 40% sous forme d'un crédit d'impôt sur le coût de l'équipement, d'une prime de conversion de 750 à 1500€ en Alsace (voir condition sur le site www.energievie.fr) si vous remplacez votre chaudière à fioul ou gaz et d'une TVA à 5.5% pour les logements de plus de 2 ans.

Le taux d'humidité est très important à connaître avant l'achat de la chaudière, car la chambre de combustion change à partir de 30% d'humidité.

1. La filière bois de forêt gérée durablement

Selon l'IFN, la forêt française a énormément progressé depuis le début du XIX^{ème} siècle, passant de 9,4 à 15,5 Mha en 2005 dont 14,8 Mha de forêt de production.

Depuis 25 ans, l'extension annuelle était de 68 000 ha/an (soit 0,45 %), elle s'est réduite ces dernières années aux alentours de 38 000 ha/an soit 0,25 % (ULRICH et al. 2006). La forêt française pourrait atteindre 17,5 Mha en 2100 (PEYRON 2006). Les feuillus représentent 65 % de la surface forestière, les résineux 25 % et le mélange 10 %.

- **Volume sur pied :**

Le volume sur pied atteint actuellement 2,37 Gm³, selon l'estimation 2005. Ce volume progresse de 1,3 %/an soit 27 Mm³/an et pourrait dépasser les 3 Gm³ dès 2050 (PEYRON 2006). Le volume moyen à l'hectare est de **160 m³/ha soit environ 100 tonnes/ha**,

- **Production biologique :**

La production brute annuelle est d'environ 103,4 Mm³/an en forêt de production (chiffre 2005-IFN), ce qui représente 7,1 m³/ha/an. Il faut ajouter à ce chiffre 10 à 15 Mm³ supplémentaires provenant des arbres hors forêt (AFOCEL, 2006). La production brute annuelle progresse de 1,4 %/an soit 1,2 Mm³/an et pourrait dépasser 150 Mm³/an dès 2050 (PEYRON 2006). La production nette après retranchement de la mortalité naturelle se situerait selon ULRICH aux alentours de 90 Mm³/an.

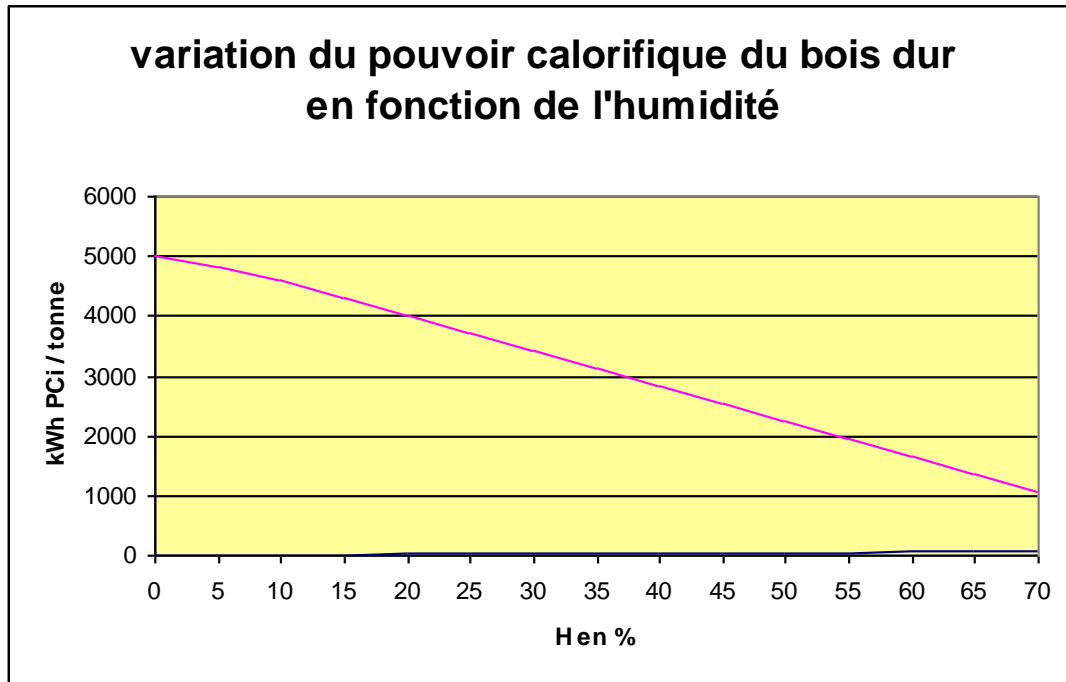
- **Récolte**

La récolte globale estimée varie selon les sources entre 52 (ADEME 2006) et 61 Mm³/an (ULRICH et al. 2006), soit un **taux de prélèvement de 65 à 70 % sur la période 1998-2002**. La fourchette d'estimation est provoquée en partie par les tempêtes de 1999 qui ont fait varier les volumes de récolte de manière importante durant les 10 dernières années. Seule une partie de ce bois (**21 Mm³** selon AGRESTE 2006) est consacrée à la production d'énergie.

- **Pouvoir calorifique**

Il varie en fonction du degré d'humidité du bois et du type d'essence :

- **Pouvoir calorifique en fonction du taux d'humidité**



$$PCI = 5000 \times (1-H) - 625 \times H \text{ avec } H \text{ en } \%$$

Il faut environ 2 ans de séchage pour avoir des buches à 20% d'humidité

- **Pouvoir calorifique en fonction du type d'essence**

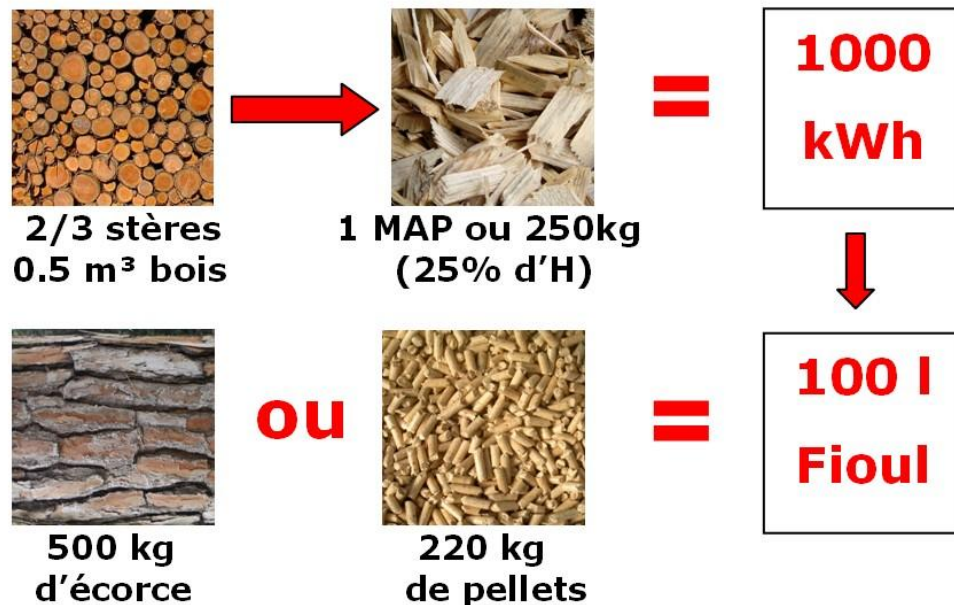
Feuillus sec	PCi en kWh / tonne	Résineux sec	PCi en kWh / tonne
Chêne	4930	Pin maritime	5320
Hêtre	4870	Sapin	5370
Châtaignier	5230	Epicéa	5260
Charme	4950	Pin sylvestre	5320
Frêne	4940	Douglas	5290
Bouleau	5020	Mélèze	5190
Acacia	5270	Moyenne résineux	5300
Aulne	4990		
Bouleau	5240		
Peuplier	4800		
Orme	5130		
Moyenne feuillus	5000		

La différence de pouvoir calorifique entre les résineux et les feuillus est faible. Les résineux sont en moyenne plus énergétiques (+ 6%)

2. La filière bois d'émondage

La productivité en bois d'une haie pour le déchetage en plaquettes est extrêmement variable : elle dépend des essences présentes dans la haie, de l'entretien qui a été réalisé jusqu'alors et de l'état général de la haie. Ce dernier peut s'évaluer en fonction du nombre de strates présentes et de la continuité de la haie. Certains bois trop gros tels que les arbres de haut jet ou les vieux taillis ne seront pas déchetés car leur diamètre sera supérieur à la capacité des déchiqueteuses à alimentation manuelle (25cm).

Les équivalences entre les différentes formes de bois énergie sont données dans le tableau suivant.



- **Les déchiqueteuses à bois :**

Le déchetage est pour les agriculteurs un moyen moderne de valoriser la totalité des branches et branchages produits par l'entretien des haies afin que cet entretien ne soit pas effectué à perte. Les déchiqueteuses mobiles à atteler sur la prise de force des tracteurs agricoles permettent de déchetter des branches de plusieurs mètres de long, le diamètre toléré étant variable en fonction des capacités de la machine. Le produit obtenu est appelé plaquettes et s'apparente à de gros copeaux de bois. Les matériels permettant d'obtenir de la plaquette compatible avec l'utilisation en chaudière automatique (granulométrie homogène, sans queues de déchetage) sont des déchiqueteuses à couteaux qui coupent le bois (les déchiqueteuses à marteaux défibrent et broient le bois ce qui peut poser problème dans la vis sans fin).

Les plaquettes doivent être séchées sous abri de 4 à 6 mois pour passer à 25% d'humidité.

- **Données technico-économiques :** (www.aile.asso.fr).

- Diamètre maximum accepté : Jusqu'à 25 cm
- Organe de coupe : Disque (3 à 6 couteaux par disque)
- Aménagement du bois : Alimentation : manuelle et rouleaux ameneurs
- Puissance de traction nécessaire : 80 à 100 cv
- Rendement des chantiers en conditions bocagères : 4 à 10 MAP/h
- Prix environ 20.000€ (de 10 à 30.000 selon la capacité de la machine)
- Une journée de chantier à 3 ou 4 personnes pour 200 ml de haie
- Coût de production entre 50 et 60 €/tonne (18 à 20 € le map)

- **Quelques chiffres sur la filière :**

La productivité mesurée sur des chantiers de déchiquetage dans des départements de l'Ouest de la France se situe entre 100 et 200 m³ de plaquettes fraîches pour 1km de haie soit de **40 à 80 Tonnes**, avec un passage en moyenne tous les 10 ans ou de **4 à 8 tonnes/km de haie/an**.

Pour déchiqeter 1 map, le tracteur actionnant la déchiqeteuse consomme environ 1,3 litre de gazole.

1 km de haie recépée tous les 12-15 ans permet d'obtenir entre 30 et 150 Tonnes de bois vert en raison de la diversité des haies (ripisylve, bordure chemin, séparation de champs).

- **Les éléments de calcul du coût**

Il faut environ 60 t de bois vert/an pour chauffer une petite école primaire et 550 t de bois vert/an pour chauffer une piscine. La rentabilité d'un tel système de chauffage dont le coût d'installation est environ le double de celui d'un système au fioul, dépend du **coût d'achat des plaquettes** et des subventions variables d'une région à l'autre sur l'investissement. Les chaudières à alimentation automatique ont un rendement élevé (85 à 90%) et produisent peu de cendres (1 à 2%). **De plus un taux de TVA réduit (5,5 %) sur l'achat des bûches, des plaquettes ou des pellets alimentant des cheminées ou des chaudières, rend cette forme d'énergie très attractive pour les particuliers ou les collectivités.**

Le silo de stockage des plaquettes doit être d'accès facile pour prévoir son approvisionnement.

Prévoir 30 m³ environ pour une autonomie de 4 mois pour 150m² habitable.



Chaudière automatique granulés et plaquettes.

Source : Heizomat

La réalisation de ce type de projet engage une activité sur le long terme avec de multiples intérêts pour les collectivités et les agriculteurs: pérennisation des haies donc préservation de la qualité de l'eau, maintien des sols et des paysages, soutien à des emplois de proximité, économie sur le combustible, réduction des émissions de gaz à effet de serre et diversification du revenu agricole.

Des mesures d'accompagnement qui complètent le «Plan bois-énergie» (Etat-ADEME) concernent la certification des appareils de chauffage, la normalisation du combustible bois et l'organisation de réseaux de distribution de bois de qualité.



Plaquettes de bois



Pellets ou granulés de sciure

3. La filière céréales

Quand l'électricité, le gaz, le fuel sont trop chers, malodorants au sens propre comme au sens figuré, le bois trop lourd, difficile à manipuler et peu confortable à utiliser, il est possible de se chauffer directement avec des graines déclassées ou spécifiquement cultivées, dans un strict respect de l'environnement, récoltées par une moissonneuse batteuse.

Environ 2,4 kg de céréales ont le même pouvoir calorifique (Pci) qu'un litre de fuel c'est à dire qu'un ha de céréales équivaut à environ 3000l de fuel en fonction du rendement (70qx/ha) et suffit à chauffer une maison de 150 m².

- **Avantage :**

Les céréales consomment le CO² avant de le rejeter d'où un intérêt contre l'effet serre. Elles sont renouvelables, propres, sans risque d'incendie ou d'explosion, produites localement, elles peuvent engendrer de l'emploi en milieu rural pour la livraison et le service. Elles bénéficient d'une aide spécifique aux cultures énergétiques de 45 €/ha qui s'ajoute aux primes PAC par culture (hors jachère).

- **Inconvénients :**

Les céréales laissent des cendres plus ou moins dures (mâchefer) et des imbrûlés (l'avoine ou l'orge semble plus intéressant que le blé). Les fumées contiennent du chlore. L'inox ne lui résiste pas !

4. L'utilisation des sarments en viticulture :

Le vignoble alsacien (15.000 ha) constitue un gisement de biomasse encore quasiment inexploité. Les sarments de vigne peuvent représenter une source intéressante de biomasse qui, si elle est laissée sur la parcelle peut représenter un risque sanitaire. Le matériel pour le ramassage des sarments et sa mise en botte existe (voir photos).

- **Quelques données économiques :**

- Pouvoir calorifique (PCI) environ 3.8 kWh/kg à 15% d'humidité
- Taux de cendre élevé : 5.4% et taux de métaux lourd élevé en particulier pour le zinc 53 mg/kg et l'arsenic 1.8 mg/kg qui dépasse le seuil de la norme NF 444 sur les agrocombustibles
- Production de 2 à 2.5 T/ha de sarments soit 7600 à 9500 kWh (800 l de fioul en moyenne)
- De 60 à 90 balles /ha de 40 cm de diamètre pour 70 à 80 cm de longueur (30kg) lié par des ficelles polyéthylène. Une balle de sarment équivaut à environ 10 l de fioul
- Temps de travail pour la mise en bottes : 1.5 heures/ha environ pour la mise en balles.
- Prix de la botteleuse CAEB : 9000€ HT.

Le vignoble alsacien pourrait chauffer environ 10.000 logements de 120 m² bien isolés !!



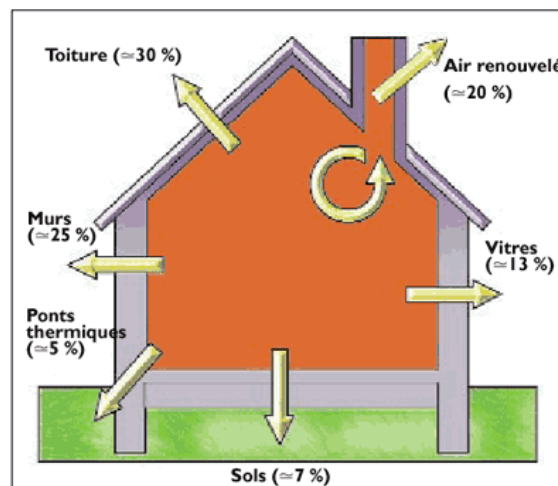
II) Le dimensionnement de l'installation de chauffage.

Pour déterminer les besoins de dimensionnement d'une installation de chauffage il est nécessaire de connaître un certain nombre de paramètres.

Les besoins annuels de chauffage, correspondent aux pertes thermiques pendant la saison de chauffe (*saison légale de chauffe du 20 octobre au 20 mai soit 220 jours*) moins les apports gratuits (F) d'origine solaire et interne (*chaleur dégagée par les équipements et l'occupation du local*).

1. La déperdition de chaleur :

Elle est liée principalement au volume à chauffer, à l'isolation du bâtiment, à sa conception (importance des ponts thermiques) et à sa situation géographique (zone ventée, importance des surfaces vitrées, température mini en période de froid ...).



Les pertes sont donc liées à un coefficient **GV** somme de toutes les déperditions du logement pour un degré d'écart entre les températures intérieures et extérieures.

$$GV = DP + DP' + DR \text{ en } W/m^3 \cdot ^\circ C$$

$$D \text{ (déperditions brutes annuelles en kWh/an)} = GV \cdot DH/1000$$

- **DP** : Déperditions au travers des parois extérieures opaques ou vitrés
- **DP'** : Déperditions au travers des parois donnant sur un espace non chauffé
- **DR** : Déperditions par renouvellement d'air

Un matériau est caractérisé le plus souvent par sa **résistance thermique (R)** exprimée en $m^2 \cdot ^\circ C/W$ avec $R = e$ (épaisseur en m) / λ (lambda) le coefficient de conductivité thermique. Le plus souvent on utilise le coefficient de transmission thermique **U** (anciennement K) qui est l'inverse de **R** et qui est exprimé en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

$$U = \lambda \text{ en } W/m \cdot ^\circ C / e \text{ (épaisseur en mètre)}$$

1.1. Déperdition à travers les parois

Les déperditions à travers les parois sont les sommes de toutes les surfaces par leur coefficient **U** de déperdition surfacique en $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ainsi que les sommes des pertes par liaison (déperdition linéiques « Y » par ponts thermique) en $W/m \cdot ^\circ C$

Voici quelques coefficients pour des matériaux différents. Plus la valeur de U est faible plus le matériau est isolant. Dans la pratique comme seules les résistances thermiques R sont cumulables on obtient la valeur U d'un mur en prenant l'inverse de la somme des résistances de chacun des éléments qui le compose ($U = 1/R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$)

- Double vitrage : $U = 1.1 \text{ à } 2.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Parpaing creux de 20 cm : $U = 5.2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Brique creuse de 20 cm $U = 2.3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Brique Monomur de 20 cm $U = 1.3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Béton de chanvre (10 cm) $U = 0.45 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Plaque de liège (5 cm) $U = 0.64 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

L'enveloppe globale d'une maison passive (moins de 15 kWh/m²/an doit avoir une valeur de U inférieure à 0.15 W/m².°C

Ordre d'idée pour le GV en tenant compte du renouvellement d'air :

- Logement neuf isolé : $GV = 0,7 \text{ à } 0,9 \text{ en W/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
- Logement ancien isolé : $GV = 0,8 \text{ à } 1,1 \text{ en W/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
- Logement ancien non isolé : $GV = 1.4 \text{ à } 2.5 \text{ en W/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$

Exemple : si $GV = 1 \text{ W/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ alors $DP = 300 \text{ W/}^\circ\text{C}$ pour une maison de 120 m^2 (300 m^3) ou $300 \times DH$ qui correspond aux milliers de degrés-heures de chauffage annuels. $DH = DJU \times 24$ soit $69200 \text{ }^\circ\text{h}$ en Alsace) d'où $DP = 20760 \text{ kWh}$.

1.2. Déperditions par renouvellement d'air

Les déperditions par renouvellement d'air en W/°C sont estimées à :

$DR = 0.34$ (chaleur volumique de l'air) \times Volume d'air à chauffer par heure (soit V volume du bâtiment \times T (taux de renouvellement par heure)).

L'utilisation d'un puits canadien amenant de l'air aux alentours de 10° permet de réduire considérablement ces déperditions. De plus si le puits canadien est couplé à une VMC double flux qui récupère une partie des calories rejetées par la VMC (rendement 80% sur une installation bien dimensionnée) ces déperditions sont réduites au minimum.

Remarque : l'intérêt d'une telle installation dépend du mode de chauffage (peu d'intérêt pour un chauffage par plancher chauffant)

Ex : si $T = 0.5$ alors $DR = 0.5 \times 0.34 = 0.17 \text{ W/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ soit $51 \text{ W/}^\circ\text{C}$ pour une maison de 120 m^2 (300 m^3) soit $51 \times 69200 / 1000 = 3530 \text{ kWh}$ sur une saison de chauffe en Alsace ($69200 \text{ }^\circ\text{h}$)

Dans le cas de l'utilisation d'un puits canadien les milliers de degré-heure sont d'environ 220 (jours de chauffe) $\times 24 \times (18-10) = 42240 \text{ }^\circ\text{h}$ soit un besoin de $51 \times 42240 / 1000 = 2150 \text{ kWh}$ pour compenser les déperditions par renouvellement d'air et donc une économie de **1380 kWh** (soit 130 litres de fioul).

Si ce puits canadien est couplé à une VMC double flux ($R_{rp} = 80\%$), les déperditions se limitent à 2150 kWh - pertes énergétiques récupérables (P_r) pondérées par leur rendement de récupération (R_{rp}) ou $2150 \times 20\%$ soit 430 kWh ce qui correspond à une économie **3100kWh**

La déperdition par unité de volume pour le calcul du DPE : $a_{RA} = DR / 2.5 \times SH$

2. Les apports de calories et les besoins en chauffage

Le coefficient **BV** d'un logement est égal à ses besoins annuels de chauffage, pour un degré d'écart entre les températures intérieure et extérieure, pendant la saison de chauffe. Il tient compte des apports gratuits de chaleur **F**. Ces apports sont soit solaires (baies vitrées...) soit internes (occupation des locaux, appareils ménagers...)

$$BV = GV.(1 - F) \text{ en } W/^{\circ}C$$

$$d \text{ (déperditions nettes en kWh/an)} = BV.DH/1000$$

La plupart du temps **BV** représente de **60 à 80%** de **GV** et dépend très fortement de l'orientation du bâtiment et de l'importance des baies vitrées.

2.1. Les besoins de chauffage (**Bch**) et la consommation annuelle (**Cch**)

La consommation annuelle est égale aux déperditions nettes du logement multiplié par les milliers de degrés-heures de chauffage annuels (**DH**) (*DJU en base 18 = 2900 °C/jour ou 69200 °C/h pour l'Alsace*) divisé par le rendement global de l'installation de chauffage **Rch** = produit des différents rendements (générateur, distribution, régulation, émission).

$$Cch = Bch / Rch = BV.DH.Ci / 1000 \times Rch \text{ ou } d.Ci / Rch \text{ en kWh d'énergie primaire}$$

D'où pour un calcul des déperditions à partir des consommations : $d = Cch.Rch/Ci$

Avec C_i = coefficient d'intermittence qui traduit les baisses momentanées de température, lors de ralenti nuit ou d'inoccupation des locaux (*pour une école C_i environ 60% et 80 à 90% pour un logement*). On parle de degré jour effectif (**DJE**) avec $DJE = C_i \times DJU$. L'inertie du logement joue un rôle important dans la valeur du coefficient d'intermittence, si l'inertie est grande, la relance nécessitera plus d'énergie pénalisant ainsi l'application de l'intermittence. Il en est de même pour la température en période de marche réduite, plus elle est basse, plus la durée de relance augmente.

Le coefficient d'installation de chauffage **Ich** et l'inverse de **Rch**. Il varie de **1.1 à 1.4**

2.2. Les besoins en ESC (**Bec**)

Ils sont liés à la consommation individuelle (*50l/j/personne en moyenne d'eau à 45°*), aux autres utilisations nécessitant de l'eau chaude (lavage de la salle de traite, fromagerie...) et à la température de cette eau pour éviter des problèmes sanitaires (légionellose...). **Les installations de chauffage doivent satisfaire en priorité les besoins en ECS**. L'énergie nécessaire pour faire chauffer le ballon d'ECS se calcule de la façon suivante :

1 Kcal (ou 1.163 Wh) est l'énergie nécessaire pour élever 1 litre d'eau de 1°C

Pour augmenter la température de 1000 litres d'eau de 50° il faut dépenser une énergie de 58 kWh. Une chaudière de 25 kW à pleine puissance pourra chauffer ce volume d'eau en un peu plus de 2 heures. Cette énergie stockée sous forme d'eau chaude constitue une réserve disponible pendant plusieurs jours selon la capacité de l'hydro accumulateur et sa déperdition thermique.

Les besoins sont généralement évalués forfaitairement à **21 kWh/m² de surface habitable**.

3. Exemple de calcul simplifié pour le dimensionnement de l'installation de chauffage

La puissance nominale de la chaudière est calculée de façon à couvrir les besoins de pointe par grand froid et ne tournera donc à pleine puissance qu'une partie de l'année (de 1200 à 1500 heures pour le chauffage). La température retour chaudière doit être de 45° minimum pour éviter les problèmes de corrosion. Elle doit pouvoir fournir l'eau chaude sanitaire (ECS) **en toutes saisons à + de 45°** pour le lavage. Les déperditions totales doivent être majorées d'une surpuissance de relance (**Cs**) nécessaire pour permettre une montée rapide en température après un ralenti de nuit. **On prend en général Cs = 1.2**

$$P \text{ (en Watt)} = BV \times (Tc - Tb) \times Cs$$

$$P \text{ (en kW)} = d \times (Tc - Tb) \times Cs/DH$$

Avec BV = déperditions de l'installation en W/°C ,

Tc = température de consigne de chauffage (généralement 18°C pour la France) en °C

Tb = température extérieure de base du site (température basse extrême de référence) en °C

Exemple pour une ancienne maison de 120 m² isolée en toiture avec double vitrage devant faire face à des températures minimum de - 20° (GV = 1 W/m³ °C) et un rendement (Rch) de 80%

$$P = 1 * 120 * 2.5 \text{ (Volume à chauffer)} * 40 \text{ (écart entre } t^\circ \text{ base et } 20^\circ) * 1.2 = 14400 \text{ W ou } 15 \text{ kW}$$

4. L'hydroaccumulation

L'hydro-accumulateur (ballon tampon) sert à absorber **sous forme d'eau chaude** l'énergie produite par tout générateur de chaleur: chaudière, capteur solaire, pompe à chaleur. L'énergie stockée est restituée par l'intermédiaire d'émetteurs (radiateurs, plancher chauffant, ...) et peut assurer la production d'eau chaude sanitaire. Il permet **une optimisation du fonctionnement des chaudières bois et biomasse** (céréales, granulés de bois, ...) en toutes saisons en évitant le fonctionnement au ralenti qui encrasse la chaudière (le bistrage des conduits réduit le rendement de l'installation). **Son utilisation est indispensable sur les chaudières à allumage manuel (bois ou polycombustibles) et sur les installations solaires pour éviter les surchauffes de l'installation en été et satisfaire les besoins par temps couvert.** L'hydro-accumulateur est malgré tout fortement recommandé sur toutes les chaudières polycombustibles même à allumage automatique pour éviter les allumages répétés coûteux en énergie (décapeur thermique de 2 kW) (*il faut environ 10 mn pour allumer des céréales*) de plus la séparation entre eau morte (circuit chauffage) et eau sanitaire (renouvelée) permet de protéger le système contre les agressions (tartre, corrosion...).

4.1. Son dimensionnement

Le dimensionnement de l'hydro-accumulateur dépend de nombreux paramètres : en particulier de l'autonomie souhaité, du degré de confort et du ΔT exploitable (de l'eau entre 45 et 85° = 40°). La stratification thermique dans le ballon permet de soutirer l'eau à la température désirée et ainsi de déclencher ou de réguler via une sonde thermique la chaudière et/ou les apports solaires.

Le volume du préparateur solaire mixte (avec appoint chaudière ou électrique) doit pouvoir couvrir au moins 1.5 fois les besoins journalier dans la partie sud de la France et au moins **2 fois dans la partie nord** pour compenser les jours à faible nébulosité c'est ce que l'on appelle le rapport de couverture (**R**).

Pour avoir une idée plus précise de la contenance que doit avoir le ballon d'eau chaude solaire, il est nécessaire d'adopter cette formule : **Contenance** = $((Bp \times Np \times (Tes - Tef)) / (Tst - Tef)) \times R$
Bp = besoin par personne et par jour (50 l/j dans la plupart des cas)

- **Np** = nombre de personnes occupant le logement
- **Tes** = température de l'eau de soutirage (45°C)
- **Tef** = température de l'eau froide (8 à 10°C l'hiver, 10 à 12°C l'été)
- **Tst** = température de l'eau de stockage (50 à 90°C)
- **R** = rapport de couverture (2 pour la partie nord de la France)

Exemple pour une maison de 4 personnes: Tes = 45°C ; Tef = 10°C ; Tst = 50°C :

$$\text{Volume de stockage} = ((50 \times 4 \times (45 - 10)) / (50 - 10)) \times 2 = 350 \text{ litres}$$

Remarque : La puissance de la chaudière doit être augmentée par la puissance nécessaire pour mettre l'hydro-accumulateur en charge sur une durée de temps acceptable (de 3 à 6 heures).

Exemple : une puissance de 5 kW en plus permettra d'élever la température de 300l d'eau de 50° en 3 heures environ. L'énergie nécessaire est équivalente à celle fournie en juillet par 5 m² de capteurs solaire (3 kWh/m²/jour en moyenne en Alsace dans les meilleures conditions d'orientation).

5. Les apports par l'énergie solaire

Il est difficile de comparer deux chauffe-eau solaires sans faire une simulation spécifique pour chaque système en intégrant la surface des capteurs, le volume réel du ballon, la qualité de son isolation thermique et sa consommation estimée. Le but est de couvrir un maximum des besoins d'eau chaude avec un investissement compétitif. Vous pouvez réaliser une simulation avec la méthode SOLO, sur le site www.tecsol.fr mais l'approche simplifiée dans les conditions standards en Alsace (orientation sud des capteurs et inclinaison à 45° sans masque) vous permet de cerner approximativement vos besoins (voir ci-dessous).

Durée d'insolation par mois en moyenne à STRASBOURG (en heures et pourcentage)

mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	TOT
heures	53.8	82.7	131.6	169.5	205.8	205.6	224.1	232.1	157.4	84.1	50.8	35.4	1632
%	3.3	5	8	10.4	12.6	12.6	13.7	14.2	9.7	5.2	3.1	2.2	100

5.1. Les valeurs nécessaires aux calculs.

La puissance solaire disponible (**Psd**) dépend de l'orientation et de l'inclinaison des capteurs, du mélange eau-glycol et de la région où se situe l'habitat (**E**)

- coefficient **E** (énergie solaire reçue en kWh/m²/jour)
- coefficient **Ci**, inclinaison des capteurs.
- coefficient **Co**, orientation des capteurs.
- coefficient **Cc**, correction du fluide caloporteur.

- coefficient **Rcp**, rendement capteur, valeur moyenne : 0,5 pour un capteur plan et 0.7 pour un capteur à tubes.

$$\text{Psd} = E \times R_{cp} \times C_i \times C_o \times C_c \text{ (KWh/m}^2 \text{ .jour).}$$

Dans le meilleur des cas pour un capteur plan (orientation plein sud, capteur à 40° et 40% de glycol, la puissance solaire moyenne disponible à Strasbourg est de **1.4 kWh/m²/jour** (de 0.6 l'hiver à 3 kWh/m²/jour l'été) soit environ **500 kWh/m²/an**.

5.2.Exemple de calcul :

- **Besoins journaliers** : pour porter 400 l d'eau à 60° soit une augmentation moyenne de température de 50°C il faut 50*400 kcal soit **23 kWh** (20000 x 1.163 /1000)
- **Besoins annuels** : 23*365 = 8400 kWh
- **Taux de couverture optimal des besoins pour une bonne rentabilité: 60%**
- **Apports solaires annuels nécessaires:** 8400*0.6 = 5040 kWh
- **Productivité annuelle d'un bon capteur plan** (dans ces conditions de couverture des besoins) : **500 kWh/m²** (soit 10 m² de capteurs).

6. Le choix d'une chaudière biomasse :

Elle passe par un ensemble de paramètres (prix, coût d'entretien, facilité d'entretien, souplesse d'utilisation, robustesse, polyvalence, puissance en maintien ...)

- **Prix** : Selon la puissance et la marque on peu facilement avoir un différentiel de 3000 à 7000€ par rapport à une chaudière fioul. Ils varient de 6000€ (Pelling 27) pour un modèle de base sans automatisme et sans la vis à 14000€ Guntamatic 7-30 (la plupart des modèles se situent entre 10 et 12000€ avec la vis d'amenée) Il faut tenir compte du crédit d'impôt et des aides régionales !
- **Polyvalence** : certaines chaudières proposent des préréglages (vitesse d'amenée du combustible par une vis sans fin en fonction du combustible et volume d'air comburant pour optimiser la combustion). La plupart des chaudières acceptent une très large gamme de combustibles (noyaux de fruits, coquille de noix, granulés divers, bois déchiqueté, céréales...) et sont préréglées pour certains combustibles (Guntamatic et Energie système). Mais il faut se renseigner pour savoir si la chaudière est garantie pour certaines utilisations comme pour les tourteaux de colza et de tournesol (MULTI-HEAT (25 et 40 kW) de HS). Les grosses chaudières sont en général plus polyvalentes.
- **Entretien** : les modèles les plus chers sont très automatisés (décendrage, nettoyage automatique des turbulateurs et allumage sur la Guntamatic dont le bac à cendre ne se vide que tous les 15 jours). Les autres marques doivent être nettoyées plus régulièrement et même décendrées tous les jours pour les modèles sans automatisme (HS en option et Pelling). L'automatisme en particulier l'allumage peut être coûteux en énergie.
- **Puissance en maintien** : en règle générale cette puissance est celle dispensée en allure de maintien des braises (vitesse d'amenée minimum du combustible et ventilation séquencée). Elle correspond en général à 25 - 30% de la puissance nominale. Une chaudière de 30kW en allure de maintien dispense une puissance de 7 à 9 kW ce qui correspond à plus de 300 litres d'eau exploitable entre 60 et 80° d'où la **nécessité d'un hydro-accumulateur en été et en intersaison si l'on veut éviter les arrêts répétés de la chaudière !**

7. Le choix du combustible :

Il dépend principalement de son coût de production (ou de son prix d'achat), de son pouvoir calorifique (**Pci**), des problèmes engendrés par sa combustion (corrosion par les fumées,

présence de scories...). Les céréales dégagent du chlore ce qui nécessite l'utilisation de conduits d'évacuation des fumées en céramique ou en polypropylène (le coût varie de 60 à 250 € le mètre linéaire) et ont un taux de cendre élevé. Par contre les céréales présentent l'avantage de pouvoir se faire sur jachère voire d'être déclarées en « culture énergétique » et bénéficier d'une prime supplémentaire de 45€/ha. Dans ces deux cas il faut déposer un dossier auprès de l'ONIOL et se soumettre à des contrôles !

Tableau de comparaison de quelques combustibles :

	Pouvoir calorifique (Pci)	Densité en kg/m ³	Taux de cendre en %
Fioul domestique	10 kWh/l	845	NC
Granulés de bois et tourteaux	5 kWh/kg	650 à 750	0.3
Plaquettes forestières à 25% d'H	4 kWh/kg	250 à 300	0.5 à 2
Miscanthus	4.2 kWh/kg	120 à 160	1.9
Triticale et maïs	4.4 kWh/kg	750 - 780	2 à 3
Blé et seigle	4.2 kWh/kg	750	2 à 3

7.1. Les critères de choix pour les céréales

- **Le blé** a la température de déformation la plus faible. Pour éviter le mâchefer, il serait préférable d'utiliser des variétés fourragères et d'ajouter 1% de chaux (à saupoudrer en couche dans le silo)
- **Le triticale** présente plusieurs avantages un pouvoir calorifique supérieur au blé et un taux de cendre inférieur pour des rendements équivalents et pas de prise en masse (mâchefer). Le triticale est une plante rustique peu exigeante en intrants (fertilisants et fongicides) avec des rendements en paille très élevés d'où l'intérêt pour les éleveurs
- **L'orge** est très calorifique et a une forte capacité d'adaptation au milieu bien que plus sensible qu'un blé aux excès d'eau. Les rendements sont moins élevés que ceux du blé mais les risques de piétin sont moindres et les terres libérés plus tôt
- **L'avoine** est aussi calorifique que l'orge mais en raison de sa faible densité il faut prévoir un volume de stockage 50% supérieur à celui de l'orge
- **Les tourteaux** de colza ou de tournesol sont aussi calorifiques que les granulés de bois et donnent peu de cendre contrairement aux céréales.
- **Les rafles de maïs** sont également très calorifique (5kWh/kg). Pour éviter le mâchefer dû à la silice il est conseillé de ne pas dépasser 750° dans le foyer. L'allumage des rafles est très rapide contrairement aux céréales ce qui permet des allumages répétés. Un ha de maïs produit environ 1,5 tonne de rafles soit l'équivalent de 750 l de fioul.

8. La cogénération pour améliorer l'efficacité énergétique de l'exploitation

La cogénération est la production conjointe de chaleur et d'énergie mécanique, généralement transformée en électricité, à partir d'une même source d'énergie. Elle permet d'exploiter au maximum le potentiel énergétique du combustible.

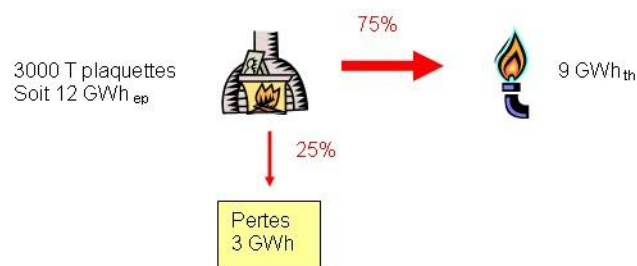
Toute étude détaillée de cogénération doit être précédée d'un calcul de rentabilité.

Il faut en premier lieu faire un diagnostic précis des besoins de chaleur, en précisant leur forme (vapeur, eau chaude, eau surchauffée), leur niveau de température, leurs puissances moyennes et de pointe aux différentes périodes de fonctionnement pour déterminer la filière la mieux adaptée (gazéification, turbine à contre pression, moteur à vapeur...) et ainsi calculer la puissance électrique engendrée.

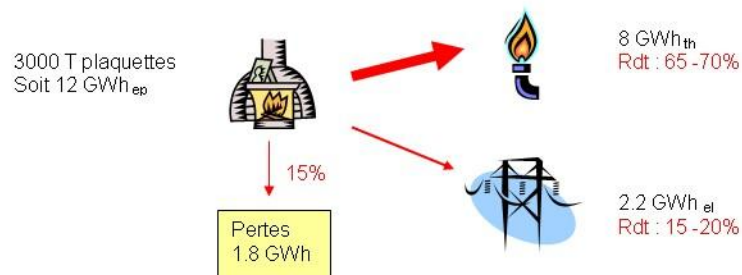
Cette valeur, comparée aux besoins électriques propres de l'établissement, définira s'il y aura ou non possibilité de vente de courant à EDF.

Intérêt: La production combinée d'électricité et de chaleur offre un meilleur rendement total pour une même puissance délivrée en chaleur et en électricité avec productions séparées.

**Il faudra donc moins de combustible pour produire la même quantité d'énergie.
Le rendement d'une telle installation peut alors atteindre près de 90 % au total**



Réseau de chauffage avec et sans cogénération



8.1. Les incitations financières en faveur du développement de la filière bois-énergie

Le fonds chaleur renouvelable (ADEME) (1 Md€ pour la période 2009-2011):

- Pour la création de chaufferies de plus de 100 tep/an soit 300 T plaquettes
- **Critère d'éligibilité** : valoriser de la biomasse ou de la chaleur actuellement « perdue » (pour chaque projet, un plan d'approvisionnement précis en biomasse devra être présenté par les porteurs de projet et validé par la préfecture de la région concernée).
- **Critère d'inéligibilité** : utilisation de céréales alimentaires, ordures ménagères, boues de station d'épuration, huiles végétales et substances d'origine animale.

Les appels d'offres de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE)

- Ils soutiennent l'installation de centrales de cogénération de taille industrielle (plus de 5MW électrique).

Le prix de rachat de l'électricité produite à partir de biomasse :

- Un arrêté fixant les conditions d'achat de l'électricité produite à partir de biomasse est paru le 28 décembre 2009 au Journal Officiel. Concernant les installations de puissance électrique inférieure à 5 MW, le tarif d'achat a été fixé à **4,5 c€/kWh**. En revanche, pour les installations de puissance électrique supérieure à 5 MW, le tarif d'achat est égal au minimum à 12,5 c€/kWh **dès lors que l'efficacité énergétique est supérieure à 50%**.