Énergie de la biomasse et Cogénération

Stéphane THIERS, ingénieur de recherche, CEP, MINES ParisTech

(stephane.thiers@mines-paristech.fr)

La biomasse, c'est quoi ?

- Bio = Vie
- Biomasse = masse totale des êtres vivants présents sur Terre
- Les êtres vivants constituent un maillon du cycle du carbone (chaîne trophique)
- Démarrage du cycle : réaction de photosynthèse

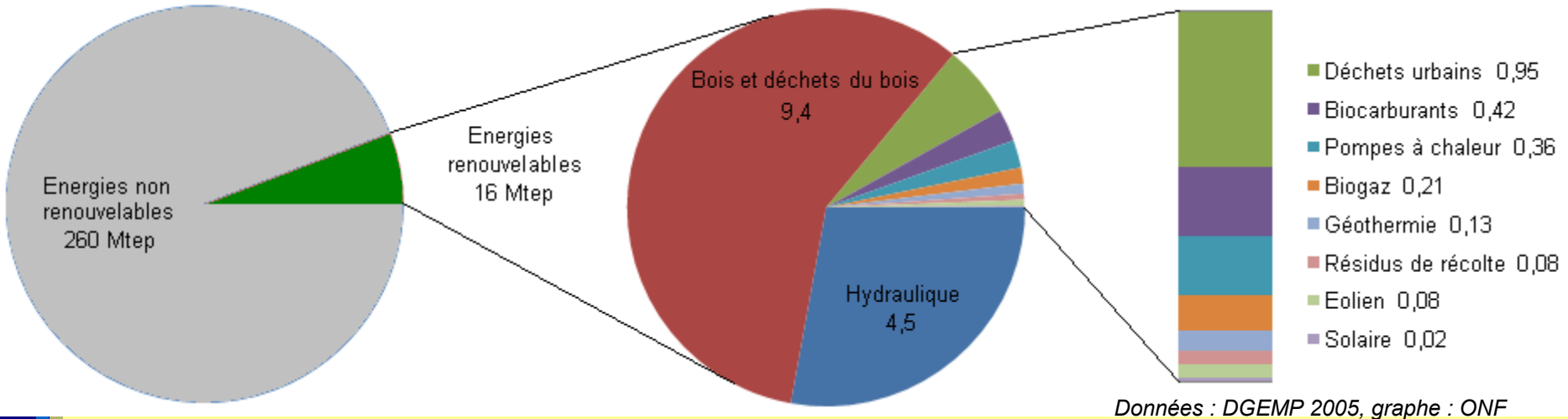
$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + \text{énergie lumineuse} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

  - Efficacité de la conversion : de 3 à 5 % de l'énergie lumineuse incidente

- Vie liée au métabolisme = ensemble des processus de production, consommation, transformation et stockage de l'énergie.
  - Énergie captée à partir du soleil (photosynthèse)
  - Énergie absorbée : chimique (nutrition)
  - Énergie stockée : chimique dans la matière organique (glucides, lipides, protides, etc.)
  - Énergie transformée : production de matière organique, énergie mécanique (muscles), énergie thermique (chaleur)

La biomasse, principale ressource énergétique renouvelable

- Représente environ 80 % des énergies renouvelables dans le monde
- Représente environ 65 % des énergies renouvelables en Europe
- Représente environ 4 % de l'énergie primaire consommée en France



Données : DGEMP 2005, graphe : ONF

- Actuellement fort développement de l'ensemble des filières biomasse
  - Forte volonté politique (débouché pour l'agriculture, utilisation des terres, recherche d'indépendance énergétique)
  - En France : + 20% entre 2005 et 2007

La biomasse, principale ressource énergétique renouvelable

- Historiquement, usage du bois sec, du charbon de bois, huile végétale et graisse animale, déchets de l'agriculture, bouses séchées de ruminants
- Usages historiques :
  - Industrie (fonderie, verrerie)
  - Cuisson (poêle, foyer)
  - Chauffage (cheminée)
  - Éclairage (suif, cire d'abeille, etc.)
- Dans tous les cas, énergie extraite par combustion de la matière organique (réaction d'oxydation)

- Aujourd'hui
  - Certains usages traditionnels demeurent, surtout en zones rurales (cuisson, chauffage principal)
  - Nouveaux usages liés à de nouvelles formes de biomasse
    - Chauffage collectif
    - Transport (carburants)
    - Cogénération

Ressources énergétiques de la biomasse

- **Ressources ligneuses (bois et dérivés)**
  - Bois de feu, charbon de bois, gaz de bois, déchets de bois (copeaux, sciure)
  - Déchets de l'industrie papetière (boues, liqueur noire)
- **Résidus et déchets agricoles (culture et élevage)**
  - Balle de riz, paille, bagasse, bouse de vache, fumier, graisse animale etc.
- **Cultures énergétiques**
  - Canne à sucre, sorgho, colza, soja, plantes oléagineuses, arbres
- **Autres déchets organiques**
  - Déchets ménagers, déchets verts, cartons, papier, etc.

Modes de valorisation de ces ressources

SOURCE	TRANSFORMATION	PRODUIT FINAL
Biomasse résiduelle sèche et Cultures énergétiques	Combustion directe de la source	Bois (granulé, plaquettes, bûche) Huile végétale brute (HVB) autre
	Gazéification de la source	Gaz combustible Gaz de synthèse
	Synthèse d'agro-carburant	Huile Alcool ETBE
	Pyrolyse du bois	Charbon de bois
Biomasse résiduelle humide	Compostage	Compost
	Digestion anaérobie	Biogaz

Usages

- Chauffage
- Production d'électricité
- Transport

} ***Applicable à l'habitat***

- Fertilisant des sols (usage non énergétique)

Énergie de la biomasse et cogénération - CNAM – Module « Intégration des énergies renouvelables au bâti » - 2009 - S. Thiers

Trois grandes filières

- **Solide : Bois-énergie**
- **Liquide : Agro-carburants**
- **Gaz : Biogaz**

1. Bois-énergie : Ressource

En France

- Importante surface boisée (150 000 km^2)
- Forêt actuellement sous-exploitée (65 % de la croissance annuelle récoltée)
  - Fort potentiel de développement à court terme

Dans le monde

- Tendance à la déforestation en Afrique, Amérique (Amazonie), Asie liée à la pression agricole (production pour l'alimentation humaine, pour le bétail, pour les biocarburants)
- Pression sur les forêts primaires

1. Bois-énergie : Différentes formes

Bûches, rondins

Image : Normandy50

Plaquettes Forestières, PCS ou DIB

Image : Association des communes forestières

Granulés aussi : pellets

Image : SIVOM d'Ambert

Briquettes aussi : bois densifié

Image : Spartakus S.A.

1. Bois-énergie : C'est quoi ?

Composition chimique

Composant		Bois dur	Bois tendre
Cellulose	$C_6H_{10}O_5$	43 %	43 %
Hémicellulose	$C_6H_8O_4$	35 %	28 %
Lignine	$C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0,9-1,7}$	22 %	29 %

- + eau + autres (résines, tanins, etc.)

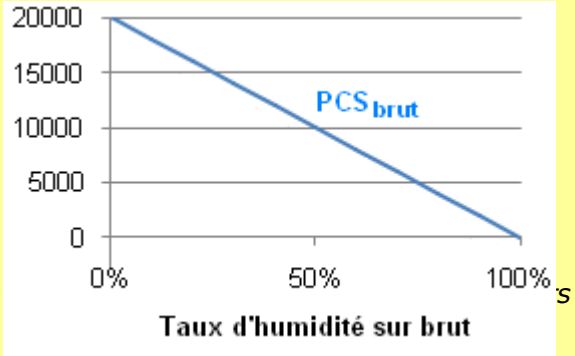
Composition en masse par élément

- Carbone : environ 50 %
- Hydrogène : environ 6 %
- Oxygène : environ 44 %
- Azote : < 1%

Pouvoir Calorifique Supérieur 18 à 20 MJ/kg *mat. sèche*

- Quantité d'énergie extractible du bois
- Varie assez peu selon l'essence du bois

$$PCS_{brut} = PCS_{sec} \cdot (1 - H_b)$$



1. Bois-énergie : humidité du bois

Teneur en eau du bois

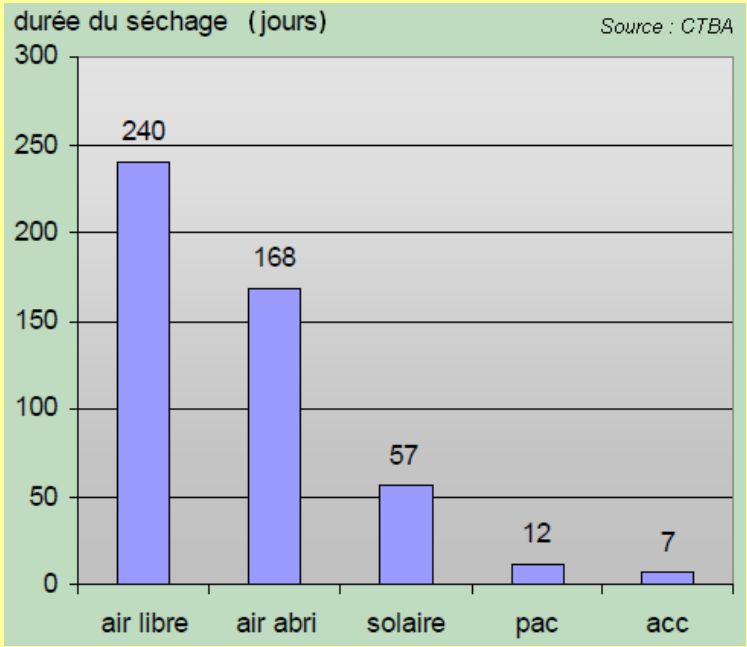
$$H_b = \frac{M_{eau}}{M_{bois\ hum}}$$

Taux d'humidité « sur brut »

$$H_s = \frac{M_{eau}}{M_{bois\ sec}} = \frac{M_{eau}}{M_{bois\ humide} - M_{eau}}$$

Taux d'humidité « sur sec»

- Séchage indispensable pour
  - Éviter de transporter et de stocker de l'eau
  - Améliorer la vitesse et la qualité de la combustion
  - Réduire les fumées et émissions polluantes
  - Améliorer le rendement des chaudières
- 50% à l'abattage, max de 25% en chauffage
- Séchage à l'air libre, sous abri, éventuellement séchage assisté (pompe à chaleur, soleil, air chaud)
  - Temps de séchage très variables



1. Bois-énergie : La combustion du bois

Déroulement en trois phases

1) **Séchage** : vaporisation de l'eau → **Absorption d'énergie** (chaleur latente)
   Production de vapeur. Phase d'autant plus courte que le bois est sec

2) **Pyrolyse** :
   Libération de gaz et production du « charbon de bois »

   Combustion des gaz libérés, mélangés à l'air et soumis à une température élevée → **Libération d'énergie** sous forme de chaleur et de lumière : **les flammes**

3) **Combustion** du charbon de bois sans flamme (incandescence) :
   → **Libération d'énergie** sous forme de chaleur et de lumière : **les braises**

- À l'air libre, pour des bûches, ces trois phases peuvent intervenir quasiment simultanément.
- Dans un foyer, ces trois phases doivent être séparées.
- Pour une bonne combustion, il faut un bois sec et un excès d'air

1. Bois-énergie : Le charbon de bois

- Utilisé depuis l'antiquité
- **Avantages**
  - Pouvoir calorifique plus élevé (33 MJ/kg) que celui du bois (18 MJ/kg)
  - Combustion avec moins de fumées que le bois
  - Produit très peu de cendres
- Production par pyrolyse du bois (cuisson sans air), idéalement à 550 °C
- Traditionnellement réalisé dans des meules (tas de bois recouvert de terre)
- Aujourd'hui, dans des fours en métal

Photo : C. Fouchepate

- 1 kg de bois donne environ 250 g de charbon de bois
- **Composition**
  - Carbone > 80%
  - Matière volatile environ 12 %
  - Eau environ 2 %
  - Cendres environ 1 %

Photo : Brasilyane.com

1. Bois-énergie : Gazéification du bois

- Utilisé durant la 2ème guerre mondiale (gazogène)
- **Avantages**
  - Gaz qui peut être utilisé dans un moteur thermique approprié
  - Rendement énergétique du procédé (70 à 85 %)
- Procédé intermédiaire entre combustion et pyrolyse : combustion incomplète
- Le bois est transformé à 97 % en gaz « pauvre » combustible, dit « gaz de synthèse » : CO, H_2, CH_4
- Installation coûteuse
- PCI entre 4,5 et 5,8 MJ/Nm^3 (à comparer aux 36 MJ/Nm^3 du le gaz naturel)
- Utilisation pour cogénération via un moteur à gaz, mais aussi pile à combustible ou production de carburant liquide (BtL)

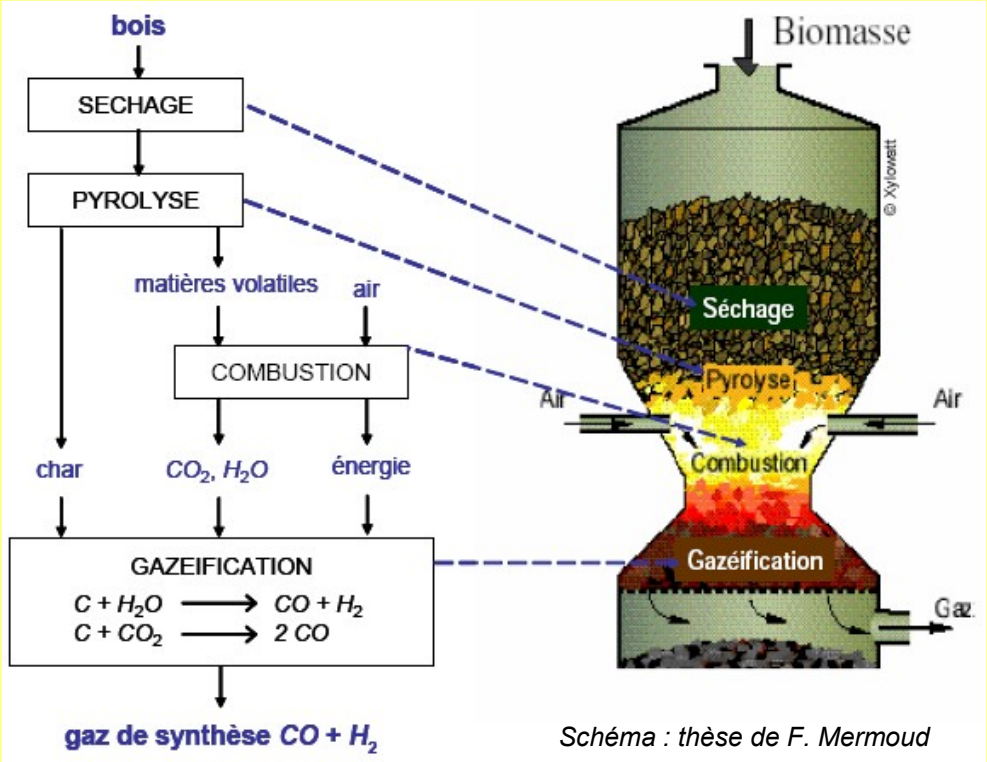


Schéma : thèse de F. Mermoud

1. Bois-énergie : Production de chaleur

Foyer ouvert (cheminée)

- Chauffage essentiellement par rayonnement.
- Rendement thermique médiocre (10 à 15 %) : la chaleur s'échappe avec les fumées
- Utilise bûches ou briquettes
- Autonomie faible (quelques heures)
- Intérêt esthétique ou pour cuisson « au feu de bois »
- Combustion impossible à maîtriser car tirage naturel. Source de pollution
- Possibilité de récupération de chaleur à air ou à eau pour chauffage par convection pour améliorer le rendement.

1. Bois-énergie : Production de chaleur

Foyer fermé (ou insert)

- Foyer en fonte fermé par une vitre
- Chauffage par rayonnement et convection
- Meilleur contrôle de la combustion
- Rendement thermique de 30 à 70 %
- Utilise bûches ou briquettes

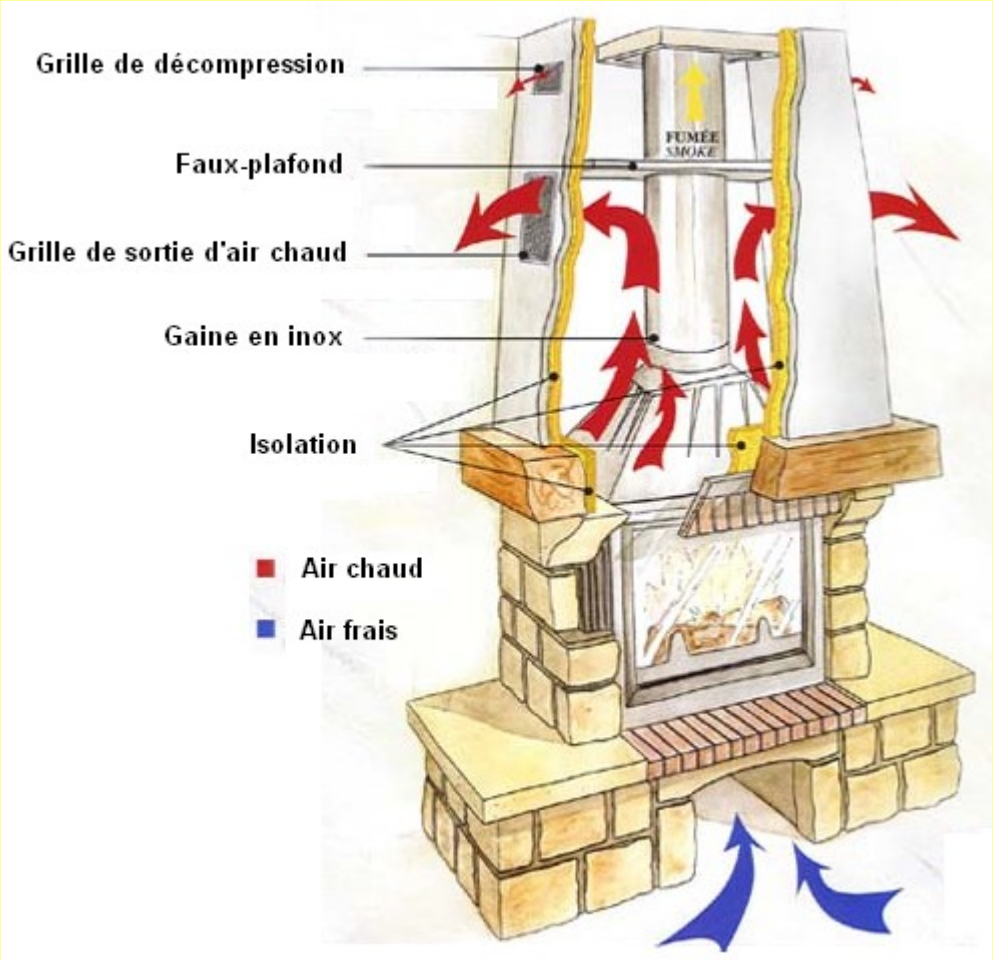


Schéma : cheminées de Rambouillet

1. Bois-énergie : Production de chaleur

Photo : EdilKamin

Poêle

- Chauffage par rayonnement
- Différents types
  - Poêle à bûches →
    - Fonctionnement à pleine charge préférable pour améliorer la durée de vie
    - Autonomie de 5 à 15 h
  - Poêle à granulés
    - Peut fonctionner à charge partielle
    - Alimentation automatique par vis sans fin
    - Autonomie de 12 à 70 h
  - Poêle à accumulation dit « poêle de masse » →
    - Très lourd (> 600 kg)
    - Accumule la chaleur dans sa masse en matériau réfractaire
    - Restitue cette chaleur par rayonnement pendant 12 à 24 h
    - Utilisation de la post-combustion pour atteindre des températures élevées (1000 °C)
    - Rendement jusqu'à 90 %
  - Poêle canadien : favorise le chauffage par convection →
  - Poêle poly-combustibles : accepte bûches et granulés

Photo : Hiemstra

Schéma : Bullerjan

1. Bois-énergie : Production de chaleur

Chaudière

- Production d'eau chaude pour le chauffage (+ eau chaude sanitaire)
- Différentes configurations pour la combustion et la post-combustion
  - Combustion horizontale
  - Combustion inversée
  - Combustion à air pulsé (turbo)
  - Chaudière à granulé ou à plaquettes
  - Chaudière à gazéification (rendement (PCI) qui peut atteindre 92 %) ↓

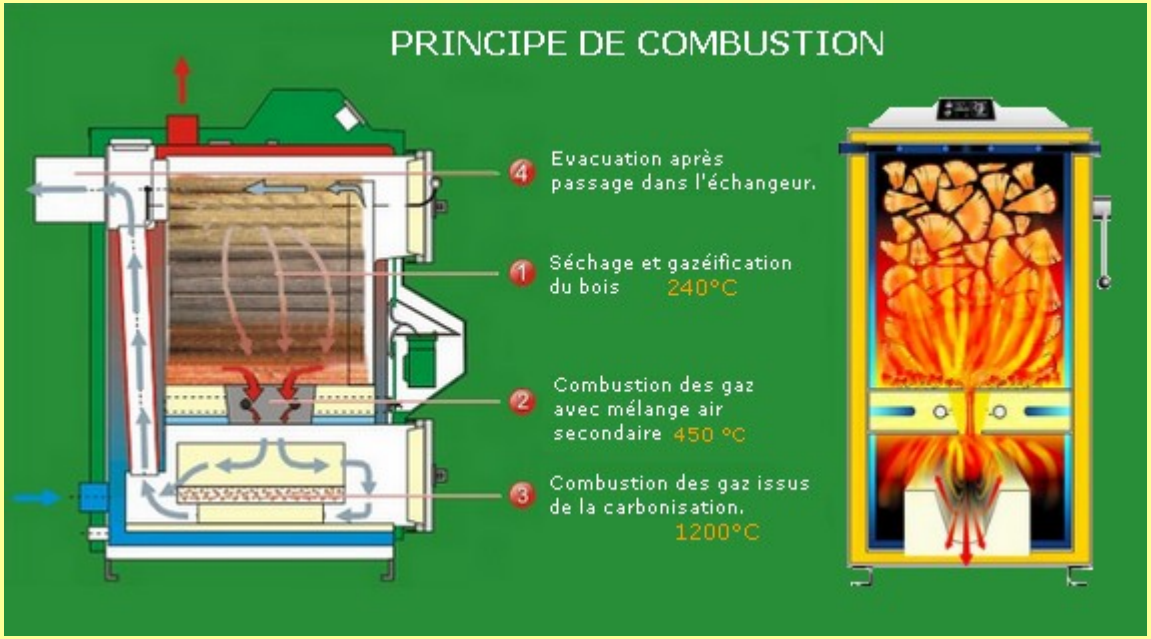


Schéma : Sud Énergies

1. Bois-énergie : Production de chaleur

Chaudière

- Chaudière à condensation
  - Récupération de la chaleur de la vapeur produite
  - Rendement PCI > 100 %

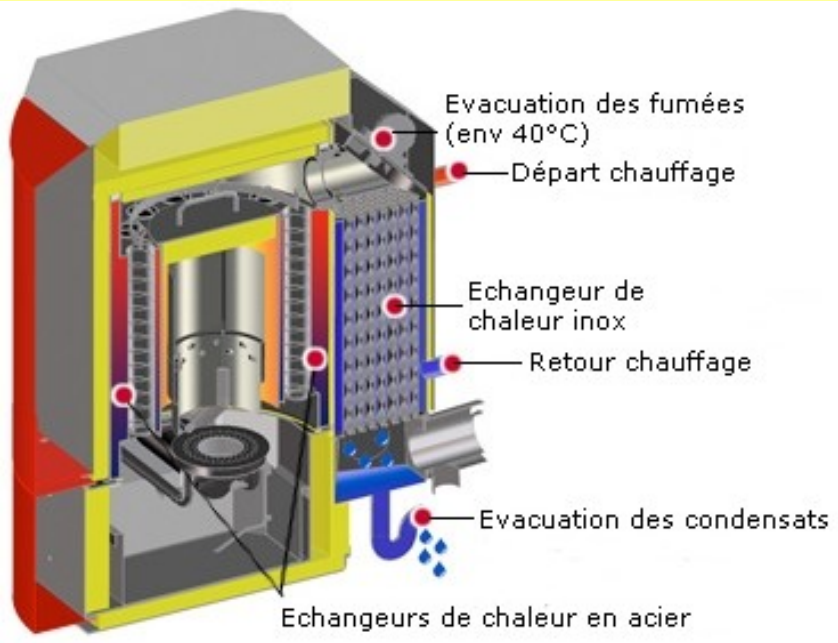


Schéma : Sud Énergies

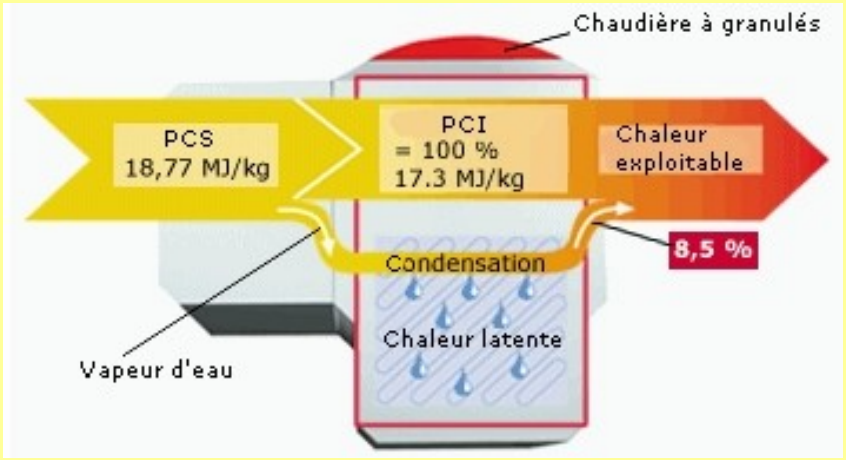


Schéma : Sud Énergies

1. Bois-énergie : Production de chaleur

Chaudière

- Fonctionnement meilleur à pleine charge
  - Meilleurs échanges de chaleur
  - Meilleure évacuation des fumées
- Couplage à un ballon de stockage d'eau chaude
- Diffusion de la chaleur totalement découplée (radiateur, chauffage à air)
- Couplage possible avec des panneaux solaires thermiques (70 % des cas en Allemagne). Différentes configurations possibles.

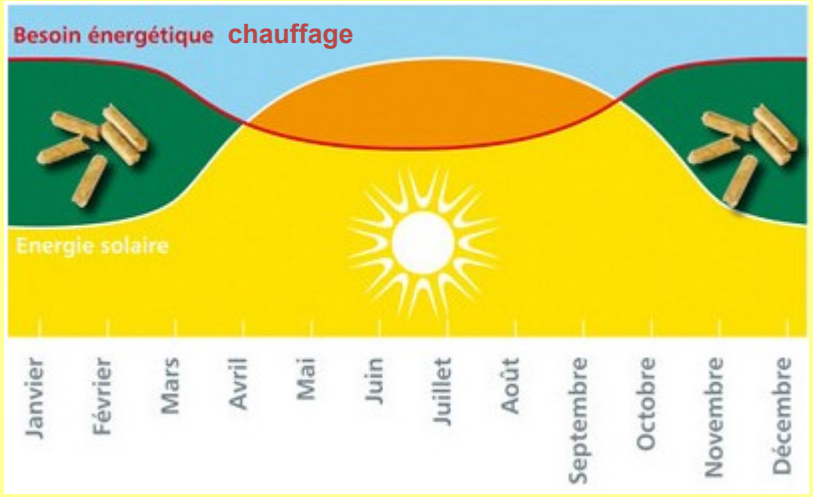
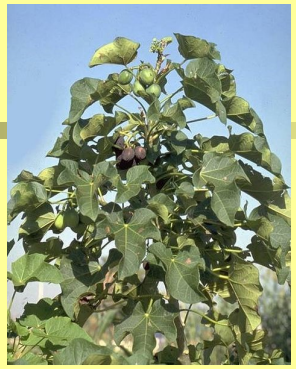


Schéma : Sud Énergies

2. Agro-carburants



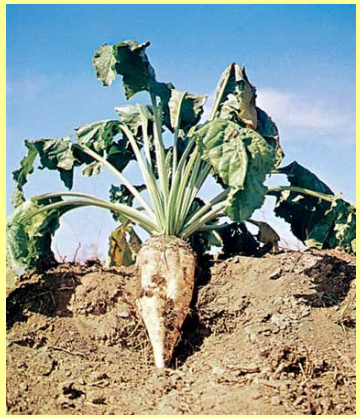
Filières

- Huile Végétal Brute (HVB)
  - Colza, tournesol, jatropha curcas, palme
  - Utilisable dans les moteurs Diesel jusqu'à 100 %. Peu de modifications nécessaires.
  - Filière nécessitant très peu de transformation → bon rendement énergétique
  - Nécessite une très bonne filtration pour ne pas encrasser le moteur
  - Solidification à basse température → nécessité d'un préchauffage du moteur
- Esters : biodiesel (ou diester)
  - Esters méthyliques et esters éthyliques d'huiles végétales (EMHV, EEHV)
  - Issus des huiles de colza ou de soja
  - Utilisable dans les moteurs Diesel, en mélange uniquement
  - Procédé de trans-estérification à partir de méthanol qui requiert de la chaleur pour accélérer la cinétique chimique
  - Bilan énergétique moins bon que l'HVB mais le biodiesel est plus facile à utiliser (viscosité plus faible, pas de solidification à basse température)

2. Agro-carburants

Filières

- Alcools : bio-éthanol
  - Éthanol, méthanol
  - Obtenus à partir de la fermentation de sucres (canne à sucre, betterave, blé, maïs)
  - Utilisable dans les moteurs à essence, en mélange (E85 à 85 %)
  - Très répandu au Brésil, mais aussi en Suède, au États-Unis d'Amérique...
  - Bilan énergétique quasi-nul en dehors de la filière brésilienne (canne à sucre)



- Autres filières en développement
  - Carburant à partir du bois (bioéthanol lignocellulosique)
  - Biomass-to-liquid (BtL) : par le procédé Fischer-Tropsch (à partir de cellulose : bois, paille, etc,)
  - Carburant à partir de micro-algues

2. Agro-carburants

Applications

- Essentiellement pour le transport
- Peuvent être utilisés pour faire fonctionner des moteurs thermiques, donc aussi des groupes électrogènes, des unités de cogénération etc.

Limites des agro-carburants actuels

- Concurrence d'usage des sols
- Distorsion de certains marchés par substitution des usages des produits agricoles : alimentation ou agro-carburant → envolée des prix (p. ex. crise de la tortilla au Mexique)
- Déforestation pour la plantation de plantes à usage énergétique (p. ex. en Malaisie et Indonésie pour la plantation de palmier à huile)
- Production intensive généralement non respectueuse de l'environnement
  - « bio-carburant » ≠ carburant issu de l'agriculture biologique !!!
  - Beaucoup d'intrants chimiques : engrais, pesticides → pollution des sols et des nappes phréatiques

3. Bio-gaz : C'est quoi ?

- Produit par la fermentation anaérobie de matière organique (méthanisation)
- Produit naturellement dans les marais, les décharges, stations d'épuration
- Composé essentiellement de méthane (2/3) et de CO_2 (1/3) (+ eau, HS_2 etc.)
- Gaz explosif, corrosif, toxique (et odorant)
- PCI = 9,42 * x_{CH4} kWh/Nm^3 (x_{CH4} : teneur en méthane)

Intérêt

- Permet la valorisation de :
  - Déchets ménagers et boues d'épuration
  - Déchets agricoles (déchets végétaux, lisier, purin, fumier)
  - Déchets industriel (papeterie, huilerie, sucrerie, brasserie, abattoir, brasserie, etc.)
- Réduire les émissions de méthane par captage et combustion (conversion en CO_2 + eau) → réduction du Potentiel de Réchauffement Global (PRG) résultant car :
  - $PRG_{20}(CH_4) = 62 \times PRG_{20}(CO_2)$
  - $PRG_{100}(CH_4) = 23 \times PRG_{100}(CO_2)$

3. Bio-gaz : C'est quoi ?

Production

- Si production spontanée (décharge), il suffit de capter le gaz par des drains
- Sinon, production dans un « digesteur »
  - Matière organique broyée maintenue dans une enceinte fermée généralement chauffée (entre 20 et 60°C) et brassée
- Processus bactérien
  1) Hydrolyse (décomposition en molécules simples)
  2) Fermentation (production d'acides et d'alcools + H_2 et CO_2)
  3) Formation d'acide acétique (CH_3COOH) puis de méthane (CH_4)

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$$

- Production de 500 Nm^3 de biogaz par tonne de matière organique fermentescible
- Sous produit : digestat utilisable comme compost
- Stockage du biogaz à pression ambiante dans un gazomètre mais capacité limitée : il faut utiliser le biogaz au fur et à mesure de sa production →
  - Injection sur un réseau de distribution
  - Consommation sur place pour production d'électricité ou de chaleur

3. Bio-gaz : C'est quoi ?

Production

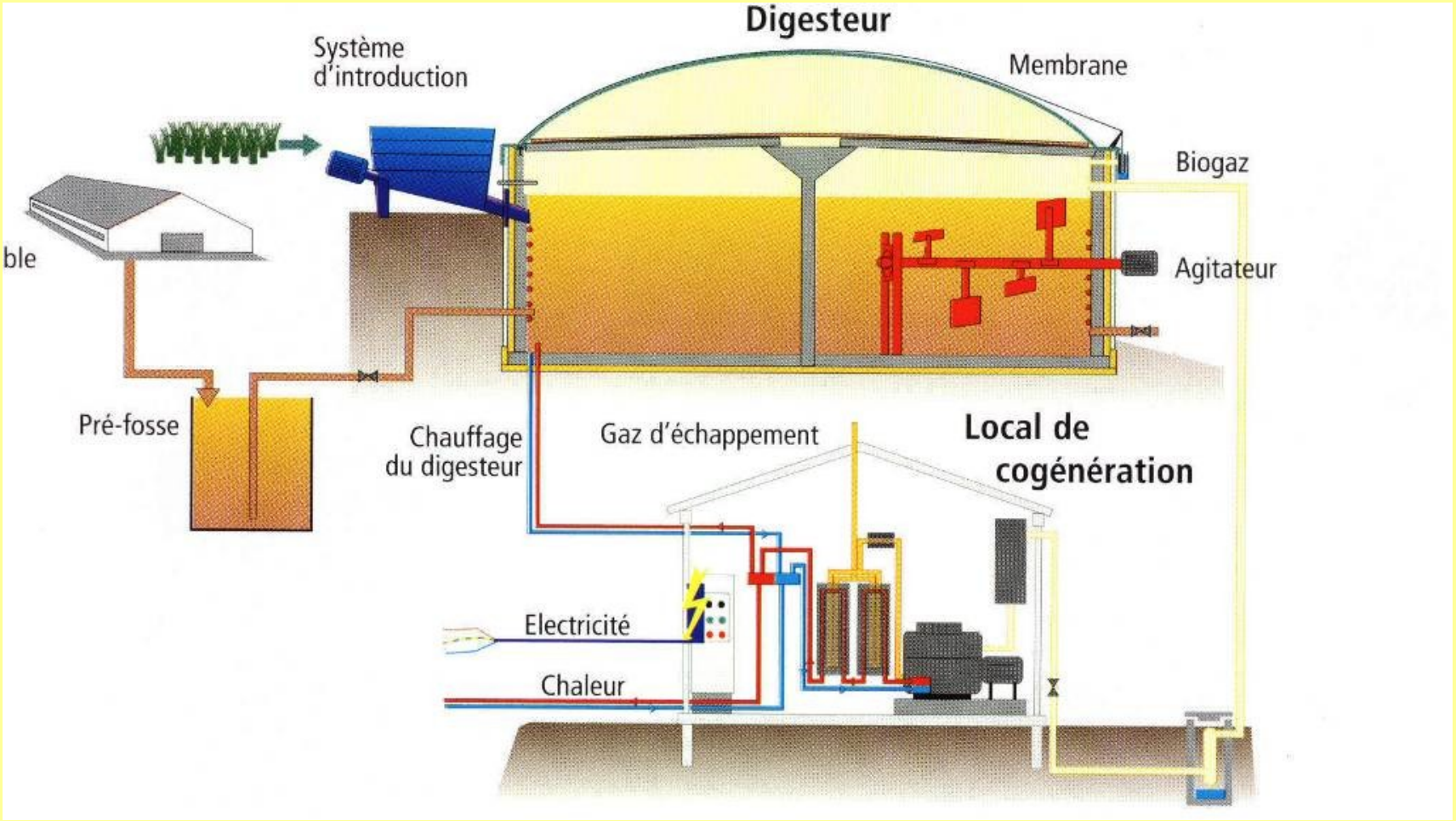


Schéma : AgriKomp France

Énergie de la biomasse et cogénération - CNAM – Module « Intégration des énergies renouvelables au bâti » - 2009 - S. Thiers

3. Bio-gaz : Applications

Production de chaleur

- pour l'agriculture ou l'industrie (besoin permanent)

Production d'électricité

- Groupes électrogènes nécessitant mélange avec 10 % de fioul pour un meilleur allumage
- Cogénération possible et même souhaitable pour récupérer la chaleur nécessaire au fonctionnement du digesteur

Carburant pour le transport

- Nécessite une épuration préalable (Suède, Nouvelle-Zélande)
- Même utilisation que du GNV (gaz naturel pour véhicules)

Conclusions partie biomasse

Solutions retenues pour l'habitat

- Pour le chauffage en logement individuel ou collectif
  - Bois-énergie sous différentes formes (bûches, plaquettes, granulés)
  - Autre combustible solide (paille, tourteau de colza, etc.)

- Pour la cogénération (chaleur + électricité) (encore peu répandue)
  - Bois-énergie
  - Agrocarburant: huile brute ou autre
  - Bio-gaz

- Chaudière à biomasse pour réseau de chaleur

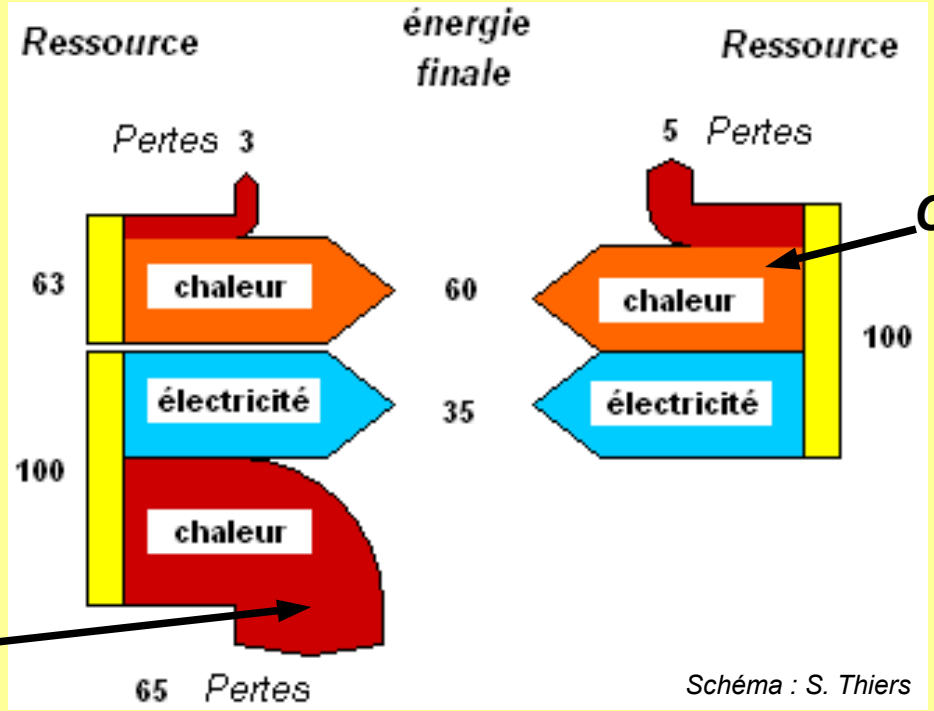
4. Cogénération : Principe

- **Valorisation de la chaleur dans un processus de production d'électricité**

Exemple

Production séparée ***Cogénération***

Chaudière séparée

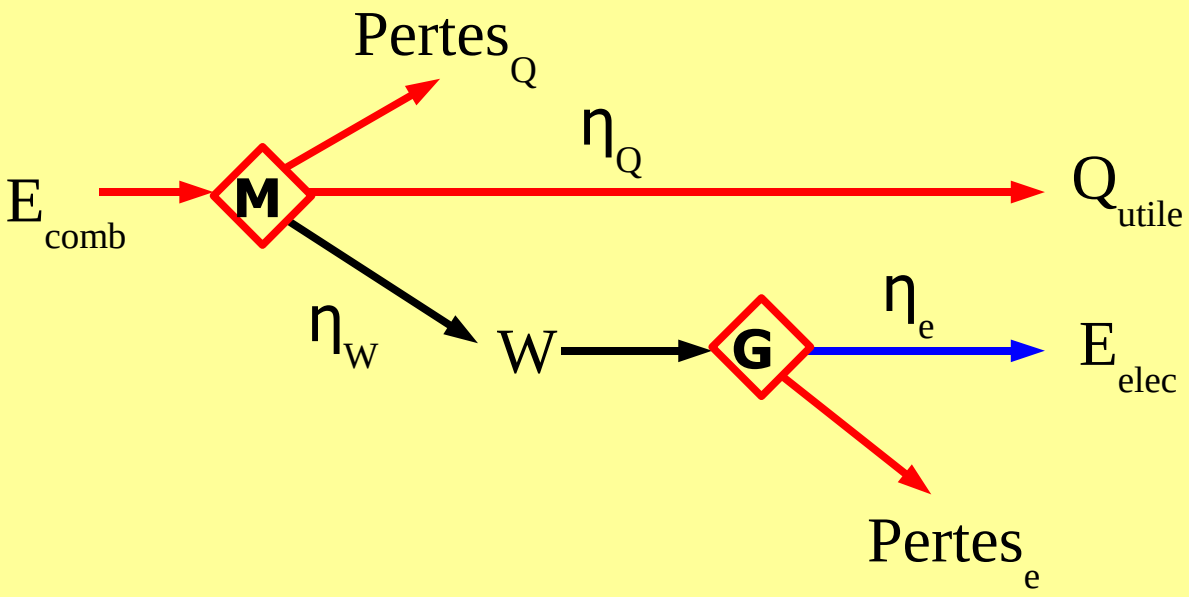


Chaleur valorisée

Chaleur perdue

- Valorisation de l'énergie primaire : 95/163 = **58 %** 95/100 = **95 %** → efficacité meilleure

4. Cogénération : Principe



- Chaleur récupérée $Q_{utile} = E_{comb} \cdot \eta_Q$
- Travail mécanique produit $W = E_{comb} \cdot \eta_W$

- Électricité produite $E_{elec} = W \cdot \eta_e = E_{comb} \cdot (\eta_W \cdot \eta_e)$

- Bilan énergétique $E_{elec} + Q_{utile} + Pertes_{totales} = E_{comb}$

4. Cogénération : Principe

- **Base = système électrogène**
- **Source d'énergie**
  - Tout type de combustible : carburant, gaz naturel, bois, agro-carburant, biogaz, etc.
  - Éventuellement énergie solaire
- **Spécificité**
  - Récupération de la chaleur résiduelle puis valorisation
    - Chauffage bâtiment, serre, etc.
    - Production d'eau chaude sanitaire
    - Utilisation pour procédé industriel, séchage
- **Gamme de puissance**
  - Grande cogénération : > 12 MWe (industrie, chauffage urbain)
  - Moyenne cogénération : entre 1 et 12 MWe (industrie, grosse infrastructure)
  - Petite cogénération : entre 215 et 1000 kWe (gros bâtiment, clinique)
  - Mini-cogénération : entre 20 et 215 kWe (logement collectif)
  - Micro-cogénération : < 20 kWe (maison individuelle)

4. Cogénération : solutions techniques

Moteur à combustion interne

- Technologie bien maîtrisée
- Cycle Diesel ou Otto
- Très répandu sur les bâtiments
- Gamme de puissance : de quelques kWe à 7 MWe
- Carburants utilisés : Diesel, Biodiesel, Gaz naturel, Propane, GPL, Biogaz (avec moteur « dual fuel »), Huile végétale brute
- Récupération de chaleur sur :
  - Gaz d'échappement (300-400 °C) 30% de récupération
  - Bloc moteur (80-105 °C) 20 % de récupération
  - Huile de refroidissement 15 % de récupération
- Maintenance régulière nécessaire
- Efficacité électrique (PCI) : 30 à 40 %
- Efficacité globale (PCI) : 60 à 80 %

4. Cogénération : solutions techniques

Turbine à gaz

- Technologie bien maîtrisée
- Cycle de Brayton (ou de Joule)
- Peu répandue sur les bâtiments
- Gamme de puissance : de 30 kWe à 100 MWe
- Carburants utilisés : Gaz naturel, Biogaz
- Récupération de chaleur sur les gaz d'échappement (cycle ouvert)
- Sensibilité aux particules qui usent les pales de la turbine
- Efficacité électrique (PCI) : 25 à 35 %
- Efficacité globale (PCI) : 60 à 80 %

4. Cogénération : solutions techniques

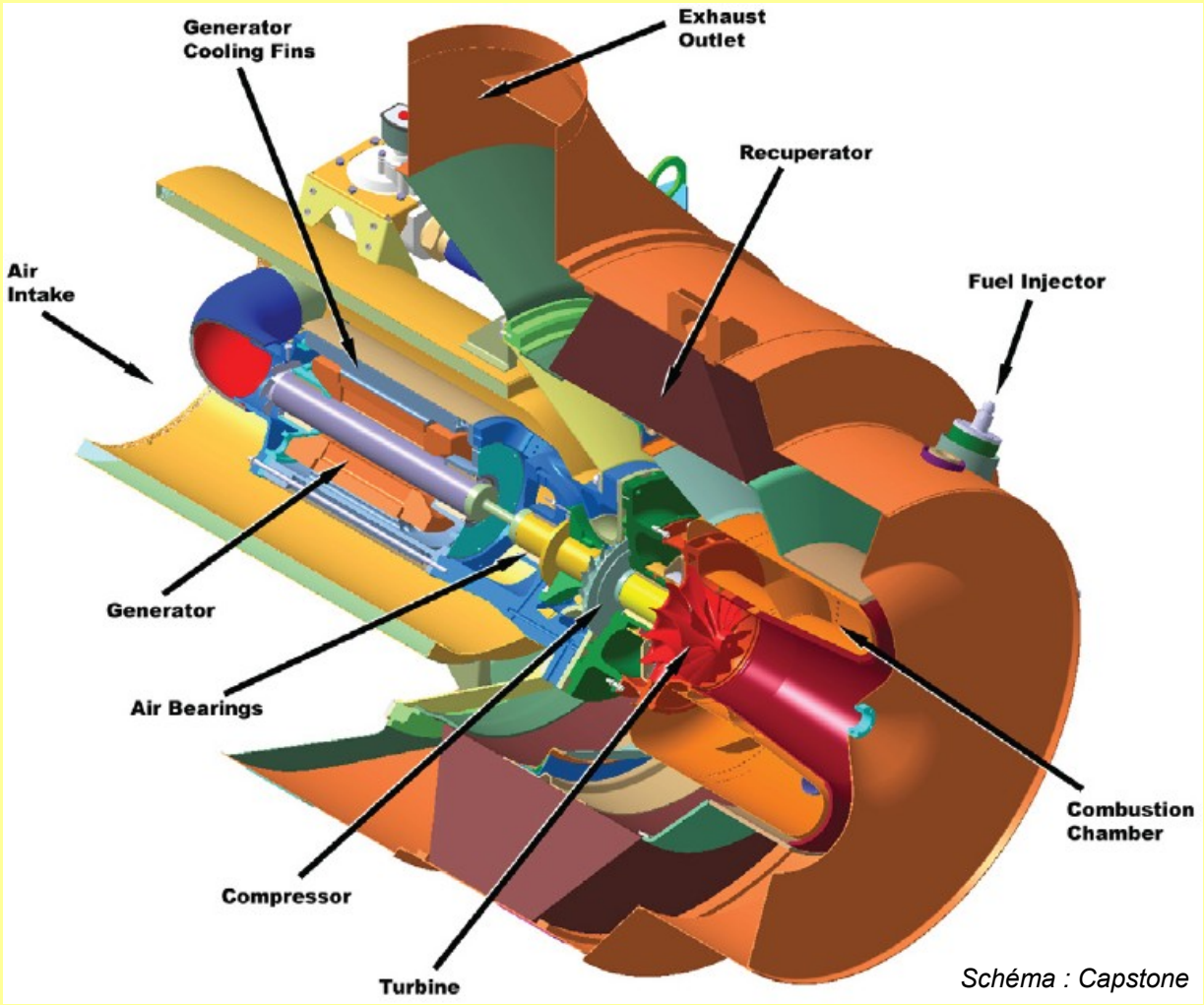
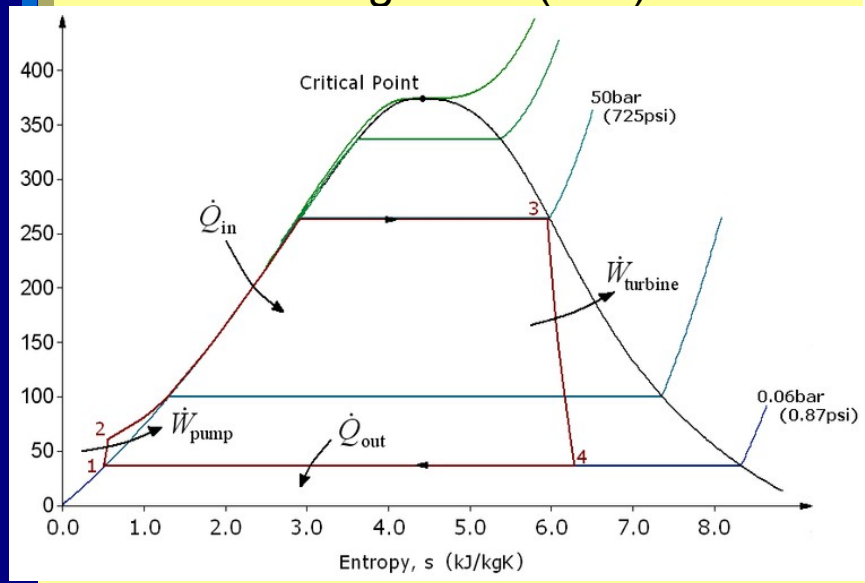
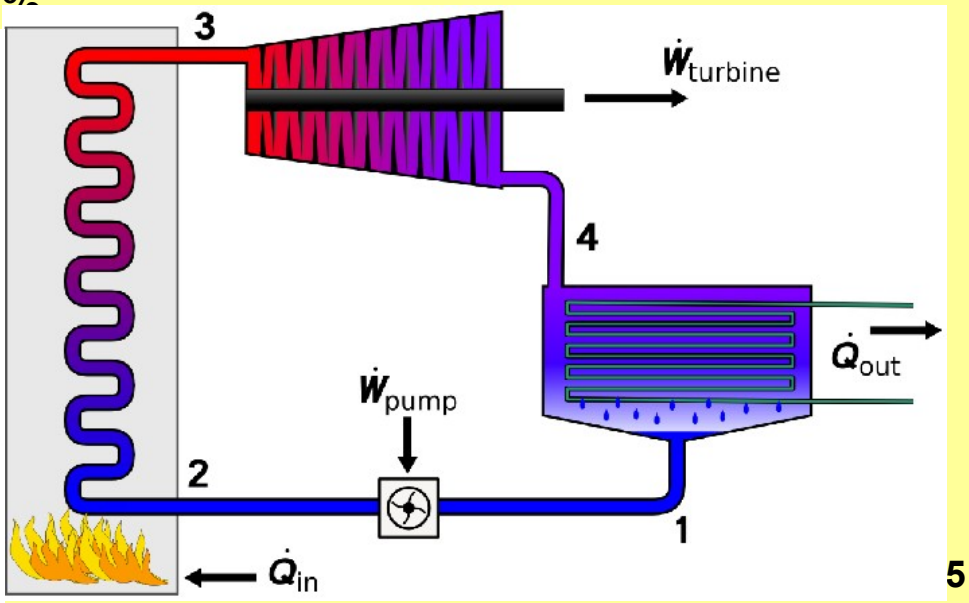


Schéma : Capstone

4. Cogénération : solutions techniques

- **Turbine à vapeur (fluide = eau)**
  - Technologie bien maîtrisée
  - Cycle de Rankine
  - Combustible utilisé : théoriquement tout type
  - Gamme de puissance : de 1 MW_e à 10 MW_e
  - Utilisé sur de gros bâtiments (hôpital, complexe immobilier, réseau de chaleur)
  - Récupération de chaleur au condenseur en sortie de turbine
  - Efficacité électrique (PCI) : 25 à 35 % (bon rendement à charge partielle)
  - Efficacité globale (PCI) : 60 à 80 %





4. Cogénération : solutions techniques

Moteur à vapeur/Machine à vapeur

- Principe analogue à la turbine à vapeur (cycle de Rankine)
- Pistons au lieu de la turbine
- Gamme de puissance : de 1 kW_e à 2 Mw_e
- Combustible utilisé : théoriquement tout type
- Utilisé sur de gros bâtiments (hôpital, complexe immobilier)
- Développement en micro-cogénération pour maison individuelle à partir de gaz naturel et propane (Moteur linéaire Linator® d'OTAG)
- Efficacité électrique (PCI) : 18 %

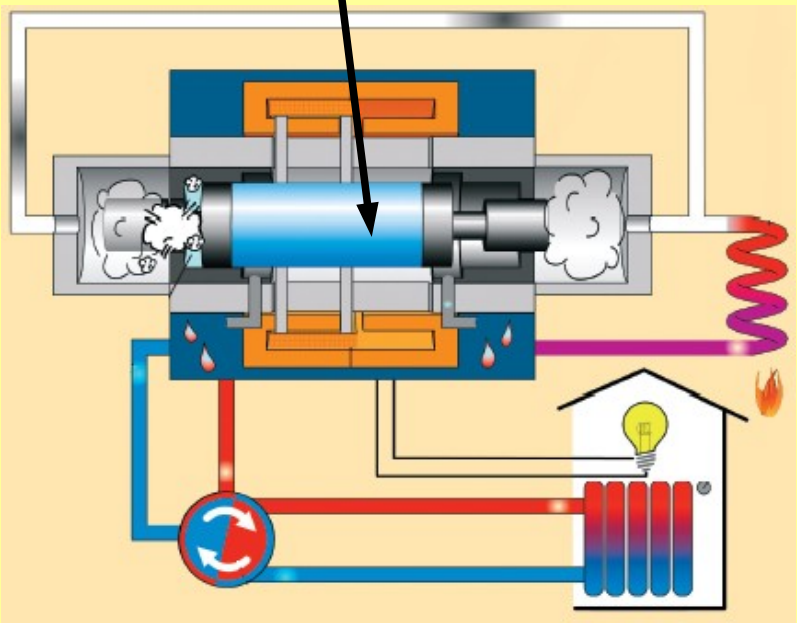


Schéma : OTAG

4. Cogénération : solutions techniques

Turbine à vapeur à cycle de Rankine organique (ORC)

- Technologie *en développement : très peu de réalisations*
- Fluide : alcane, alcool, autre fluide caloporteur, à optimiser selon usage
- Gamme de puissance : de 1 kW_e à 2 MW_e
- Permet de valoriser de la chaleur à des températures plus basses : aux alentour de 150/200°C
- Combustible utilisé : théoriquement tout type
- Efficacité électrique (PCI) : 8 à 10 %
- Efficacité globale (PCI) : 80 à 90 %

4. Cogénération : solutions techniques

Moteurs à combustion externe

- En cours de développement pour mini et micro-cogénération
- Avantage : accepte tous les types de combustibles (GN, bois, soleil)
- Deux solutions : Moteur Stirling ou Moteur Ericsson
- **Moteur Stirling** = moteur à cycle fermé
  - Fluide = hydrogène, hélium ou azote
  - Rendements : 20 à 30 %

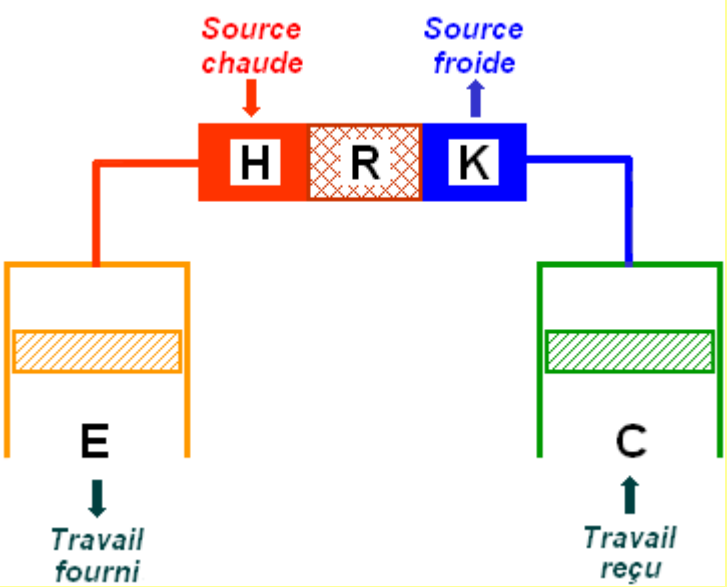


Schéma : S. Thiers, d'après Stouffs et al.

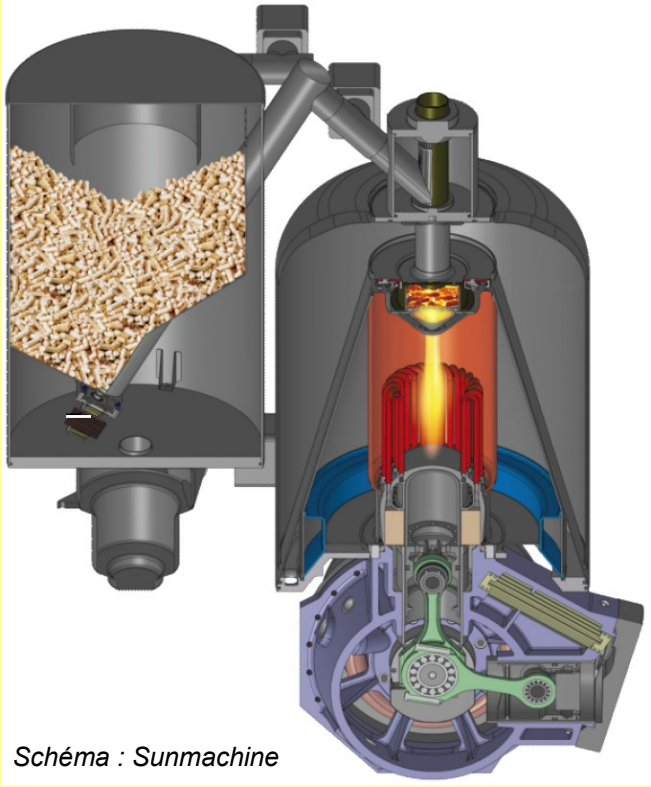


Schéma : Sunmachine

4. Cogénération : solutions techniques

- Récupération de chaleur sur le bloc moteur et sur les fumées
- Intérêt du Stirling : peu de bruit, bonne durée de vie

Moteur Ericsson

- Principe analogue au moteur Stirling, mais cycle de Ericsson
- Utilisation de soupapes pour réguler le cycle
- Théoriquement plus performant que le moteur Stirling
- Pratiquement plus complexe à mettre en œuvre et pas de réalisation concrète

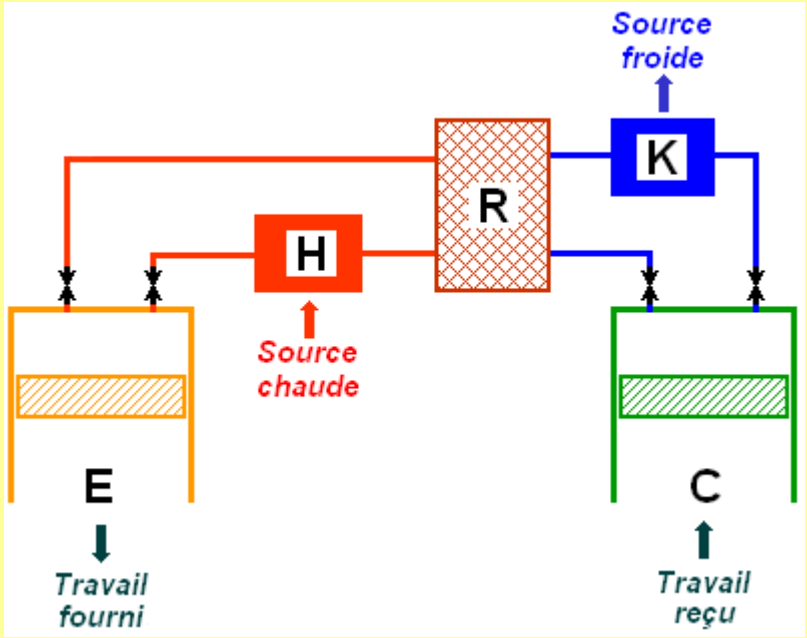
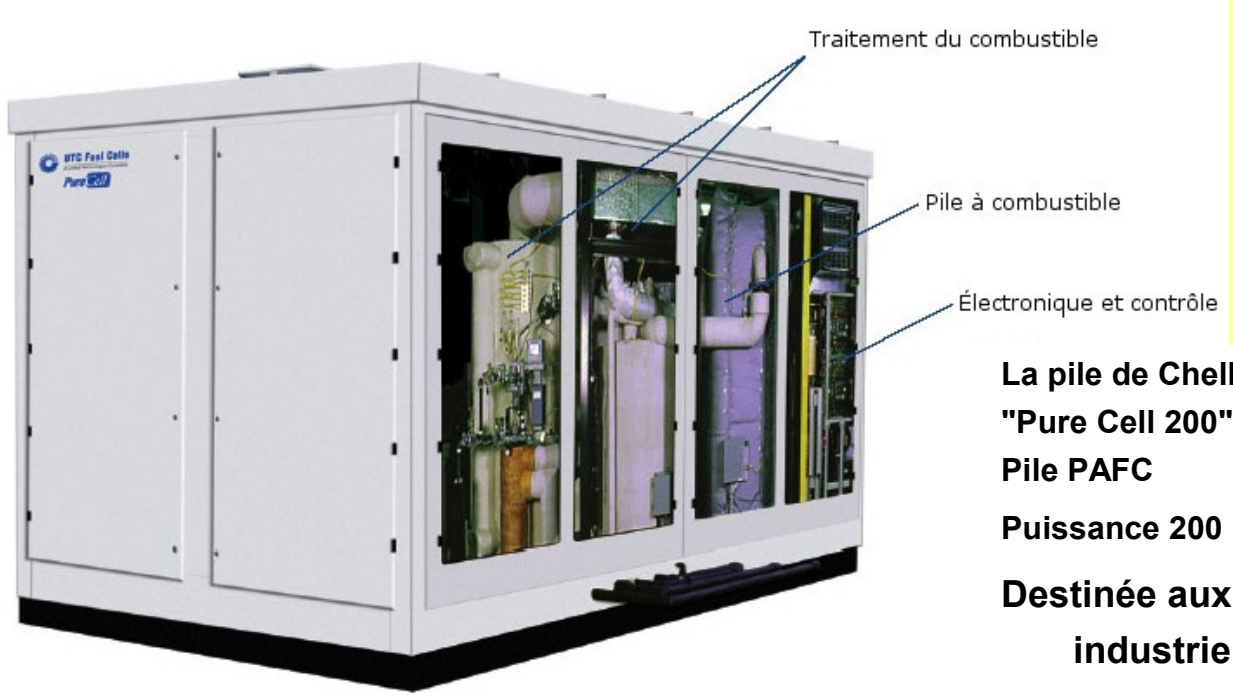


Schéma : S. Thiers, d'après Stouffs et al.

4. Cogénération : solutions techniques

Pile à combustible

- Système commercialisé mais encore en développement
- Analogue à une pile électrochimique mais fonctionnant à partir de couple redox gazeux (p. ex. dioxygène/dihydrogène)
- Sur les piles fonctionnant à moyenne et haute température (PAFC, SOFC, MCFC) (T>200 °C), la cogénération est très intéressante
- Rendement électrique élevé (30 % à 40 %) mais pertes dues aux auxilliaires
- Technologie encore chère et peu fiable



La pile de Chelles (77)
"Pure Cell 200" d'UTC Fuel Cell
Pile PAFC
Puissance 200 kW_e et 271 kW_{th}
Destinée aux bâtiments collectifs, industriels, hôpitaux, etc.

4. Cogénération : micro-cogénération pour l'habitat

Limitations actuelles

- Démarrage long
- Auto-consommation non négligeable
- Un bon dimensionnement est nécessaire pour optimiser les performances globales et amortir l'investissement
- Couplage à un ballon de stockage pour lisser les pics
- Fiabilité selon niveau de maturité de la technologie
- Faible retour d'expérience
- Prix des équipements très élevés ; marché et offre encore minuscules
- Freins administratifs dus au couplage au réseau électrique + vente
- Pour les bâtiments à faible besoins, systèmes surdimensionnés si maison individuelle, mieux adapté si logement collectif performant.

Ecopower

WhisperGen

Aspects réglementaires pour l'habitât

Biomasse

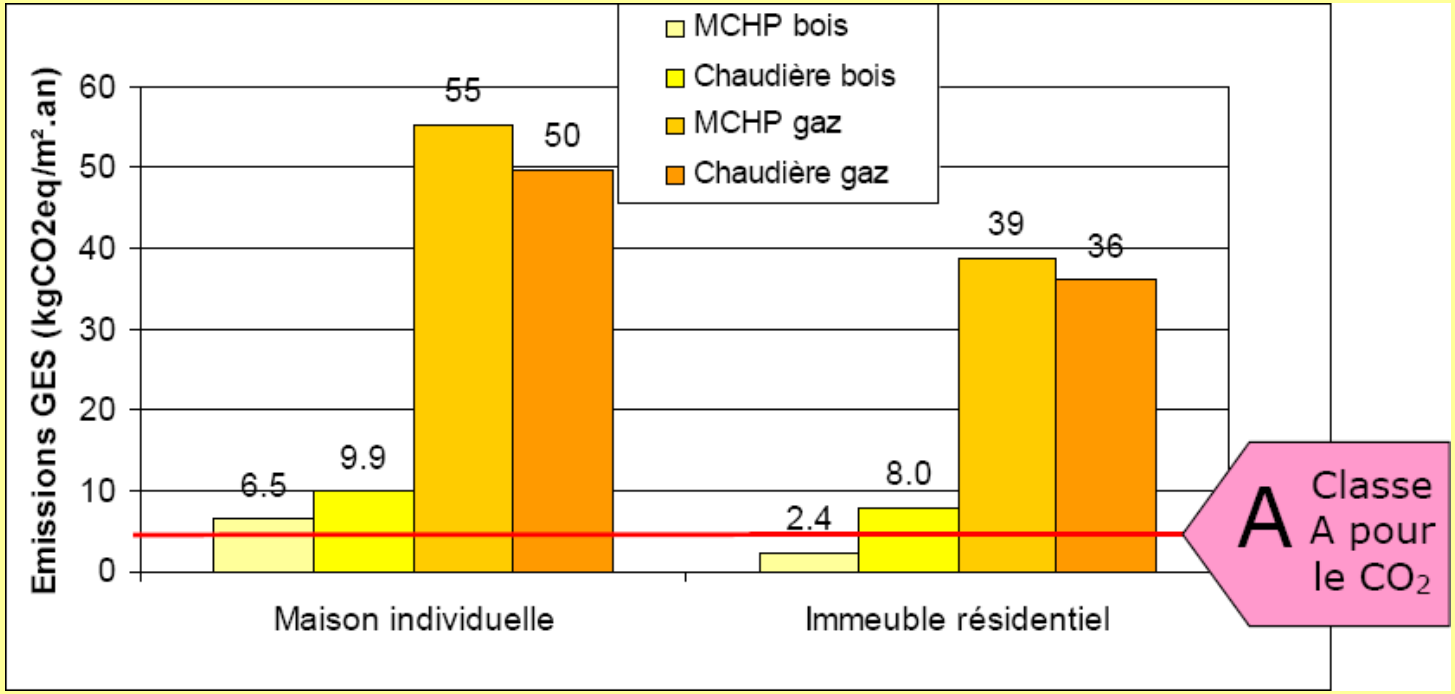
- Obligation de mise en place de conduits de cheminée dans les nouvelles constructions *(Arrêté du 31 octobre 2005 relatif aux dispositions techniques pour le choix et le remplacement de l'énergie des maisons individuelles)*
- Crédit d'impôt pour les cheminées fermées, poêle, chaudière selon niveau de performance

Cogénération

- Pas d'aide à l'achat du matériel
- Pas de tarif d'achat préférentiel de l'électricité produite

Aspects environnementaux

- Intérêt de l'usage du bois : Neutre du point de vue CO_2 si la ressource n'est pas surexploitée (repousse des arbres)



Etude AMOES

- Risque : émissions de fumées et de polluants si combustion mal maîtrisée
  - Proposition d'interdiction des poêles anciens au Canada
  - Faibles émissions polluantes sur le matériel récent

Aspects environnementaux

- La cogénération améliore la valorisation du combustible.
- Réduction des impacts sur l'environnement par l'utilisation d'un combustible renouvelable
  - PRG_{100} granulé bois = 4,44 kg eq. CO_2/GJ PCS
  - PRG_{100} élec chauffage = 124 kg eq. CO_2/GJ

Bibliographie

- *Guide des énergies renouvelables*, P. Piro, Terre vivante, 2006,
- *Les énergies renouvelables*, J. Vernier, PUF, 1997
- *Système solaires*, n° 188, nov-dec 2008
- *Traité de génie civil, vol 21 : Systèmes énergétiques*, G. Sarlos, P.-A. Haldi, P. Verstraete, PPUR, 2003
- *Gazéification de charbon de bois à la vapeur d'eau : de la particule isolée au lit fixe continu*, Thèse de doctorat, F. Mermoud, INPT, 2006
- *La méthanisation « à la ferme »*, document SOLAGRO
- *Impact de la micro-cogénération à bois sur l'effet de serre*, rapport AMOES, 2006
- *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*, Thèse de doctorat, S. Thiers, MINES ParisTech, 2008
- *Micro-cogénération pour les bâtiments résidentiels fonctionnant avec des énergies renouvelables*, Thèse de doctorat, B. Aoun, MINES ParisTech, 2008