

# Etudes et projets de chauffage automatiques au bois

Energies renouvelables



## Etudes et projets de chauffages automatiques au bois

Le bois couvre aujourd'hui en Suisse environ 1,6 % de la consommation totale d'énergie, et 3 % de la production de chaleur. Le potentiel existant permettrait de doubler, voire de tripler, la consommation de bois énergie. Le combustible renouvelable qu'est le bois pourrait ainsi apporter une contribution substantielle à la substitution des combustibles fossiles tout en concourant en même temps de façon essentielle à l'atteinte des objectifs d'Énergie 2000.

Cependant, toute augmentation de l'utilisation de l'énergie du bois pose comme condition préalable que l'on puisse compter sur une filière d'approvisionnement organisée pour le bois énergie. De plus, il faut disposer d'installations de chauffage permettant une utilisation du bois efficace et sans émissions de substances dangereuses, concurrentielles au plan économique.

Les chauffages automatiques au bois constituent une solution appropriée pour tirer profit de l'agent énergétique bois dans un contexte technologique avancé. Lors de l'étude d'installations de cette nature, il faut tenir compte tant des besoins des consommateurs de chaleur et que de ceux des exploitants des installations, tout comme des conditions cadres imposées à l'approvisionnement en bois. L'étude des chauffages automatiques au bois exige ainsi la mise à contribution du fournisseur de bois, du maître d'ouvrage, de l'architecte, des autorités et du fournisseur de l'installation. C'est au planificateur qu'il incombe de satisfaire les différents besoins et de réaliser la conception appropriée tenant compte des circonstances du cas d'espèce.

Cette documentation s'adresse aux planificateurs de chauffage ainsi qu'aux collaboratrices et collaborateurs du bureau d'étude dans les domaines de la technique du bâtiment et de l'énergie. Le cours PACER du même nom donne les principes fondamentaux de l'étude des chauffages automatiques au bois et présente les principaux éléments constitutifs des installations. Le centre de gravité de la documentation est constitué par les chauffages automatiques au bois dans la plage de puissance de 100 kW à 5 MW, avec la présentation aussi bien des installations dont le combustible provient de la forêt que de celles utilisant les sous-produits de la transformation du bois. Sont également décrits les chaînes d'approvisionnement, les catégories de combustibles et les modes de décompte. Les prescriptions essentielles, en particulier celles de l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) ainsi que celles en matière de sécurité et de protection contre l'incendie sont expliquées par le détail ainsi que le déroulement de la planification de l'avant-projet à l'exécution et la mise en service des équipements.

Ce travail tient compte des connaissances acquises au cours de ces dernières années en mettant en relief les développements les plus récents. Les coûts des installations complètes font l'objet d'exemples concrets, et l'influence des facteurs de coût les plus importants est rendue plus évidente par le biais d'analyses de sensibilité.

# Etudes et projets de chauffages automatiques au bois

Association de soutien

ASEB Association suisse pour l'énergie du bois

Patronage

INFOENERGIE

FSIB Association des fabricants suisses et importateurs de systèmes de chauffage au bois

SBHI Schweizerische beratende Haustechnik und Energie-Ingenieure  
Ingénieurs-conseils suisses de la technique du bâtiment et de l'énergie

SICC Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation

ASEC Association suisse des entreprises de chauffage et ventilation

Traduction et adaptation de la version française

- Christian du Jonchay, PICS SERVICES SA, Genève
- Philippe Steinmann, Xylon SA, Genève
- André Corthay, ASEB, Le Mont s/Lausanne

Correcteur

' J.-C. Scheder, Bercher

Mise en pages, photocomposition et flashage

- DAC, Lausanne et
- City Comp SA, Morges

Coordinateur pour la direction de PACER

- Dr Arthur Wellinger, INFOENERGIE, Ettenhausen

Rédaction

- Dr Thomas Nussbaumer, Verenum, Zurich
- Dr Jürgen Good, Verenum, Zurich

Auteurs

*Chapitres 1, 2*

- Dr Thomas Nussbaumer, Verenum, Zurich
- Dr Jürgen Good, Verenum, Zurich

*Chapitres 3, 4, 8*

*Exemples*

- Andreas Jenni, IEU AG, Liestal

*Chapitres 5, 6, 7*

*Exemples*

- Peter Koch, Huwyler & Koch, Zurich

*Chapitre 1*

- Christoph Rutschmann, ASEB, Zurich
- Philippe Steinmann, Xylon SA, Genève

*Exemples*

- Fred Schneider, Schneider & Aebi, Soleure

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, 1995.

Reproduction d'extraits autorisée moyennant l'indication de la source.

A commander à l'Office central fédéral des imprimés et du matériel, 3000 Berne (N° de commande 724.237 f).

# Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le Programme d'action « Construction et Energie » se compose des trois programmes d'impulsions suivants :

PI BAT – Entretien et rénovation des constructions  
RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité  
PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Ils doivent favoriser une croissance économique qualitative et, par là, conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Jusqu'ici, si l'on fait abstraction du potentiel hydro-électrique, la contribution des énergies renouvelables à notre bilan énergétique est négligeable. Aussi le programme PACER a-t-il été mis sur pied afin de remédier à cette situation. Dans ce but le programme cherche :

- à favoriser les applications dont le rapport prix/performance est le plus intéressant ;
- à apporter les connaissances nécessaires aux ingénieurs, aux architectes et aux installateurs ;
- à proposer une approche économique nouvelle qui prenne en compte les coûts externes ;
- à informer les autorités, ainsi que les maîtres de l'ouvrage.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Le programme PACER se consacre, en priorité, à la formation continue et à l'information. Le transfert de connaissances est basé sur les besoins de la pratique. Il s'appuie essentiellement sur des publications, des cours et d'autres manifestations. Les ingénieurs, architectes, installateurs, ainsi que les représentants de certaines branches spécialisées, en constituent le public cible. La diffusion plus large d'informations plus générales est également un élément important du programme. Elle vise les maîtres de l'ouvrage, les architectes, les ingénieurs et les autorités.

Le bulletin « Construction et Energie », qui paraît trois fois par an, fournit tous les détails sur ces activités. Ce bulletin peut être obtenu gratuitement sur simple demande. Chaque participant à un cours ou autre manifestation du programme reçoit une publi-

cation spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie » EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

## Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés ; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont également les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités. Pour la préparation de ces activités une direction de programme a été mise en place ; elle se compose du Dr Jean-Bernard Gay, du Dr Charles Filleux, de M. Jean Graf, du Dr Arthur Wellinger ainsi que de Mme Irène Wuillemin et de M. Eric Mosimann de l'OFQC. La préparation des différentes activités se fait au travers de groupes de travail, ceux-ci sont responsables du contenu de même que du maintien des délais et des budgets.

## Documentation

Il convient d'ajuster les unes aux autres les différentes tâches relevant respectivement du maître d'ouvrage, de l'architecte, du fournisseur de bois, des autorités et du fabricant des équipements de chauffage. Le planificateur joue ainsi un rôle central en sa qualité d'intermédiaire et de coordinateur.

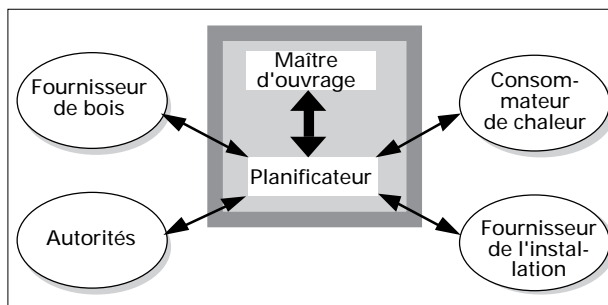
Cette étude sur la réalisation de chauffages automatiques au bois s'adresse aux planificateurs en chauffage ainsi qu'aux propriétaires et collaborateurs de bureaux d'étude dans le domaine de la technique du bâtiment et de l'énergie. Le cours PACER du même nom expose les fondements de l'étude des chauffages automatiques au bois et présente les principaux composants des installations. La partie centrale du cours traite des chauffages automatiques au bois d'une puissance de 100 kW à 5 MW ainsi que des installations brûlant des sous-produits forestiers, avec des indications utiles à l'emploi des sous-produits résultant de la transformation du bois. Les variantes de construction des

équipements de stockage (silos), d'alimentation, de transport, de combustion, de traitement des gaz de fumées et de régulation sont présentées avec leurs avantages et leurs inconvénients. S'y ajoute la description des chaînes d'approvisionnement en bois énergie, la caractérisation des assortiments de combustible et la discussion des modes de facturation de l'agent énergétique bois. Enfin les principales prescriptions, dont celles de l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) ainsi que les dispositions en matière de sécurité et de protection contre l'incendie sont passées en revue en insistant sur leur importance pour l'étude des chauffages automatiques au bois.

La documentation comprend le déroulement complet de la planification de l'avant-projet à son exécution et à l'exploitation de l'installation, en passant par la planification de détail. Les expériences faites avec des équipements déjà réalisés permettent d'apprécier les coûts de chacun des composants et de l'ensemble de l'installation, par une analyse de sensibilité des différents facteurs de coûts. Il apparaît que les coûts d'investissement sont influencés avant tout par la conception des équipements et par la dimension du silo de combustible. Ces données tiennent compte des connaissances acquises au cours de ces dernières années et reposent sur les développements les plus récents appelés à s'imposer dans les années à venir.

La présente documentation remplace la partie consacrée aux chauffages automatiques au bois de la publication «Chauffages centraux au bois» du Programme d'impulsions consacré aux installations du bâtiment, 1989. Nous avons renoncé à inclure les chauffages au bois à chargement manuel, étant donné que le déroulement de l'étude et le public cible sont notablement différents qu'il s'agisse de chauffages à chargement manuel ou de chauffages automatiques. Cette publication complète la documentation PACER «Energie tirée des sous-produits de transformation de bois», 1994, qui s'adresse aux exploitants de chauffages au bois engagés dans la filière industrielle du bois.

La table des matières est conçue de manière à renseigner rapidement sur la structure de la documentation en mentionnant les chapitres principaux et leurs sous-chapitres. Afin que cette documentation puisse servir d'ouvrage de référence, le contenu détaillé de chaque chapitre est présenté dans la table des matières placée au début des chapitres et des annexes.



Ce document a été soigneusement révisé au terme d'une procédure de consultation et d'un essai d'application lors d'une manifestation pilote en langue allemande. Les auteurs ont toutefois eu entière liberté d'évaluer et de prendre en compte des points de vue différents sur certaines questions selon leur propre appréciation. Ils sont donc également responsables du texte. Il sera possible de remédier aux insuffisances qui se feraient jour lors des applications pratiques à l'occasion d'une éventuelle révision. L'Office fédéral des questions conjoncturelles, le rédacteur ou le chef de cours responsable reçoivent les suggestions qui seraient formulées.

Nous adressons ici nos remerciements à tous les intervenants qui ont rendu cette publication possible.

Office fédéral des questions conjoncturelles  
Service de la technologie  
Dr B. Hotz-Hart  
Vice-directeur

# Table des matières

---

1.	Bois énergie	7
1.1	Sources et potentiel	9
1.2	Promotion de l'énergie du bois	11
1.3	Arguments en faveur de l'énergie du bois	12
1.4	Chaînes d'approvisionnement	13
1.5	Teneur en eau et humidité du bois	17
1.6	Classification du bois énergie	18
1.7	Contenu énergétique	19
1.8	Facturation du bois énergie	21
1.9	OPair 92 et autres ordonnances	23

---

2.	Production de chaleur	25
2.1	Processus de combustion du bois à l'état naturel	27
2.2	Sous-produits de transformation	32
2.3	Aperçu des bois de chauffage et autres combustibles bois d'après l'OPair 92	34
2.4	Technique de chauffage	35
2.5	Régulation des chauffages automatiques au bois	38
2.6	Epuration des gaz de combustion	41
2.7	Valeurs caractéristiques d'émission	45
2.8	Rendement annuel de combustion de la chaudière	46

---

3.	Systèmes	49
3.1	Installations de production de chaleur et composants auxiliaires	51
3.2	Réseaux thermiques	62

---

4.	Composants	65
4.1	Chargement des silos, des halles de stockage et systèmes d'extraction	67
4.2	Convoyeurs	79
4.3	Systèmes de foyer	82
4.4	Critères de sélection du système de foyer	86

---

5.	Etudes préalables et avant-projet	87
5.1	Avantages et contraintes du bois énergie	89
5.2	Bois forestier et sous-produits de la transformation du bois: les différences	91
5.3	Déroulement de l'étude préalable et de l'avant-projet	93
5.4	Données de base	97
5.5	Conception globale	99
5.6	Estimation globale des coûts	102
5.7	Comparaison des variantes	103

---

---

6.	Projet de détail	107
6.1	Déroulement et organisation du projet	109
6.2	Dimensionnement et choix du chauffage	112
6.3	Disposition et choix du stockage du combustible	116
6.4	Conseils pour la conduite d'un projet de silo	118
6.5	Raccordement hydraulique	120
6.6	Commande et régulation	122
6.7	Dispositifs de sécurité pour l'installation, la chaufferie et le silo	124

---

7.	Exécution du projet	131
7.1	Point critiques de la réalisation	133
7.2	Préparation à la mise en service	134
7.3	Préparation de la réception de l'installation	135
7.4	Instruction et documentation pour l'exploitant de l'installation	136

---

8.	Exploitation	139
8.1	Utilisation et exploitation	141
8.2	Contrat de service	145

---

9.	Annexes	147
A1	Exemples	147
A2	Limites fixées par l'OPair pour les bois de chauffage	172
A3	Calcul du rendement annuel $\eta_a$	173
A4	Calcul du débit massique d'oxyde d'azote	175
A5	Modèles à copier	177
A6	Appel d'offres FSIB	180
A7	Bibliographie	190
A8	Prescriptions et ordonnances	191
A9	Adresses importantes	192

---

	Publications et vidéos du Programme d'action PACER	195
--	--	-----

---



---

# 1. Bois énergie

---

1.1	Sources et potentiel	9
1.2	Promotion de l'énergie du bois	11
1.3	Arguments en faveur de l'énergie du bois	12
1.4	Chaînes d'approvisionnement	13
	Sous-produits forestiers	13
	Bois énergie à l'état naturel provenant de la filière bois	16
	Sous-produits du bois de transformation	16
1.5	Teneur en eau et humidité du bois	17
1.6	Classification du bois énergie	18
	Classification pour la vente	18
	Classification pour la technique des installations	18
1.7	Contenu énergétique	19
1.8	Facturation du bois énergie	21
1.9	OPair 92 et autres ordonnances	23
	Ordonnance sur la protection de l'air OPair 92	

---

# 1. Bois énergie

## 1.1 Sources et potentiel

Pendant des millénaires, le bois a été la seule source d'énergie de l'homme. Ce n'est qu'avec l'industrialisation qu'il a été remplacé, d'abord par le charbon, puis par le pétrole et le gaz. Aujourd'hui, le bois ne joue plus aucun rôle central dans les pays industrialisés. En Suisse, il couvre encore 1,6% de la consommation totale d'énergie et un bon 3% des besoins en énergie thermique. Pendant ces dernières années, les diverses crises du pétrole, les discussions sur l'écocompatibilité et le caractère non inépuisable des ressources naturelles ont redonné un essor au bois en tant qu'agent énergétique. Certaines notions parues tout récemment dans la discussion, certains mots clés tels que la problématique du CO<sub>2</sub>, l'effet de serre, l'énergie grise, les risques technologiques, les bilans écologiques, etc., en relation avec la nouvelle politique énergétique de la Confédération (programme d'action Energie 2000) et de divers cantons ont ramené le bois au centre de la discussion portant sur un approvisionnement énergétique différencié et aussi autonome que possible.

Le bois énergie entrant en considération pour les chauffages au bois peut se répartir en différentes catégories :

- Sous-produits forestiers :  
Près de 60% du prélèvement annuel sur la forêt suisse vont aux scieries sous forme de grumes, 17% sont consacrés à la fabrication de papier, de cellulose et de panneaux de particules, 19% de futaie ne peuvent être utilisés que comme bois énergie.
- Bois naturel provenant de la filière du bois :  
Les sous-produits du bois non traités proviennent essentiellement du premier échelon de la filière bois (scieries) et partiellement du deuxième échelon.
- Sous-produits de bois de l'industrie et de l'artisanat ainsi que des chantiers :  
Les sous-produits de bois provenant du deuxième échelon de la filière bois (menuiseries, fabrication des meubles, etc.) ne sont souvent plus à l'état naturel.
- Bois de récupération, bois usagés :  
Les bois de récupération apparaissent à l'issue d'un cycle de vie produit à plusieurs étapes de durées différentes.

### Bois de chauffage

#### Sous-produits forestiers

- Bois provenant directement de la forêt, tels que bûches, bois ronds, plaquettes

#### Bois à l'état naturel provenant de la transformation du bois

- Ecorces
- Restes de tronçonnage en bois massif
- Couenneaux et délignures
- Copeaux de rabotage
- Sciure et poussière de ponçage de bois massif
- Plaquettes en bois massif

#### Sous-produits du bois à l'état non naturel

- Sous-produits provenant de la transformation de panneaux dérivés du bois
  - Panneaux de particules et de fibres
  - Panneaux MDF
  - Contre-plaqué
- Sous-produits munis d'un revêtement (sans PVC)
  - Placages
  - Revêtements mélaminés
- Sous-produits de bois traité
  - Bois avec peintures ou glacis
- Sous-produits du bois provenant des chantiers (travaux de montage)
  - Coffrages, échafaudages
  - Restes de bois provenant de l'agencement intérieur

### Bois de récupération (bois usagé)

- Bois provenant de travaux de démolition et de rénovation
- Panneaux, poutres, fenêtres, portes usagés
- Aménagements intérieurs usagés
- Objets usagés en bois
- Meubles usagés
- Emballages usagés
- Objets divers en bois
- Palettes

N'est pas assimilé au bois de récupération: le bois revêtu de PVC, imprégné en autoclave ou traité au pentachlorophénol. Ces déchets de bois doivent être éliminés dans des installations d'incinération des ordures.

Pour l'utilisation du bois de récupération, nous renvoyons à la documentation suivante:  
 Emissionsarme Altholznutzung in 1-10 MW-Anlagen  
 (Utilisation du bois de récupération avec de faibles émissions dans les installations de 1 à 10 MW).  
 DIANE 8 Energie tirée du bois et du papier de récupération  
 Office fédéral de l'énergie, Berne 1994  
 Disponible auprès de l'OCFIM, 3000 Berne  
 N° OCFIM 805.180 d

Nombre de chauffages au bois		
	Puissance	Nombre
Chauffages à bûches	< 30 kW	490 000
	> 30 kW	114 800
Chauffages à plaquettes	< 70 kW	1 410
	> 70 kW	2 420
Chauffages au bois de récupération	> 350 kW	15

Etat 1993

Consommation d'énergie du bois			
	Forêts et entreprises de transformation m <sup>3</sup>	Bois de récupération m <sup>3</sup>	Total m <sup>3</sup>
Chauffages à bûches	1 310 000		1 310 000
Chauffages à plaquettes	670 000	110 000	780 000
Total	1 980 000	110 000	2 090 000

Etat 1993

Potentiel du bois énergie			
Bois énergie	Consommation 1993 mio m <sup>3</sup> /an	Potentiel à moyen terme mio m <sup>3</sup> /an	Potentiel théorique mio m <sup>3</sup> /an
Bois hors-forêt		0,3	
Sous-produits forestiers	0,9	1,5 ... 2,8	
Sous-produits du bois de transformation	1,1	1,1	
Bois de récupération	0,1	0,7	
Total	2,1	3,6 ... 4,9	6

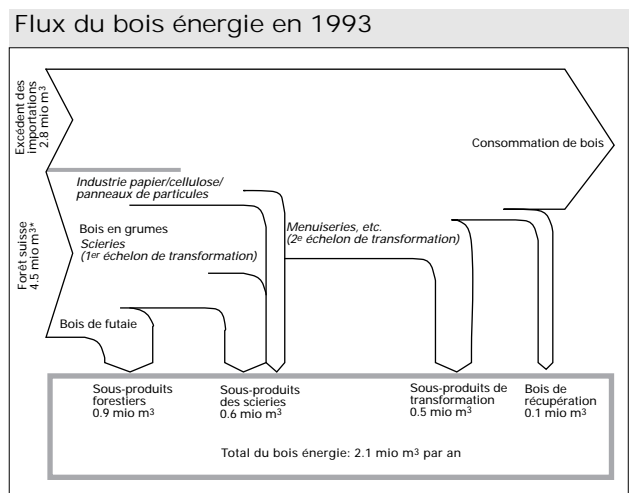
1 mio m<sup>3</sup>/an = 2500 GWh/a

Ce document présente en premier lieu les sous-produits forestiers et le bois énergie des scieries, avec, de manière ponctuelle, certaines particularités des sous-produits du bois provenant de l'industrie et de l'artisanat. D'après l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair), ces combustibles sont du bois de feu.

Par contre, selon la même ordonnance, le bois de récupération (bois usagé) n'est pas du bois de chauffage et il ne sera pas traité dans la présente documentation.

Les indications données sur le potentiel disponible de bois énergie sont souvent très divergentes. Il est toutefois certain que la filière du bois rencontre aujourd'hui des problèmes d'écoulement des assortiments de moindre valeur qui sont produits lors de chaque intervention en forêt. En même temps, l'écoulement des sous-produits de production des exploitations travaillant le bois devient toujours plus difficile. De plus, le bois de récupération provenant de la démolition des bâtiments, des vieux meubles, des emballages, etc., ne peut pas être utilisé à la fin de son cycle de vie pour produire de l'énergie.

Le potentiel de bois énergie disponible à moyen terme dans le cadre de la gestion durable de la forêt est estimé entre environ 3,6 à 4,9 millions de m<sup>3</sup> par an. Si l'on utilise en même temps le potentiel de production énergétique des sous-produits du bois et du bois de récupération, on arrive à un potentiel théorique de près de 6 millions de m<sup>3</sup> par an.



\* dont 3,5 mio m<sup>3</sup> pour l'exportation

La quantité de bois qui sera effectivement utilisée pour la production d'énergie dépend fortement du prix que l'on pourra en obtenir. En cas de forte croissance du besoin de bois énergie et en présence des incitations financières correspondantes, la filière bois est en mesure de mettre à disposition des quantités notablement plus importantes.

Le bois qui repousse permet de doubler au moins l'utilisation du bois énergie. Sans surexploiter la forêt et sans concurrencer les assortiments de bois de haute qualité, il serait ainsi possible de couvrir près de 6% des besoins en énergie pour la production de chaleur en Suisse.

Unités de mesure volumétrique les plus usitées:  
m<sup>3</sup> = mètre cube de volume réel = masse de bois compact  
m<sup>3</sup>PI = mètre cube de plaquettes ou mètre cube en vrac  
stère = bois coupé empilé sur 1 x 1 x 1 m

## 1.2 Promotion de l'énergie du bois

La Confédération et de plus en plus de cantons encouragent par des mesures ciblées le recours à des agents énergétiques renouvelables en Suisse. Le bois joue dans ce contexte un rôle tout particulier, car il a le plus important potentiel utilisable rapidement et avec une technologie éprouvée pour la période située entre 1990 et 2000, avec des investissements supplémentaires relativement réduits par rapport aux solutions conventionnelles reposant sur les agents énergétiques fossiles.

La Confédération encourage les installations bien conçues par le biais de contributions financières. Les cantons aussi, dans leur législation sur l'énergie, tiennent de plus en plus compte de l'énergie bois. De même, des contributions financières à la réalisation d'installations sont possibles dans divers cantons. L'Association suisse pour l'énergie du bois (ASEB) peut fournir de plus amples renseignements, tout comme les services d'information sur l'énergie des cantons.

De plus en plus de communes sont aujourd'hui disposées à effectuer des investissements supplémentaires pour des chauffages au bois, dans le but d'améliorer la situation des exploitations forestières communales et parce qu'il est ainsi possible de tirer efficacement profit de leurs propres agents énergétiques.

Le recours intensif à l'énergie du bois permettra à la Suisse de contribuer à l'urgente réduction de l'enrichissement de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>, et donc à la diminution de l'effet de serre.

## Arguments en faveur de l'énergie du bois

## Arguments politiques

- Diversification de l'approvisionnement en énergie
- Diminution de notre dépendance vis-à-vis de l'étranger

## Arguments économiques

- Produits pour la filière de la forêt et du bois
- Valeur ajoutée aux plans locaux et régionaux

## Arguments écologiques

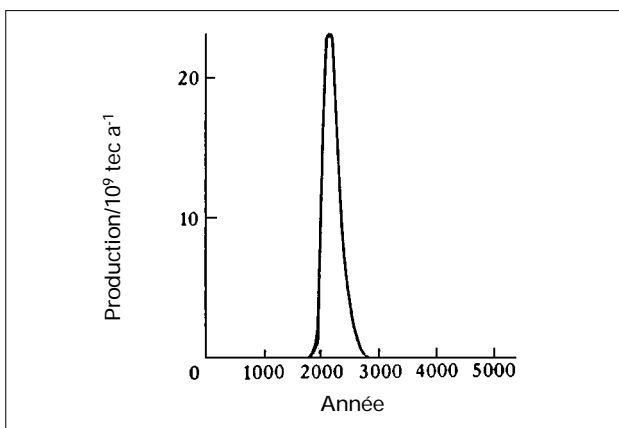
- Neutre du point de vue du CO<sub>2</sub>
- Transports courts et avec peu de risques, préparation et stockage présentant peu de dangers
- Emploi réduit d'énergie grise

## Arguments pratiques

- Technique avancée
- Confort élevé
- Convient tout particulièrement aux réseaux de chauffage à distance
- Meilleure relation avec l'énergie

## Répartition de la consommation mondiale d'énergie

Agents énergétiques non renouvelables	80 %
Energie nucléaire	5 %
Energies fossiles	75 %
Pétrole	32 %
Charbon	26 %
Gaz naturel	17 %
Agents énergétiques renouvelables	20 %
Biomasse	13 %
Energie hydraulique	6 %
Rayonnement solaire direct et vent	1 %



L'âge des combustibles fossiles  
Avec la poursuite de l'augmentation de la consommation, les réserves seront épuisées en quelques générations.

## 1.3 Arguments en faveur de l'énergie du bois

Jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, la production économique reposait presque exclusivement sur la consommation d'agents énergétiques renouvelables, c'est-à-dire sur le bois, le vent et la force musculaire. Avec l'industrialisation, le charbon au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, puis le pétrole et le gaz au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, ont assumé un rôle central pour l'approvisionnement énergétique. Ce phénomène s'est accompagné d'un spectaculaire bond en avant de la consommation mondiale d'énergie pour parvenir au chiffre actuel de 10<sup>10</sup> tec (tonnes d'équivalent charbon), soit près de 1,1 x 10<sup>14</sup> kWh, ce qui correspond à une consommation moyenne de 2 tec par personne et par an (23 000 kWh ou une puissance consommée permanente de 2,6 kW par personne).

Notre économie actuelle repose presque exclusivement sur la consommation de ressources non renouvelables. 20% seulement de celle-là est couverte par des agents énergétiques renouvelables, dont la biomasse (bois, engrais, sous-produits agricoles) constitue l'essentiel avec 13%.

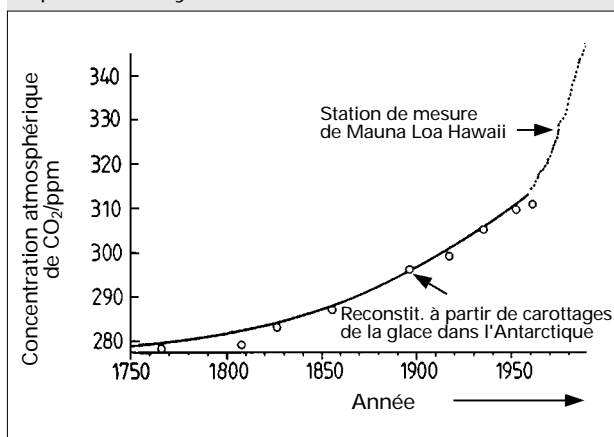
En Suisse, l'énergie du bois couvre près de 1,6% de la consommation d'énergie. C'est, après l'énergie hydraulique, le deuxième agent énergétique indigène et le deuxième agent énergétique renouvelable.

Etant donné que les réserves de matières premières fossiles sont limitées et que la consommation actuelle les épuisera en quelques générations, toute dépendance exclusive des agents énergétiques fossiles devient impossible à long terme. De plus, l'utilisation de combustibles fossiles provoque un accroissement de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ceci peut conduire à des changements climatiques rendant la réduction de la consommation indispensable bien avant l'épuisement des réserves. Les agents énergétiques renouvelables doivent donc être utilisés dans une plus grande mesure et se substituer aux énergies non renouvelables. Dans ce contexte, le bois joue en Suisse un rôle important car la consommation indigène de bois énergie pourrait être doublée à triplée tout en restant dans le cadre d'une gestion durable de la forêt.

Un argument central en faveur des chauffages automatiques au bois réside dans la substitution des combustibles fossiles par le combustible bois, neutre du point de vue du CO<sub>2</sub>. Toutefois, le bois présente encore d'autres et nombreux avantages. Son exploitation se fait dans le pays même et procure des places de travail dans les régions marginales, économiquement faibles. Toute augmentation de l'utilisation du bois apporte également un soutien au maintien des multiples fonctions de la forêt dont celles de protéger des avalanches, de l'érosion et des chutes de pierres et de servir d'espace de détente à la population.

Le recours à l'énergie du bois permet également de supprimer les transports sur de longues distances. La consommation d'énergie grise est plus faible que dans le cas des agents énergétiques importés et les risques écologiques dus aux accidents de transport et aux fuites sont éliminés.

Développement de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone



## 1.4 Chaînes d'approvisionnement

### Sous-produits forestiers

Dans le cas de la chaîne d'approvisionnement direct, le bois énergie abattu est transformé en plaquettes dans la forêt même, puis directement transporté vers le consommateur. Afin d'assurer une meilleure sécurité d'approvisionnement, le fournisseur peut entreposer le bois rond à un emplacement convenant à la fabrication des plaquettes en hiver aussi, en raison de la neige et du verglas.

La chaîne d'approvisionnement direct est avantageuse, car le travail de transformation est minimal et qu'aucun stockage intermédiaire des plaquettes n'est nécessaire. Le fournisseur de bois énergie doit assurer la sécurité d'approvisionnement en hiver aussi, lorsque l'accès à la forêt est rendu plus difficile. Les plaquettes ont une teneur en eau allant jusqu'à 60% au maximum.

L'entreposage des bois abattus et non ébranchés pendant quelques semaines ou quelques mois permet de réaliser déjà un séchage préalable substantiel (teneur en eau < 50%). En même temps, la forêt conserve ainsi la plus grande part du feuillage et des aiguilles sous forme de matières minérales.

### Chaîne d'approvisionnement direct

- Abattage et halage à port de camion, stockage éventuel des grumes en piles ou de l'arbre entier en forêt
- Déchiquetage sur le chemin forestier
- Transport direct des plaquettes au consommateur

#### Avantages

- Peu coûteux

#### A considérer

- Sécurité d'approvisionnement en hiver
- Teneur en eau élevée

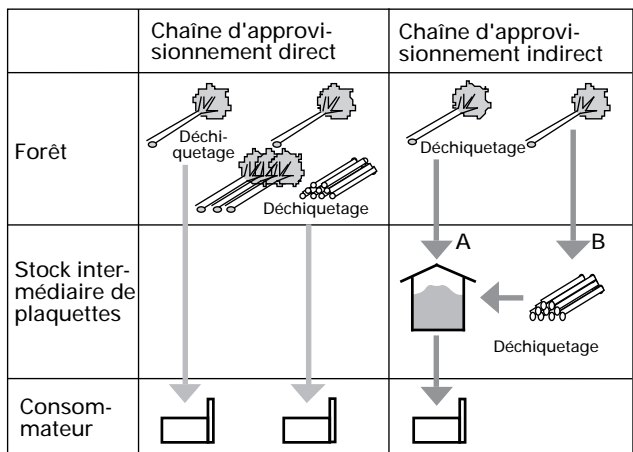
**Chaîne d'approvisionnement indirect**

- Variante A**
- Abattage et transport jusqu'à une voie carrossable
  - Déchiquetage sur le chemin forestier
  - Transport au lieu de stockage intermédiaire des plaquettes
  - Transport au consommateur
- Variante B**
- Abattage et transport jusqu'à une voie carrossable
  - Transport du bois rond au lieu de stockage des plaquettes
  - Stockage du bois rond au lieu de stockage des plaquettes
  - Déchiquetage et entreposage au lieu de stockage des plaquettes
  - Transport au consommateur
- Avantages**
- Grande sécurité d'approvisionnement
  - La teneur en eau des plaquettes est généralement faible et régulière
- Inconvénient**
- Coûteux
- A considérer**
- Manutention compliquée des plaquettes
  - Nécessité d'un stockage intermédiaire des plaquettes

Dans le cas de la chaîne d'approvisionnement indirect, le bois énergie fait l'objet d'un stockage intermédiaire sous formes de plaquettes, en dehors de la forêt.

**Recommandation :**  
 La chaîne d'approvisionnement indirect est plus coûteuse car elle requiert le stockage intermédiaire des plaquettes. Elle se justifie lorsque l'accès à la forêt est impossible en hiver, ainsi qu'en tant que solution régionale lorsqu'il s'agit de traiter de très grandes quantités de plaquettes (stock tampon).

Il existe, à côté des chaînes d'approvisionnement direct et indirect, la chaîne d'approvisionnement mixte combinant les deux variantes. Elle permet une grande sécurité d'approvisionnement et elle est un peu moins coûteuse que la chaîne d'approvisionnement indirect, parce que le stock intermédiaire de plaquettes est de plus petite taille.



Le travail de mise à disposition du bois énergie dépend des étapes de traitement :

- récolte du bois (abattage, ébranchage, débarquement);
- déchetage;
- transport au silo (10 km au maximum), respectivement au lieu de stockage intermédiaire;
- déchargement, transport.

Etant donné que les travaux de récolte, de déchetage, de transport et d'entreposage dépendent surtout du volume à traiter et non du poids, les prix au contenu énergétique du bois de résineux sont généralement de 10% à 15% supérieurs à ceux du bois de feuillus.

Le coût de mise à disposition de bois énergie oscille, avec la chaîne d'approvisionnement direct, entre Fr. 29.-/m<sup>3</sup> et Fr. 48.-/m<sup>3</sup> en vrac. Aux prix actuels du marché (voir le chapitre 1.8), l'exploitation de la chaîne d'approvisionnement direct peut être neutre du point de vue des coûts. Par contre, avec la chaîne d'approvisionnement indirect, le coût varie entre Fr. 39.-/m<sup>3</sup> et Fr. 74.-/m<sup>3</sup> en vrac, ce qui mène à une exploitation déficitaire.

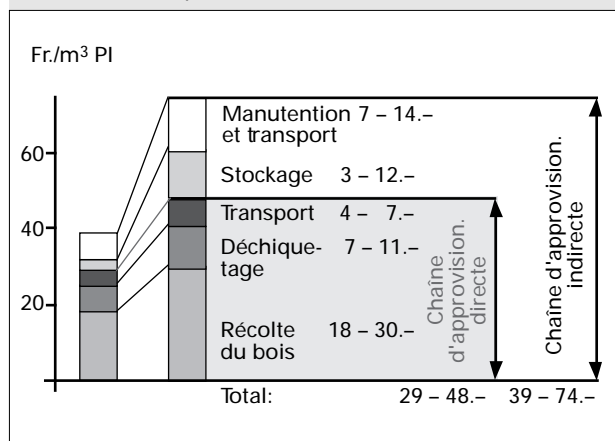
Le stockage intermédiaire des plaquettes peut remplir deux fonctions :

- séchage et homogénéisation;
- amélioration de la disponibilité en hiver.

Pour maintenir les coûts à un bas niveau, il faut :

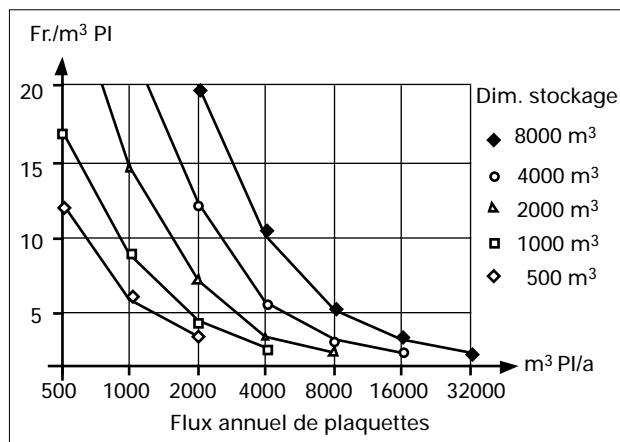
- dimensionner le volume de stockage de telle sorte que la rotation du volume annuel net soit aussi élevée que possible;
- faire en sorte que les dispositifs mécaniques soient efficaces, avantageux et correspondent à l'assortiment de bois.

#### Coûts des étapes de transformation

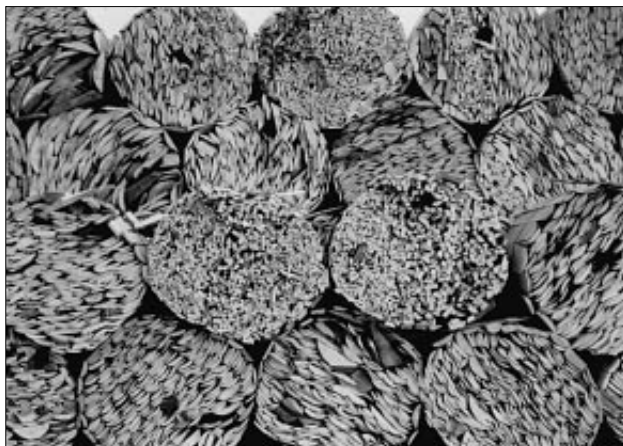


#### Coûts d'un stockage intermédiaire

Le chargement et le déchargement coûtent entre 4 et 6 Fr./m<sup>3</sup> PI







Bois énergie provenant des scieries: couenneaux + délignure

Bois énergie à l'état naturel provenant de la filière bois

Les scieries (premier échelon de la chaîne de traitement) produisent du bois énergie à l'état naturel (couenneaux, délignures, écorces, sciures). Pour la production sur place de la chaleur, le bois est traité par un déchiqueteur stationnaire, puis stocké dans le propre dépôt de plaquettes de l'entreprise. Dans d'autres cas, le bois est transporté à courte distance pour traitement, vers un hangar à plaquettes.

Sous-produits du bois de transformation

Les menuiseries, charpenteries, raboteries, etc. (deuxième échelon de la chaîne de traitement) fournissent des sous-produits sous diverses formes, dont certains sont laissés à l'état naturel et d'autres sont traités. Ils sont transformés en plaquettes ou en briquettes (par exemple pour la poussière de ponçage) et ils servent souvent à la production d'énergie dans l'entreprise elle-même.

Les sous-produits du bois provenant du deuxième échelon de transformation sont généralement secs (teneur en eau entre 7% et 20%); leur teneur en poussière peut aller jusqu'à 20%, ce qui risque de poser des problèmes de stockage et de combustion.

Les sous-produits du bois revêtus de PVC ou imprégnés en autoclave doivent être brûlés avec les déchets ménagers dans des installations d'incinération des ordures ménagères.

## 1.5 Teneur en eau et humidité du bois

Deux grandeurs sont usuelles pour indiquer le contenu en eau du bois :

- la teneur en eau  $h$  est définie comme le rapport entre le poids de l'eau en kg et le poids total en kg de bois humide ;
- l'humidité du bois  $u$  désigne le rapport entre le poids de l'eau en kg et le poids en kg de substance de bois absolument sec.

La détermination du contenu en eau se fait en pesant un échantillon humide, en le séchant, puis en pesant l'échantillon séché.

Le séchage intervient dans un séchoir (Fr. 1500.- environ) entre 102°C et 105°C pendant 24 heures environ. Un séchage plus rapide est possible à l'aide d'un séchoir à air chaud ou au moyen d'une balance de séchage à rayonnement.

Une détermination grossière peut aussi être obtenue à l'aide d'un four à micro-ondes (durée de séchage: 15 minutes environ; attention au risque d'incendie), ou d'un four permettant le réglage suffisamment précis de la température.

La teneur en eau n'a pratiquement pas d'influence sur le volume des plaquettes, mais leur poids en dépend fortement. Si le bois est vendu au volume, sa teneur en eau n'influence que peu son contenu énergétique. Celui d'un mètre cube en vrac de plaquettes fraîches n'est que de 10% inférieur environ au même volume de plaquettes séchées à l'air. Par contre, il faut absolument tenir compte de la teneur en eau si le décompte se fait au poids.

A côté de la teneur en eau naturelle du bois, celui-ci peut aussi contenir de l'eau d'origine externe résultant d'un stockage inadéquat et provenant de la pluie ou de la neige. L'eau d'origine externe exerce une influence notable sur la combustion. A elle seule, la teneur en eau ne définit qu'insuffisamment la qualité du bois énergie. En plus du respect de la limite de la teneur en eau prescrite pour le chauffage, il faut veiller à ce que le bois ne contienne pas une part excédentaire d'eau d'origine externe.

Teneur en eau $x$ [%] =	$\frac{(\text{Poids de l'eau [kg]} \cdot 100)}{(\text{Poids brut du bois mouillé [kg]})}$
Humidité du bois $u$ [%] =	$\frac{(\text{Poids de l'eau [kg]} \cdot 100)}{(\text{Poids du bois anhydre [kg]} \cdot *)}$
* bois anhydre = bois exempt d'eau	
On utilise aussi $w$ au lieu de $x$ $u$ est également désigné comme % <sub>atro</sub> (atro = absolument sec) OU % <sub>anhydre</sub>	

### Conversion

Teneur en eau $x$ [%] =	$\frac{u \text{ [%]}}{100 + u \text{ [%]}} \cdot 100$
Humidité du bois $u$ [%] =	$\frac{x \text{ [%]}}{100 - x \text{ [%]}} \cdot 100$

### Table de conversion

$x$ [%]	$u$ [%]
0	0
25	33
40	67
50	100
60	150

### Valeurs caractéristiques

Assortiment	$x$ [%]	$u$ [%]
Plaquettes venant de la forêt	20 - 50	15 - 100
Plaquettes stockées sous toit	20 - 30	25 - 43
Plaquettes séchées à l'air	15 - 20	18 - 25
Sous-produits du bois de scierie	26 - 60	33 - 150
Sous-produits du bois de charpenterie	13 - 20	15 - 25
Sous-produits du bois de menuiserie	7 - 17	7 - 20

## Vente au volume (V1 ou V2)

V1	Bois feuillus durs	Chêne, hêtre, frêne, orme, châtaignier, robinier, charme commun, bouleau, noyer, fruitiers (sauf cerisier)
V2	Bois résineux et bois feuillus tendres	Epicéa, sapin, pin, sapin de Douglas, mélèze, aulne, érable, cerisier, peuplier, saule

## Vente au poids (P)

P	Tous les bois résineux ou feuillus	
---	------------------------------------	--

## 1.6 Classification du bois énergie

### Classification pour la vente

Les bois feuillus durs (V1) ont une densité supérieure, donc un poids volumique et un contenu énergétique supérieurs à celui des bois résineux (V2).

Lors de la vente de bois énergie, on fait encore la distinction entre la vente au volume (V) et la vente au poids (P). Aujourd'hui, le bois énergie est généralement vendu au volume.

Ce qui est déterminant pour la facturation du bois énergie, c'est la quantité énergétique livrée sous forme de bois. La classification ci-après doit en conséquence compenser les différences de densité et de pouvoir calorifique entre les bois feuillus et les bois résineux.

### Vente au volume (V)

La classe V1 a un contenu énergétique par unité volumétrique supérieur à celui de la classe V2. Cette répartition est utilisée pour la vente au volume (m<sup>3</sup> vrac, stère).

### Vente au poids (P)

Les différences de contenu énergétique sont faibles en relation avec le poids sec ( $t_{atrc}$ ). C'est pourquoi il n'est pas nécessaire de distinguer entre les essences de bois en cas de vente au poids.

### Classification pour la technique des installations

De ce point de vue, on procède à une classification en fonction de la taille des plaquettes et de leur teneur en eau.

## Répartition du bois énergie en fonction de critères techniques des installations

Assortiment	Dimension des plaquettes mm	Part max. de surlongueurs % poids	Part max. de particules fines* jusq. 3 mm % poids	Part max. d'écorce % poids	Teneur max. en eau x **	Humidité max. du bois u **
Plaquettes sèches, fines	40/20/10	1% > 80 mm	< 5%	< 10%	< 30%	< 43%
Plaquettes vertes, fines	40/20/10	1% > 80 mm	< 5%	< 10%	< 50%	< 100%
Plaquettes vertes, grossières	60/20/10	1% > 220 mm	< 5%	< 10%	< 50%	< 100%
Plaquettes vertes, grossières, à proportion d'écorce élevée	60/20/10	1% > 220 m	< 5%	< 30%	< 60%	< 150%

\* Au maximum 5% d'aiguilles en plus

\*\* Teneur en eau, resp. humidité du bois stocké dans les règles de l'art, sans eau d'origine externe

## 1.7 Contenu énergétique

Le contenu énergétique du bois est généralement indiqué par son pouvoir calorifique PCI. Le pouvoir calorifique représente l'énergie que l'on peut obtenir par la combustion d'un kg de bois humide, une fois que les gaz de combustion ont été refroidis à la température de sortie et que l'eau contenue dans les gaz de combustion est passée à l'état de vapeur.

Le pouvoir calorifique de la substance bois absolument sèche varie peu entre les différentes essences de bois ; elle se situe en moyenne à 5,15 kWh/kg ou 18,5 MJ/kg.

Le contenu énergétique par mètre cube en vrac diminue légèrement lorsque la teneur en eau augmente, car l'eau contenue dans le bois doit être vaporisée lors de la combustion. Les installations équipées d'un dispositif de condensation des gaz de combustion récupèrent une partie de cette chaleur de condensation (voir le chapitre 3.4).

Les bois feuillus durs, du fait de leur densité plus élevée, ont un contenu énergétique supérieur par unité volumétrique à celui des résineux. Par rapport au poids sec, les différences entre bois feuillu et bois résineux sont toutefois faibles.

Le bois énergie provenant de la transformation du bois présente, selon son origine, de très importantes différences de forme et de teneur en eau. Le bois de scierie (premier échelon de traitement) présente généralement une teneur en eau élevée, alors que les sous-produits du bois des menuiseries et charpenteries (deuxième échelon de traitement) sont le plus souvent très secs. On rencontre, selon le type de traitement, des différences extrêmement grandes entre les bois provenant des menuiseries et charpenteries en matière de granulométrie (allant des morceaux de bois jusqu'à la poussière) et de densité en vrac. Il en résulte des différences de pouvoir calorifique par unité volumétrique pouvant atteindre jusqu'au facteur 10. C'est pourquoi la conception des chauffages aux sous-produits du bois doit tenir compte des conditions propres à chaque entreprise fournissant le combustible.

Une analyse précise du pouvoir calorifique peut être effectuée par le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et institut de recherches (EMPA).

$$\text{Pouvoir calorifique PCI [kWh/kg]} = \frac{\text{contenu énergétique [kWh]}}{\text{poids brut du bois mouillé [kg]}}$$

Au lieu de kWh/kg, on emploie aussi MJ/kg.  
Conversion: 1 kWh = 3,6 MJ

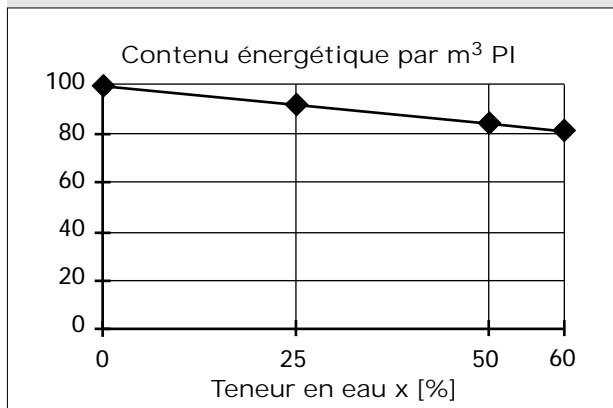
Pouvoir calorifique PCI (autrefois pouvoir calorifique inférieur)

Quantité d'énergie qui peut être utilisée comme chaleur sensible lors de la combustion d'un kg de combustible, donc après refroidissement des gaz de combustion à la température de sortie, l'eau étant présente dans les gaz sous forme de vapeur.

Pouvoir combustible PC<sub>s</sub> (autrefois pouvoir calorifique supérieur)

Quantité d'énergie qui peut être utilisée comme chaleur sensible et chaleur latente lors de la combustion d'un kg de combustible, après refroidissement des gaz de combustion à la température de sortie, l'eau étant présente dans les gaz de combustion sous forme liquide.

Modification en pourcent du contenu énergétique par m<sup>3</sup> PI pour une teneur en eau croissante



Bois énergie provenant de la transformation du bois	Pouvoir calorifique
Scierie (à l'état naturel) (Teneur en eau x 40% - 60%) Plaquettes d'écorce	850 – 1100 kWh/m <sup>3</sup> PI
Sciure	600 – 800 kWh/m <sup>3</sup> PI
Menuiserie et charpenterie (sous-produits de transformation) (x 10 % - 15 %)	
Bois massif	2250 – 2950 kWh/m <sup>3</sup> PI
Panneaux en matériaux dérivés du bois	3000 – 4400 kWh/m <sup>3</sup> PI
Briquettes	4400 – 7700 kWh/m <sup>3</sup> PI
Plaquettes en bois massif	900 – 150 kWh/m <sup>3</sup> PI
Plaquettes de panneaux en matériaux dérivés du bois	1200 – 1750 kWh/m <sup>3</sup> PI
Copeaux/poussière de bois massif	650 – 850 kWh/m <sup>3</sup> PI
Copeaux/poussière de panneaux en matériaux dérivés du bois	1000 – 1400 kWh/m <sup>3</sup> PI

Pouvoir calorifique par m<sup>3</sup> PI (V1, V2), resp. par tonne de poids sec (P) en fonction de la teneur en eau

Teneur en eau	Pouvoir calorifique par unité volumétrique		Pouvoir calorifique par unité de poids P kWh/t <sub>atro</sub>
	V1 kWh/m <sup>3</sup> PI	V2 kWh/m <sup>3</sup> PI	
x = 0 %	950 – 1200	750 – 900	5150
x = 25 %	910 – 1150	720 – 860	4920
x = 50 %	810 – 1040	650 – 780	4450
x = 60 %	770 – 970	600 – 730	4100

Les valeurs moyennes pour les catégories V1 et V2 peuvent être obtenues auprès de l'Association suisse pour l'énergie du bois (ASEB).

## 1.8 Facturation du bois énergie

La facturation du bois énergie se fait par mètre cube en vrac, au poids ou d'après la quantité de chaleur produite.

La méthode de calcul la plus souvent utilisée est la facturation par mètre cube en vrac ( $m^3$  vrac). Elle n'est pas très précise, car la densité du bois et la densité des plaquettes livrées en vrac, et donc leur contenu énergétique, peuvent varier très fortement. Par contre, la détermination du volume livré est très simple et n'entraîne pratiquement aucun frais. Le prix d'une livraison d'après le contenu énergétique par mètre cube en vrac est fixé pour les différents assortiments de bois en fonction de leur teneur en eau (sec, vert).

La vente à la tonne de substance sèche ( $t_{atro}$ ) est plus précise que la facturation par mètre cube en vrac, car le type de bois et la densité du vrac ne jouent ici aucun rôle. Il faut toutefois déterminer le poids et la teneur en eau représentative d'une livraison. La détermination du poids se fait, par exemple, en pesant le camion avant et après le déchargement. Les camions dotés d'un système de mesure du poids peuvent l'utiliser à condition qu'une précision suffisante soit garantie. Pour déterminer la teneur en eau, il faut soit examiner plusieurs échantillons, soit examiner un échantillon mixte. Le prix d'une livraison est ensuite déterminé en fonction du contenu énergétique de la tonne de substance sèche.

La vente au poids intervient dans le domaine industriel et dans les grandes installations de valorisation de la biomasse, par exemple aux Etats-Unis ou en Scandinavie. Par contre, cette méthode de calcul n'est pratiquement jamais utilisée en Suisse pour les installations de chauffage au bois plus petites, étant donné le travail comparativement important entraîné par l'application de cette méthode de calcul.

La vente par kWh de chaleur produite (énergie utile) est possible pour les installations équipées d'un compteur de chaleur qui mesure l'énergie utile produite (par exemple dans les réseaux de chauffage à distance). L'énergie utile résulte du contenu énergétique du combustible livré et du taux d'utilisation annuelle (chapitre 2.8). Pour le décompte, on convient d'un prix en Fr. par MWh d'énergie fournie (énergie finale, contenu énergétique du bois fourni).

### Modes de facturation du bois énergie

- Facturation par  $m^3$  PI en vrac
- Facturation par tonne de substance sèche  $t_{atro}$
- Facturation par kWh de chaleur produite (énergie utile)

### Facturation par $m^3$ PI en vrac

- Avantage**
- Détermination aisée du volume
- Inconvénient**
- Grande insécurité sur le contenu énergétique

### Facturation par tonne de substance sèche $t_{atro}$

- Avantages**
- Indépendance par rapport au type de bois et à la densité du vrac
  - Précision élevée du contenu d'énergie
- Inconvénient**
- Nécessité de mesurer le poids et la teneur en eau

### Détermination du poids anhydre (exempt d'eau)

$$\text{Poids}_{atro} = \text{Poids}_{humide} \cdot \left( 1 - \frac{\text{teneur en eau} \times [\%]}{100} \right)$$

### Facturation par kWh de chaleur produite

- Avantages**
- Indépendance par rapport au type de bois et à la densité du vrac
  - Indépendance par rapport à la teneur en eau
- Inconvénients**
- Dépend du degré d'utilisation annuelle de l'installation
  - Estimation du degré d'utilisation annuelle de l'installation
  - Limitée au cas où il n'y a qu'un seul fournisseur

Recommandation de prix EFAS / ASIB pour 1993/1994		
Assortiment	Prix * Franco silo Fr./m <sup>3</sup> PI	Contenu énergétique relatif par m <sup>3</sup> PI **
Bois feuillu sec	45 – 52	1.10
Bois feuillu vert	25 – 43	1
Bois résineux sec	33 – 38	0.73
Bois résineux vert	26 – 38	0.66
Copeaux, sciure, écorces	Selon entente, env. 5	
Couenneaux, délignures (déchiquetés)	15– 20	

\* Pour les plages de prix indiquées, le prix par contenu énergétique est de 10 à 15% de plus pour les bois résineux que pour les bois feuillus. On obtient des prix comparables en fonction du contenu énergétique si l'on prend les valeurs supérieures pour les bois feuillus et les valeurs inférieures pour les bois résineux.  
Exemple: Fr. 50 –/m<sup>3</sup> PI de bois feuillu sec correspondent à Fr. 33 –/m<sup>3</sup> PI de bois résineux sec.

\*\* Référence: bois feuillus verts = 1

Recommandation PACER			
Prix de base Fr. 36.–/MWh d'énergie finale			
Assortiment	V1 Fr./m <sup>3</sup> PI	V2 Fr./m <sup>3</sup> PI	P Fr./t <sub>atro</sub>
Plaquettes sèches, fines	48	30	178
Plaquettes vertes, fines	43	29	162
Plaquettes vertes, grossières	43	29	162
Plaquettes vertes, grossières, à proportion d'écorce élevée	40	27	149

Tous les prix s'entendent franco silo.  
Ces indications reposent sur des indications provisoires sur le contenu énergétique.

Les exploitants d'installations et les fournisseurs de bois énergie doivent fixer ensemble la procédure de détermination de la quantité d'énergie livrée. Une proposition de procédure de cette nature peut être obtenue auprès de l'Association suisse pour l'énergie du bois (ASEB). Le taux d'utilisation annuelle est ici calculé au moyen d'une formule tenant compte du rendement de la combustion ainsi que des pertes de rayonnement et d'attente (voir l'annexe 9.3).

Les prix du marché des plaquettes de bois énergie provenant de la forêt ou des scieries sont fixés par une recommandation émise au début de la saison de chauffage par l'Economie forestière - association suisse (EFAS) et par l'Association suisse des scieries et de l'industrie du bois (ASIB).

Il n'y a pas de recommandation de prix pour les sous-produits du bois provenant du deuxième échelon de transformation; ils sont vendus sur le marché local. Ce prix est très bas et il arrive même que ce soit le destinataire qui perçoive une taxe d'élimination de Fr. 20.– à Fr. 40.– par tonne.

Des efforts sont en cours dans certaines parties de la Suisse pour créer un marché spot pour le bois énergie. Comme à la bourse, les offrants et les demandeurs pourront y négocier le bois énergie. L'accès à la bourse sera réalisé par le biais d'une banque de données centrale, les livraisons interviennent ensuite au plan régional.

Le marché spot permettra une offre plus large sur le marché du bois énergie, augmentera la sécurité d'approvisionnement et la souplesse lors des achats et encouragera ainsi le recours à l'énergie du bois.

## 1.9 OPair 92 et autres ordonnances

Ordonnance sur la protection de l'air OPair 92

L'Ordonnance sur la protection de l'air OPair 92 définit les combustibles bois prévus pour la combustion dans les chauffages au bois. Elle fixe des limites d'émission pour les installations stationnaires ainsi que la charge maximum de l'air (limites d'immissions).

*Teneur en poussière (teneur en particules solides):*  
La teneur maximum en poussière est de 150 mg/m<sup>3</sup> pour les installations de 70 kW à 5 MW. Il n'y a pas de prescriptions pour les installations de moins de 70 kW. La limite est de 50 mg/m<sup>3</sup> pour les installations de plus de 5 MW.

*Monoxyde de carbone (CO):*  
La limite pour le monoxyde de carbone (indicateur de la qualité de la combustion) dépend de la grandeur de l'installation. Les prescriptions sont plus sévères pour la combustion de sous-produits du bois que pour le bois à l'état naturel. Cette différence se remarque surtout dans le cas des installations de moins de 200 kW.

*Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>):*  
La limite d'émission pour les oxydes d'azote n'intervient qu'après le dépassement d'un débit massique de 2500 g/h (annexe 1, chiffre 6); soit généralement à partir d'une puissance d'installation de l'ordre de 1,5 MW (4 MW environ pour le bois à l'état naturel).

*Hydrocarbures:*  
Des limites s'appliquent aux matières organiques gazeuses à partir d'une puissance d'installation de 1 MW.

*Ammoniac:*  
Les limites pour l'ammoniac et les liaisons ammoniacales ne concernent que les installations équipées de dispositifs de dénitrification à partir de 1 MW environ.

Les cantons sont responsables de l'application de l'Ordonnance sur la protection de l'air. Ce sont eux qui désignent les personnes chargées de procéder aux mesures.

A part l'OPair, d'autres ordonnances peuvent concerner l'exploitant d'un chauffage au bois.

Définition des bois de chauffage d'après l'Ordonnance sur la protection de l'air OPair 92 (annexe 5, chiffre 3)

- 1) Sont réputés bois de chauffage:
  - a. Le bois à l'état naturel et en morceaux, y compris son écorce, par exemple les bûches et les briquettes de bois sans liants, ainsi que les brindilles et les pives;
  - b. Le bois à l'état naturel sous une autre forme qu'en morceaux, par exemple le bois déchiqueté, les copeaux, la sciure, la poussière d'une ponceuse, les écorces;
  - c. Les résidus de l'industrie du bois, de son artisanat et des chantiers, dans la mesure où le bois n'est pas imprégné d'un enduit ni recouvert d'un revêtement renfermant des composés organo-halogénés.
- 2) Ne sont pas réputés bois de chauffage:
  - a. Le bois usagé issu de la démolition, de la transformation ou de la rénovation de bâtiments ou provenant d'emballages, les vieux meubles et les mélanges de bois usagé et de bois de chauffage au sens du 1<sup>er</sup> alinéa;
  - b. Les autres substances en bois, telles que:
    1. Le bois usagé ou les déchets de bois imprégnés, enduits de produits de conservation ou qui présentent un revêtement renfermant des composés organo-halogénés (*par ex. PVC*);
    2. Les déchets de bois usagé ayant été traités intensivement avec des produits de conservation du bois comme le pentachlorophénol (*par exemple traverses de chemin de fer, poteaux téléphoniques, clôtures de jardin*);
    3. Les mélanges de tels déchets avec du bois de chauffage au sens du 1<sup>er</sup> alinéa ou du bois usagé selon lettre a.



Valeurs limites des émissions pour les chauffages au bois d'après l'Ordonnance sur la protection de l'air OPair 92 (annexe 3 chiffre 522)

	Puissance calorifique					
	plus de 20 kW jusqu'à 70 kW	de 70 kW à 200 kW	de 200 kW à 500 kW	de 500 kW à 1 MW	de 1 MW à 5 MW	plus de 5 MW
<b>Bois de chauffage</b>						
• Grandeur de référence: les valeurs limites se rapportent à une teneur en oxygène des effluents gazeux de.....% vol	13	13	13	13	11	11
• Particules solides au total .....mg/m <sup>3</sup>	–	150	150	150	150	50
• Monoxyde de carbone (CO) - pour le bois de chauffage, selon l'annexe 5, ch. 3, 1 <sup>er</sup> al., lettres a et b .....mg/m <sup>3</sup>	4000 <sup>1)</sup>	2000	1000	500	250	250
- pour le bois de chauffage, selon l'annexe 5, ch. 3, 1 <sup>er</sup> al., lettre c .....mg/m <sup>3</sup>	1000	1000	800	500	250	250
• Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ), exprimés en dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) .....mg/m <sup>3</sup>	– <sup>2)</sup>	– <sup>2)</sup>	– <sup>2)</sup>	– <sup>2)</sup>	– <sup>2)</sup>	– <sup>2)</sup>
• Substances organiques sous forme gazeuse, exprimées en carbone total (C) .....mg/m <sup>3</sup>	–	–	–	–	50	50
• Ammoniac et composés de l'ammonium, exprimés en ammoniac <sup>3)</sup> .....mg/m <sup>3</sup>	–	–	–	–	30	30
<b>Remarques :</b>						
– Un tiret dans le tableau signifie qu'aucune limitation n'est prescrite, ni dans l'annexe 3, ni dans l'annexe 1.						
1) Non applicable aux potagers de chauffage central.						
2) Voir la valeur limite pour l'oxyde d'azote, annexe 1, chiffre 6.						
3) Cette limite d'émission n'a de sens que pour les installations de combustion équipées d'un dispositif de dénitrification.						

Principes de l'OTD

<p><b>Obligation de valorisation</b> Les déchets doivent être valorisés tant que cela est techniquement possible et économiquement supportable.</p> <p><b>Interdiction de mélanger</b> Le mélange de différents déchets ou de déchets avec des additifs est interdit quand il s'agit essentiellement d'en abaisser la teneur en substances dangereuses par dilution.</p> <p><b>Obligation d'incinération</b> Les déchets combustibles doivent être incinérés dans des installations appropriées dans la mesure où ils ne peuvent pas être valorisés. Le bois et les sous-produits du bois ne doivent pas être mis en décharge. Si, exceptionnellement, aucune station d'incinération ou de valorisation n'est disponible, ils peuvent être déposés définitivement en décharge (décharge d'ordures ménagères) à condition qu'ils satisfassent aux exigences posées (OTD, annexe 1, chiffre 3).</p>
---

Cendres de foyer comme engrais tiré des sous-produits

<p>N'est possible que pour les installations brûlant du bois à l'état naturel.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Doivent avoir un contenu minimum en substances nutritives (potassium, phosphore éventuellement).</li> <li>– Ne doivent pas dépasser le seuil admissible pour les métaux lourds pour le compost (entre autres: chrome, zinc et cadmium).</li> </ul>
--

Cas spéciaux

Les autorités peuvent exiger une mesure constante et l'enregistrement permanent de certaines substances dangereuses et des paramètres d'exploitation, tant que les émissions des installations revêtent une importance particulière pour l'environnement. Tel est le cas surtout pour les grandes installations ou pour les combustibles spéciaux.

**OTD – Ordonnance sur le traitement des déchets**  
L'Ordonnance sur le traitement des déchets règle le traitement des déchets et la réduction de leur quantité, par récupération ou par destruction.

L'un des principes fondamentaux est celui de la valorisation des déchets. Ce principe s'applique partout où cela est financièrement et techniquement possible. Les sous-produits du bois des entreprises de transformation du bois doivent donc être utilisés en priorité (par exemple comme matière première pour la fabrication de panneaux de particules) ou valorisés dans la production d'énergie. Leur élimination sous forme de combustion sans production d'énergie ou leur mise en décharge n'entre en considération que si aucune utilisation n'est possible.

**OSubst – Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement**

L'Ordonnance sur les substances régit l'évaluation de l'écocompatibilité et la gestion des diverses substances. Elle fixe entre autres les exigences qualitatives pour les engrais (par exemple teneur minimale en substances nutritives et teneur maximale en substances dangereuses) et les agents d'amélioration des sols (amendements).

L'utilisation des cendres provenant de la combustion dans les chauffages au bois est en principe possible dans l'agriculture en tant qu'engrais ou amendement. Les limites imposées à la teneur en métaux lourds se conforment aux limites imposées au compost où le chrome, le zinc et le cadmium peuvent se révéler problématiques.

## 2. Production de chaleur

---

2.1	Processus de combustion du bois à l'état naturel	27
	Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	29
	Monoxyde de carbone, hydrocarbures, goudrons et suie	29
	Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> )	30
	Poussière	31
	Dioxine et furane	31

---

2.2	Sous-produits de transformation du bois	32
	Substances dangereuses émises lors de la combustion de bois à l'état non naturel	32
	Conséquences pour l'utilisation des sous-produits du bois	32

---

2.3	Aperçu des bois de chauffage et autres combustibles bois d'après l'OPair 92	34
-----	---	----

---

2.4	Technique de chauffage	35
	Exigences en matière de construction d'un bon chauffage au bois	35
	Comportement de la combustion dans les différents types de chaudières	36

---

2.5	Régulation des chauffages automatiques au bois	38
	Régulation de la dépression	38
	Régulation de la puissance	38
	Régulation de la combustion	39

---

2.6	Epuration des gaz de combustion	41
	Séparation de la poussière et des métaux lourds	41
	Cyclone	42
	Electrofiltre	42
	Filtre en tissu et filtre en céramique	43
	Lavage	44
	Séparation de l'acide chlorhydrique HCl	44
	Dénitrification des gaz de combustion	44

---

2.7	Valeurs caractéristiques d'émission	45
-----	-------------------------------------	----

---

2.8	Rendement annuel de combustion de la chaudière	46
	Rendement technique de combustion	46
	Rendement de la chaudière	46
	Rendement annuel	47

---

## 2. Production de chaleur

### 2.1 Processus de combustion du bois à l'état naturel

Lors de la montée en température qui intervient dans l'enceinte de combustion, le bois est décomposé en gaz et en charbon de bois. Dès que les gaz entrent en contact avec l'air de combustion, ils se consomment en une longue flamme. Le bois est ainsi un combustible à *flamme longue*. Le charbon de bois sur le lit de braises brûle par contre lentement et en formant peu de flammes.

La partie libérée sous forme de gaz lors de l'échauffement se monte, selon l'essence de bois, à environ 80% à 90% du poids du bois. Les gaz combustibles provenant du bois sont le monoxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et les hydrocarbures (HC). Ces gaz doivent se consumer dans le foyer afin de ne pas parvenir dans l'environnement en tant que substances dangereuses.

Etant donné que le bois passe d'abord par un état gazeux et que les gaz se consomment ensuite en une flamme gazeuse, la combustion du bois est un processus à deux étapes. La première est la gazéification et la seconde est l'oxydation des gaz et du charbon de bois. Les substances dangereuses provenant des chauffages au bois peuvent donc se répartir entre celles provenant de la combustion incomplète et celles issues de la combustion complète.

Les substances dangereuses incomplètement consommées, soit le monoxyde de carbone, les hydrocarbures, les goudrons, la suie et les particules non brûlées peuvent être évitées au moyen d'un processus de combustion approprié. Pour ce faire, des températures suffisamment élevées sont indispensables, avec suffisamment d'oxygène et un bon mélange des gaz à l'air comburant.

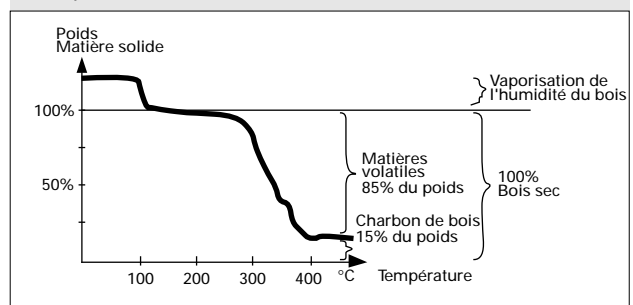
Par contre, les oxydes d'azote proviennent essentiellement de l'azote fixé dans le bois et la gestion de la combustion n'exerce qu'une faible influence sur leur quantité. De même, il y a des particules de cendres aussi en cas de combustion complète dans la mesure où elles sont entraînées avec les gaz de combustion. C'est pourquoi il faut prévoir un séparateur de poussière pour l'élimination des particules.

Etant donné que, lorsque les émissions de CO sont faibles, celles d'hydrocarbures, de goudrons et de suie sont également réduites, c'est le monoxyde de carbone qui sert de substance de référence pour

#### Le bois en tant que combustible

- Le bois est un combustible à flamme longue, riche en gaz.
- La combustion du bois se déroule selon deux étapes partielles:
  1. Gazéification du bois en gaz et formation de charbon de bois
  2. Oxydation des gaz (enceinte de combustion) et combustion du charbon de bois (lit de braises)

#### Comportement du bois lors de son échauffement



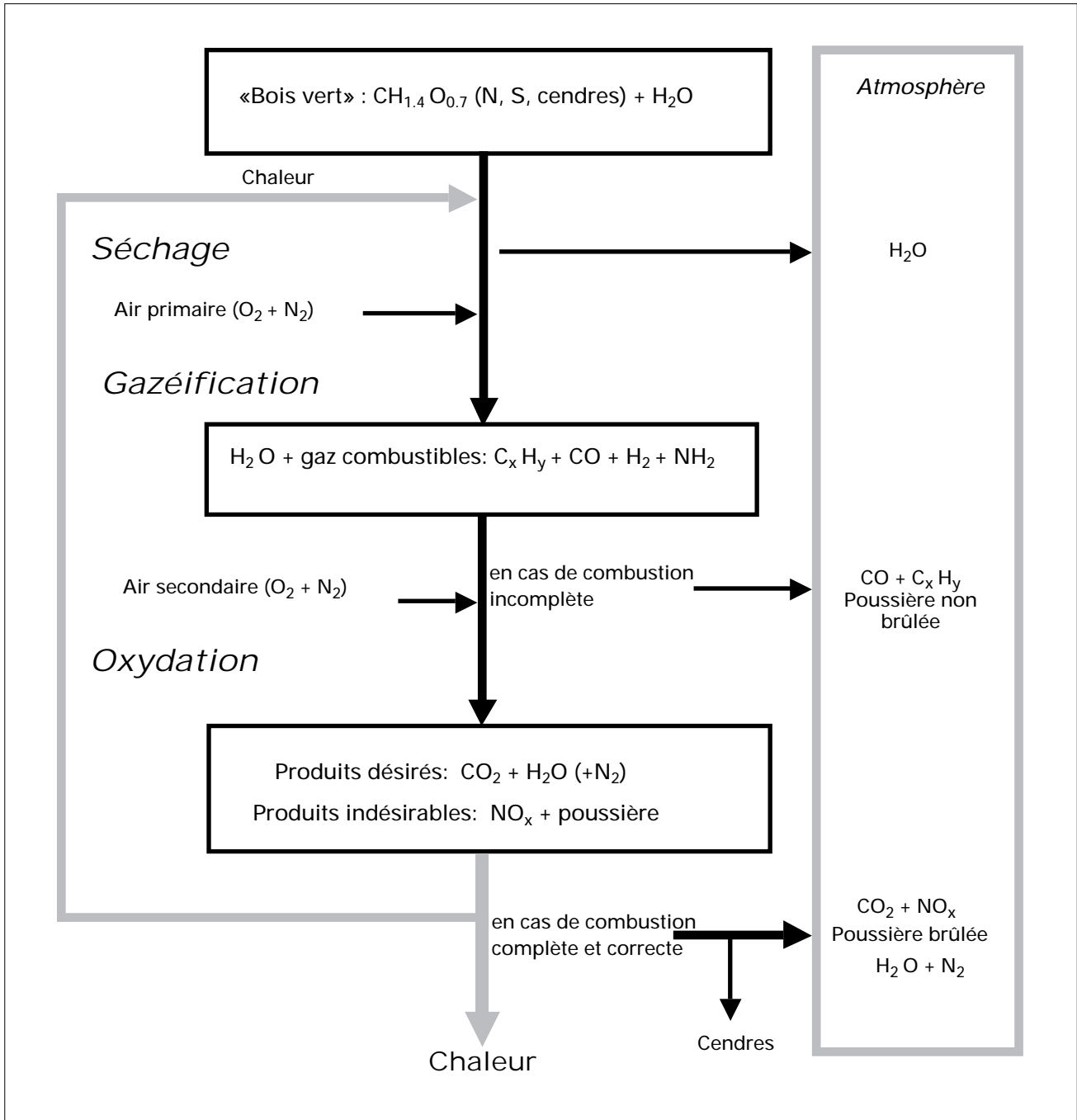
Lors de l'oxydation des produits de gazéification (85% du poids, près des 2/3 de l'énergie sont libérés, et 1/3 (15% du poids) par l'oxydation du charbon de bois. L'oxydation du charbon de bois dure à peu près deux fois plus longtemps que la gazéification du bois.

#### Matières dangereuses provenant de la combustion du bois

- Matières dangereuses provenant d'une combustion incomplète:
- monoxyde de carbone (CO);
  - hydrocarbures HC (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>);
  - goudron, suie;
  - particules non brûlées (part combustible de la poussière).

- Matières dangereuses provenant de la combustion complète:
- oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>);
  - particules de cendre (part incombustible de la poussière).

- Par ailleurs, les produits désirés suivants proviennent de la combustion complète:
- dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>),
  - vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O).



l'évaluation de la qualité de la combustion. C'est pourquoi l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) prescrit un seuil pour le monoxyde de carbone émis par les installations petites et moyennes. Pour les hydrocarbures par contre, des limites ne sont fixées que pour les installations à partir de 1 MW (chapitre 8).

### Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

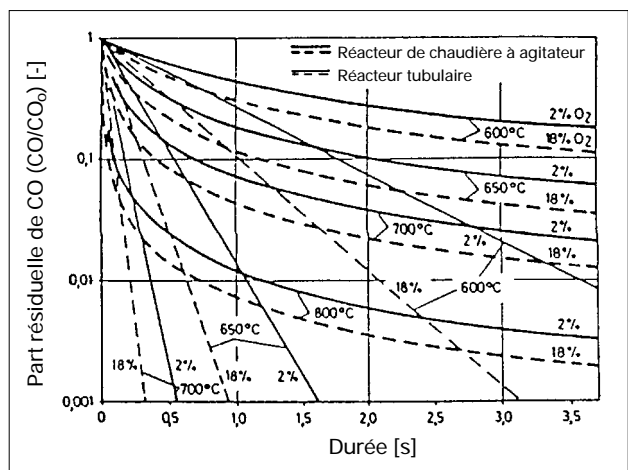
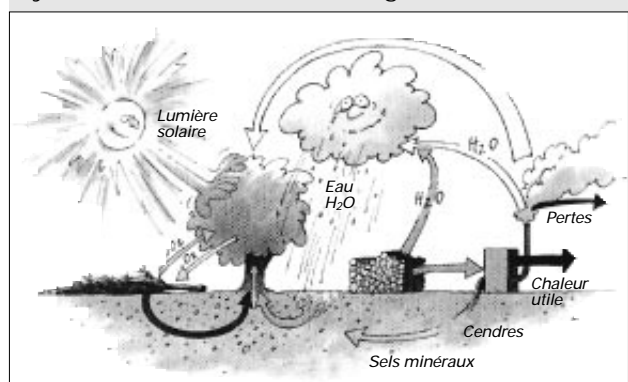
Le CO<sub>2</sub> est le produit de la combustion complète. En tant que gaz à effet de serre, il peut contribuer au réchauffement global de la planète, et c'est pourquoi l'utilisation des combustibles fossiles devrait être réduite. Par contre, l'utilisation du bois poussant en forêt ne provoque pas d'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>, car le dioxyde de carbone est de nouveau fixé dans le bois de la génération suivante d'arbres. Tant que l'on n'utilise pas plus de bois qu'il n'en pousse en forêt, l'utilisation de l'énergie du bois intervient suivant un cycle neutre du point de vue du CO<sub>2</sub>.

Monoxyde de carbone, hydrocarbures, goudrons et suie

Pour obtenir une bonne combustion et éviter les émissions de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures, de goudrons et de suie, les caractéristiques de la combustion du bois doivent être prises en compte lors de la conception du foyer :

- La longue flamme engendrée par la combustion du bois exige une enceinte de combustion de grande taille.
- Etant donné que les gaz et le charbon de bois brûlent séparément, l'air de combustion se répartit en air primaire et en air secondaire. L'air primaire est nécessaire à la gazéification et à la combustion du charbon de bois, l'air secondaire sert à la combustion des gaz.
- Pour obtenir une combustion complète, l'air secondaire doit être bien mélangé aux gaz combustibles.
- Une température de 800°C au moins est indispensable pour assurer la combustion complète, ainsi qu'une durée de séjour suffisante des gaz dans les zones à haute température. Ceci signifie que la flamme ne doit pas être prématurément refroidie, par exemple sur des parois froides. De plus, l'humidité du bois doit être adaptée à la chaudière et la combustion doit se faire dans le bon rapport combustible/air comburant.

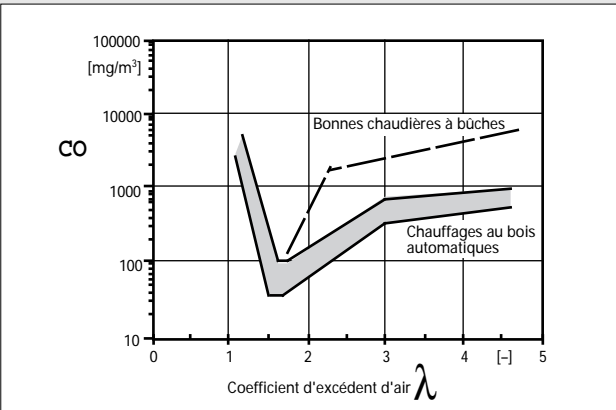
### Cycle de l'utilisation de l'énergie du bois



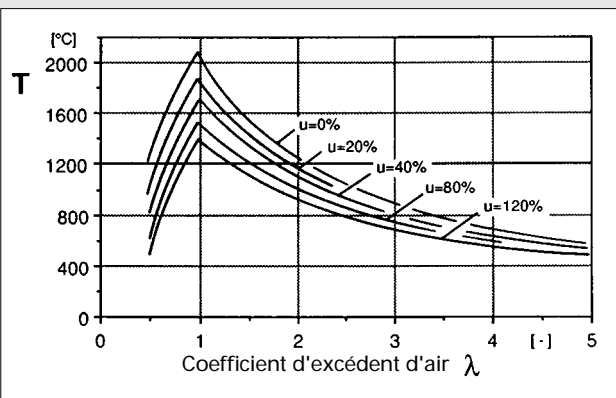
Part résiduelle de CO en fonction de la durée de séjour, de la température et de la teneur en oxygène.

La combustion est d'autant meilleure que la température est élevée et qu'elle est maintenue longtemps. Par ailleurs, l'enceinte de combustion joue un rôle décisif : dans un réacteur tubulaire (flux saturé, pas de mélange en retour entre les gaz et l'air comburant), on obtient pour la même durée de séjour une combustion de meilleure qualité qu'avec un réacteur de chaudière à agitateur (mélange en retour immédiat de tous les gaz dans l'enceinte de combustion). Pour le chauffage au bois, ceci signifie que les gaz combustibles doivent être mélangés aussi bien que possible avec l'air comburant et qu'il faut éviter des couloirs préférentiels dans l'enceinte de combustion. De plus, celle-ci doit correspondre à un réacteur tubulaire (direction univoque du flux d'écoulement, rapport longueur/diamètre aussi élevé que possible).

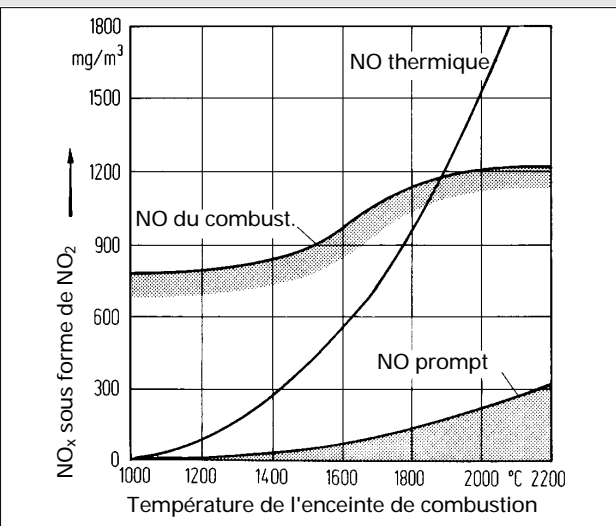
Emissions de monoxyde de carbone en fonction du coefficient d'excédent d'air lambda



Courbes adiabatiques (maximum théorique possible) de la température de combustion en fonction du coefficient d'excédent d'air lambda



Modes de formation des oxydes d'azote



Le rapport combustible/air se définit par le coefficient d'air excédentaire lambda, de la manière suivante :

$$\text{Lambda } \lambda [-] = \frac{\text{quantité d'air amené}}{\text{quantité minimum d'air nécessaire}}$$

Pour obtenir une combustion complète, il faut que lambda soit supérieur à 1, sinon on manquera ici ou là d'oxygène pour la combustion des gaz. Si, par contre, l'air excédentaire est trop important (lambda > 2...3), alors la flamme sera refroidie par l'air de telle sorte que la combustion sera incomplète du fait de la température trop basse.

Le coefficient d'air excédentaire se situe entre 1,5 et 2 dans les chauffages au bois modernes.

### Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Les oxydes d'azote peuvent provenir de l'azote contenu dans l'air comburant ou de l'azote contenu dans le combustible. Les oxydes d'azote provenant de l'air se forment à très haute température en tant qu'oxydes d'azote dits thermiques, par oxydation de l'azote contenu dans l'air. En plus, des oxydes d'azote dits « prompts » peuvent se former surtout lors de la combustion des gaz, par exemple dans des turbines.

Dans les chauffages au bois habituels, les températures de combustion sont inférieures à 1300°C, de telle sorte que les oxydes d'azote thermiques revêtent une importance minime. Par contre, le bois contient de l'azote dans l'arbre sous forme d'amines et de protéines nécessaires à sa croissance. En moyenne, le bois feuillu contient environ 0,1 à 0,2% de son poids d'azote, alors que le bois résineux en a un peu moins (0,05 à 0,1% de son poids). Etant donné que les panneaux de particules et les matériaux dérivés du bois contiennent parfois des durcissants ou des colles contenant de l'azote, la teneur en azote de ces assortiments peut être notablement plus élevée que celle du bois à l'état naturel, c'est-à-dire qu'elle peut atteindre jusqu'à près de 3% du poids du combustible.

Attendu qu'une partie de l'azote du combustible est oxydé en NO au moment de la combustion, les émissions d'oxydes d'azote dépendent de la teneur en azote du combustible.

Des efforts sont en cours en vue de remplacer la formation d'oxyde d'azote dans l'enceinte de combustion par le biais d'une combustion étagée afin de convertir plus d'azote du combustible en azote moléculaire (N<sub>2</sub>). Les premiers résultats de la recherche montrent que, dans des conditions appropriées, il est possible d'obtenir une diminution de près de 40% à 50%. La question de savoir dans quelle mesure ces procédés seront applicables en pratique reste ouverte pour le moment.

#### Poussière

Les émissions de poussière comprennent d'une part les particules non brûlées de goudron et de suie qui peuvent être évitées par une combustion complète ; d'autre part, des particules de cendre qui sont entraînées et provoquent de plus importantes émissions de poussière. Une partie des cendres est séparée dans l'enceinte de combustion sur la grille du foyer. Les cendres entraînées doivent être retenues par un dispositif séparateur en aval.

#### Dioxine et furane

Les processus de combustion peuvent provoquer la formation de composés polychlorés (dioxine et furane, PCDD/PCDF) lorsque les conditions suivantes sont réunies :

- présence de chlore provenant généralement du chlore qui se trouve dans le combustible (par exemple du PVC ou des panneaux de particules liés au chlorure d'ammonium) ;
- présence de composés carbonés non brûlés, par exemple sous forme de suie ou de poussière contenant des composés carbonés ;
- oxygène toujours présent en cas d'excédent d'air ;
- métaux lourds, cuivre en particulier, jouant le rôle de catalyseur dans la formation de dioxine ;
- températures situées entre 180°C et 500°C.

Ces conditions peuvent régner dans les installations de chauffage au bois, surtout dans les zones de refroidissement, par exemple dans l'échangeur de chaleur, dans le séparateur de poussières ou dans les conduits de fumée. En Allemagne, la limite de la teneur en dioxine lors de l'incinération des déchets ménagers est fixée à 0,1 ng TE/Nm<sup>3</sup> (TE = équivalent de toxicité). De plus, des mesures seront géné-

Teneur en azote et émissions de NO<sub>x</sub> de divers combustibles

Combustible	Teneur en azote en % du poids	Emissions de NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup> à 11% vol. O <sub>2</sub>
Pin	0.07	173
Hêtre	0.2	231
Panneaux de particules UF	2.85	921

ralement exigées à l'avenir (donc aussi pour les chauffages au bois) dès que la teneur en dioxine dépassera le seuil de 0,5 ng TE/Nm<sup>3</sup>. En Suisse par contre, aucune limite n'est prescrite pour la teneur en dioxine.

Lors de la combustion de bois à l'état naturel, seules de faibles quantités de dioxine sont formées (teneur typiquement comprise entre 0,01 et 0,2 ng TE/Nm<sup>3</sup>). Par contre, dans le cas de panneaux de particules durcis au chlorure d'ammonium ainsi qu'avec le bois de récupération, des émissions de dioxine notablement supérieures peuvent intervenir lors de la combustion, même dans de bonnes conditions de combustion. Les exigences minimales en vue d'éviter les émissions de dioxine, par exemple dans les chauffages à sous-produits du bois de transformation, consistent en une combustion totale des poussières en suspension, un excédent d'air réduit et le fonctionnement du séparateur de poussières à des températures inférieures à 180°C. Toutefois, pour éviter des émissions élevées de dioxine provenant des chauffages au bois, il faudra appliquer en particulier l'interdiction de brûler des déchets et du bois de récupération dans les chauffages au bois habituels.

**Matières dangereuses supplémentaires possibles lors de la combustion de bois non naturel**
**Dans les gaz de fumées :**

- NO<sub>x</sub>;
- SO<sub>2</sub>;
- HCl;
- chlorure d'ammonium (NH<sub>4</sub>Cl), sels;
- métaux lourds (Pb, Zn, Cd, Cu);
- dioxine (PCDD/F).

**Dans les résidus solides :**

- (cendres de foyer, du cyclone et des filtres) :
- métaux lourds (Pb, Zn, Cd, Cu);
  - dioxine (PCDD/F).

## 2.2 Sous-produits de transformation du bois

Substances dangereuses émises lors de la combustion de bois non naturel

Les sous-produits du bois qui n'ont pas été laissés à l'état naturel (panneaux de particules, matériaux dérivés du bois contenant de la colle, etc.) peuvent contenir encore de l'azote dans les colles et liants qu'ils comportent, ce qui peut provoquer, lors de la combustion, des émissions d'oxydes d'azote deux à trois fois plus élevées qu'avec du bois à l'état naturel.

Lorsque l'on se trouve en présence de chlore provenant de revêtements en PVC ou de panneaux de particules durcis au chlorure d'ammonium, la combustion entraîne la formation d'acide chlorhydrique (HCl), des émissions de sels et l'augmentation de la formation de dioxine.

Des métaux lourds tels que le plomb, le zinc, le cadmium ou le cuivre peuvent être contenus dans les peintures, vernis ou produits de préservation du bois. Ils provoquent, lors de la combustion des sous-produits de bois de transformation qui les contiennent, des émissions de métaux lourds dans les gaz de fumées ainsi qu'une contamination des résidus de combustion.

Les substances dangereuses évoquées, telles que l'acide chlorhydrique et les métaux lourds sont parfois notablement plus toxiques que le monoxyde de carbone ou les particules de cendre provenant du bois à l'état naturel. Par ailleurs, les résidus de combustion peuvent contenir en plus des métaux lourds et de la dioxine, ce qui exige leur élimination séparée.

Conséquences pour l'utilisation des sous-produits de bois de transformation

Seuls peuvent être employés dans un chauffage à sous-produits de bois de transformation les restes dont la teneur en chlore et en métaux lourds est négligeable. En particulier, aucun *bois de récupération* (par exemple bois de démolition et déchets de bois) ne doit être brûlé dans les chauffages conventionnels au bois, car le bois de récupération est pollué et pose des exigences plus élevées en matière d'épuration des gaz de combustion. Par ailleurs, aucun *revêtement PVC ni matériau imprégné (poteaux téléphoniques, traverses de chemin de fer*



ou clôtures de jardin) ne doivent être brûlés. Ce type de matériaux constitue des déchets de bois issus des ordures ménagères qui doivent être traités dans une installation d'incinération des ordures ménagères.

Il faut déterminer, dans le cas de la combustion de sous-produits de bois de transformation, d'après sa composition et d'après la grandeur de l'installation, quelles exigences doivent être satisfaites en matière d'épuration des gaz. En particulier, des exigences plus élevées sont posées dans les cas suivants :

- Sous-produits de bois de transformation à teneur élevée en azote :

Dès que le débit massique d'azote dépasse 2500 g/h, l'Ordonnance sur la protection de l'air impose un seuil de 250 mg/m<sup>3</sup> pour l'azote. Ceci s'applique aux installations à partir de 2,5 MW environ pour une teneur typique en NO<sub>x</sub> de 500 mg/m<sup>3</sup> des sous-produits de bois de transformation.

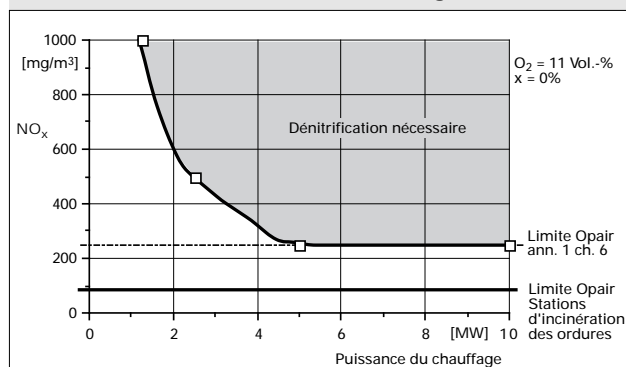
Conséquences: dénitrification des gaz de combustion.

- Sous-produits de bois de transformation à teneur élevée en chlore :

Le chlore n'est présent qu'à l'état de traces dans le bois à l'état naturel, de telle sorte qu'il n'y a pas d'émissions substantielles. Par contre, le chlore est un composant important du PVC ; c'est pourquoi aucun panneau de particules revêtu de PVC ne doit être brûlé dans les chauffages à sous-produits du bois. Par ailleurs, on rencontre aussi du chlore en tant qu'agent durcisseur de certains panneaux de particules (chlorure d'ammonium NH<sub>4</sub>Cl). Il y a formation d'acide chlorhydrique et de chlorure d'ammonium lors de la combustion de ces matériaux. Le chlorure d'ammonium peut exercer une influence sur la mesure des poussières, sous forme de dépôts de sel. Lors de l'emploi d'un filtre en tissu ou en céramique, le chlorure d'ammonium peut provoquer de plus l'obstruction du filtre en se cristallisant au moment de la mise en marche et de l'arrêt de l'installation. Il faut tenir également compte du fait qu'une teneur élevée en chlore favorise la formation de dioxine.

Conséquences: séparation du chlore, par exemple à l'aide d'un filtre en tissu à adjonction de chaux; évitement du collage des filtres, par exemple en les chauffant au moment du démarrage de l'installation.

#### Combustible à teneur en azote augmentée



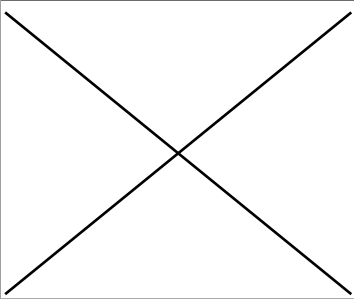
Teneur en NO<sub>x</sub> en fonction de la puissance du chauffage en tant que critère pour les mesures de dénitrification.

- Calcul du débit massique d'azote en g/h (voir l'annexe A4)
- Si le débit massique  $\geq 2500$  g/h, la limite d'oxyde d'azote est de 250 mg/m<sup>3</sup> (OPair, ann. 1, ch. 61/62).
- Si la limite est dépassée, la dénitrification des gaz de combustion est indispensable.

#### Combustible à teneur augmentée en chlore

- Calcul du débit massique en g/h (voir l'annexe A4).
- Si le débit massique  $\geq 300$  g/h, la limite pour les liaisons chlorées est de 30 mg/m<sup>3</sup> (OPair, ann. 1, ch. 61/62).
- Si la limite est dépassée, la séparation du chlore est indispensable.

### 2.3 Aperçu des bois de chauffage et autres combustibles bois d'après l'OPair 92

	Bois de chauffage (Opair ann. 5, ch. 3, al.1) (Opair ann. 3, ch. 522)			Autres bois (Opair ann. 5, ch 3, al.1) (Opair ann. 2, ch. 72 et 71)	
	Bois naturel en morceaux - bûches - briquettes/bois - brindilles - pives	Bois naturel pas en morceaux - plaquettes - copeaux - sciures - pouss. ponçage - écorces	Sous-produits transform. bois - industrie - artisanat - chantiers	Bois de récupération (bois usagé) - démol. bât. - transform., rénov. - emballages - meubles bois	Déchets de bois - imprégnés en autoclave avec produits de préservation du bois - revêtement renfermant des composés organo-halogénés
Gaz de combustion	CO et HC NO <sub>x</sub> Poussière				
			év. + NO <sub>x</sub> jusqu'à 3-4 fois év. + HCl (év. > 30 mg/m <sup>3</sup> ) év. + SO <sub>2</sub> (généralement faible) év. + dioxine (généralement faible)	+ NO <sub>x</sub> (jusqu'à 2-3 fois) + HCl + SO <sub>2</sub> (généralement faible) + métaux lourds + dioxine	
Résidus	Généralement non chargés		Généralement chargés év. + sels év. + dioxine	Chargés + sels + métaux lourds + dioxine	

Il convient d'observer, pour les résidus de transformation des scieries, que l'on emploie souvent la notion de *sous-produits de scierie*. Il s'agit toutefois ici de bois à l'état naturel, sous une autre forme qu'en morceaux, et non de sous-produits de transformation du bois au sens de l'OPair.

## 2.4 Technique de chauffage

Exigences en matière de construction d'un bon chauffage au bois

La condition préalable à toute bonne combustion consiste à brûler complètement les gaz à haute température. Pour ce faire, l'enceinte de combustion doit être suffisamment grande et la flamme ne doit pas être affectée par des parois froides. Pour obtenir une température de combustion élevée, il faut aussi que le rapport combustible-air soit bien réglé, c'est-à-dire que le chauffage sera exploité avec un excédent d'air optimal.

Pour que les gaz combustibles brûlent dans l'enceinte de combustion, il faut qu'ils entrent en contact avec l'air comburant. L'air doit donc être bien mélangé avec les gaz combustibles, par l'arrivée d'un flux suffisamment rapide ou à l'aide de dispositifs mélangeurs.

Pour réunir les conditions nécessaires à une combustion complète, la gazéification des éléments solides et la combustion des gaz dans l'installation de chauffage doivent intervenir en des endroits séparés. Pour ce faire, l'air primaire est amené sur le lit de braises, puis les gaz sont mélangés à l'air secondaire, de telle sorte qu'ils se consomment sans encombre dans l'enceinte de combustion.

On peut distinguer trois types de chaudières à grille selon la direction du déplacement du combustible et des gaz : flux continu, flux inversé et flux médian. Dans le cas de combustible humide, une partie de l'énergie libérée par la combustion sert à la vaporisation de l'eau. Un manteau de rayonnement sur le combustible garantit une température de gazéification élevée. C'est pourquoi l'on préfère, pour les combustibles à forte teneur en eau, les chaudières à grilles appliquant le principe du flux inversé. On a plus généralement recours au flux continu dans le cas des combustibles secs.

Un dispositif automatique d'évacuation des cendres est nécessaire avec les combustibles riches en cendres. La cendre provenant du bois à l'état naturel a une température de ramollissement de près de 1400°C alors que la fusion intervient au-dessus de 1600°C.

### Exigences en matière de technique de chauffage

- Répartition de l'air de combustion entre air primaire et air secondaire.
- Bon mélange de l'air secondaire et des gaz combustibles.
- Durée de séjour suffisante des gaz dans l'enceinte de combustion chaude.
- Enceinte de combustion bien isolée (température élevée).

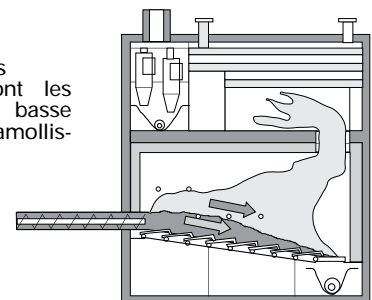
### A observer lorsque le combustible est humide

- De la chaleur est nécessaire pour l'évaporation de l'eau, ce qui provoque un abaissement de la température de combustion.
- Pour assurer le séchage préalable du combustible, on utilisera un plan de rayonnement, respectivement une enceinte de combustion appliquant un procédé à contreflux.

### Modes de construction des foyers à grille

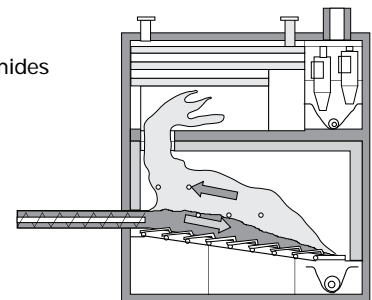
#### Flux continu

- Combustibles secs
- Combustibles dont les cendres ont une basse température de ramollissement



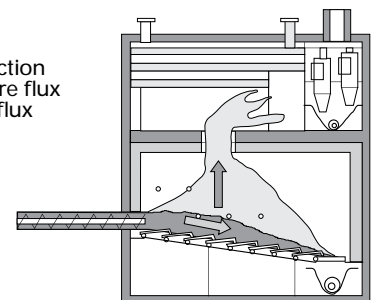
#### Contreflux

- Combustibles humides



#### Flux médian

- Mode de construction intermédiaire entre flux continu et contreflux



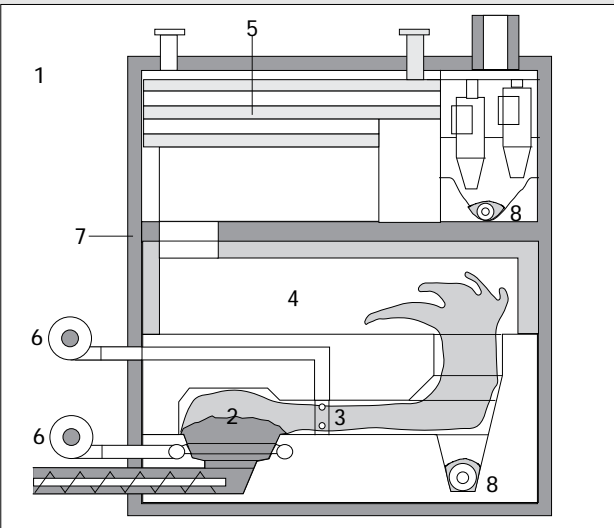
Combustible riche en cendres

- Evacuation automatique des cendres
- Les impuretés abaissent la température de ramollissement, d'où danger de scorification.

Les impuretés contenues dans le combustible (peintures, vernis ou métaux) provoquent l'abaissement des températures de ramollissement et de fusion des cendres. Ceci entraîne la scorification et l'encrassement de la grille, de la cornue et des parois. Après refroidissement, les dépôts recuits (mâchefer) ressemblent à du verre et sont très difficiles à éliminer.

Comportement de la combustion dans les différents types de chaudières

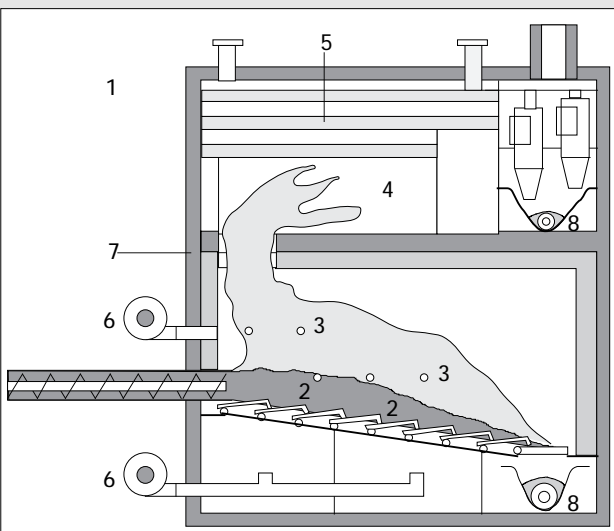
Foyer à poussée inférieure



Foyer à poussée inférieure

Un dispositif d'alimentation pousse le combustible depuis le bas dans le foyer proprement dit (cornue). Une partie de l'air de combustion est injecté au niveau de la cornue en tant qu'air primaire. C'est là qu'interviennent le séchage et la gazéification du combustible ainsi que l'oxydation du charbon de bois. Pour oxyder complètement les gaz combustibles, l'air secondaire est mélangé à ceux-ci avant de pénétrer dans la chambre de postcombustion. Ensuite, les gaz restituent leur chaleur dans l'échangeur de chaleur, passent par le dispositif de dépoussiérage à inertie et parviennent enfin dans l'atmosphère par la cheminée.

Foyer à grille mobile



Foyer à grille mobile

Un dispositif d'alimentation pousse le combustible sur une grille. Les mouvements alternés en avant et en arrière des éléments de la grille déplacent lentement le combustible vers le bas. L'élimination des centres est automatique en bout de grille. Une partie de l'air comburant est injecté au travers de la grille (air primaire).

1. Construction étanche du chauffage et du raccordement à la cheminée.
2. Zone chaude de gazéification avec aménée d'air primaire pour la gazéification du bois et pour la combustion du charbon de bois.
3. Bon mélange des gaz combustibles et de l'air secondaire. Pour obtenir des vitesses de flux élevées, la section de l'enceinte de combustion peut, par exemple, être réduite à l'emplacement de l'injection.
4. Chambre chaude de postcombustion pour la combustion totale des gaz. La flamme ne doit pas être gênée en entrant en contact avec les parois froides.
5. Transfert de la chaleur dans l'échangeur de chaleur en aval de l'enceinte de combustion.
6. Ventilateur pour l'injection de l'air comburant.
7. Bonne isolation thermique pour éviter les pertes par rayonnement.
8. Evacuation automatique des cendres.

Le séchage du combustible intervient dans la partie haute de la grille, la gazéification du bois se produit au milieu de celle-ci et le charbon de bois brûle dans la partie inférieure. La chaudière à grille permet ainsi une adaptation optimale en fonction du comportement du combustible ; en effet, dans les grandes installations du moins, l'air primaire est injecté sous la grille sur différentes zones selon les besoins. L'air secondaire se mélange avec les gaz combustibles au-dessus de la grille. Les gaz brûlent complètement dans la chambre de postcombustion, restituent leur chaleur dans l'échangeur de chaleur, passent par le dispositif de dépoussiérage à inertie et parviennent enfin dans l'atmosphère par la cheminée.

La grille assure la fonction de transport, du tisonnage (modification de l'épaisseur locale du lit de combustible) et de la circulation du combustible. Il y a différents types de grilles qui se distinguent essentiellement par leur inclinaison et par leur mode de déplacement. Les foyers à grille mobile sont réalisés à flux continu, médian ou inversé.

#### *Avant-foyer, précombustion*

Un système à précombustion est un foyer comprenant une alimentation en combustible sur une grille et une amenée d'air. La partie foyer se compose généralement d'un système de grille selon le principe du flux continu. Le rôle de la chambre de postcombustion et de l'échangeur de chaleur est assumé par une chaudière située en aval.

#### Fonctions de la grille

- Transport du combustible et des cendres
- Tisonnage du combustible et du lit de braise
- Retournement du combustible et du lit de braise

#### Types de grilles

- Position:
- horizontale
  - inclinée
- Mouvement:
- non mobile
  - mobile
    - séquentielle
    - continue

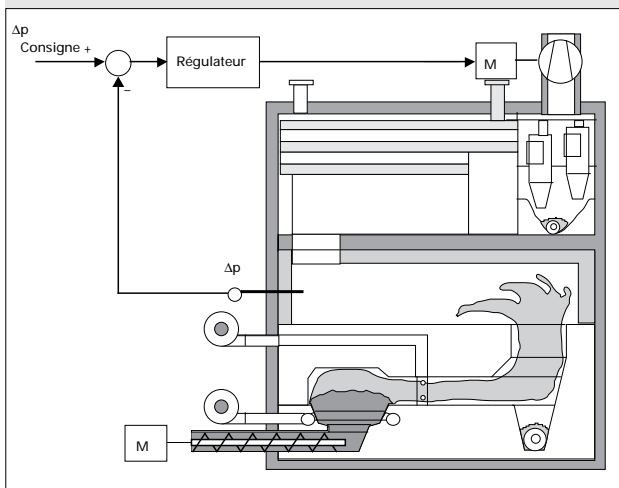
## Circuits de régulation importants

- Régulation de la dépression
- Régulation de la puissance
- Régulation de la combustion

## 2.5 Régulation des chauffages automatiques au bois

L'installation de chauffage automatique à plaquettes de bois doit être dotée de divers circuits de régulation pour obtenir une exploitation impeccable et à faibles émissions.

## Régulation de la dépression



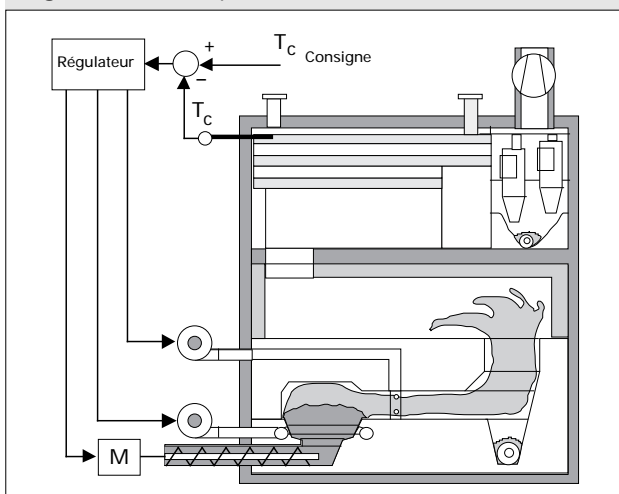
Mesure de la dépression de l'enceinte de combustion  $\Delta P$  et régulation du ventilateur des gaz de combustion pour le maintien d'une dépression constante.

## Régulation de la dépression

Une sonde de pression mesure la dépression  $\Delta p$  dans l'enceinte de combustion. Les écarts constatés par rapport à la valeur de consigne sont évités par le biais de la modification de la vitesse de rotation du ventilateur des gaz de combustion.

La régulation de la dépression assure une dépression constante dans le foyer et évite la sortie de gaz combustibles et toxiques dans la chaufferie. Elle facilite l'arrivée de l'air primaire au travers du lit de braises et permet aussi le maintien de conditions constantes indépendantes du tirage de la cheminée. Par ailleurs, une dépression constante facilite le réglage grossier de la puissance désirée et de la quantité d'air de combustion.

## Régulation de la puissance



Mesure de la température de la chaudière  $T_c$  (température de l'eau de départ) et régulation des quantités de combustible et d'air en fonction des besoins de chaleur.

## Régulation de la puissance

Quand les besoins en puissance calorifique changent, la température  $T_c$  de la chaudière augmente ou diminue. La régulation de la puissance modifie la puissance de chauffage dans les limites d'une plage donnée pour l'adapter à la puissance requise. Les chauffages automatiques sont dotés d'une régulation de la puissance permettant une exploitation modulaire à plusieurs niveaux ou en continu. La différence entre la valeur de consigne et la valeur effective de la température de la chaudière entraîne la variation de quelques pour-cent de la puissance nominale de l'amenée de combustible et d'air comburant. La plupart des chauffages au bois automatiques modernes permettent la régulation de la puissance entre 50% et 100%, voire même entre 30% et 100% pour les installations à partir de 100 kW et à condition que la teneur en eau du combustible ne soit pas trop élevée. En dessous de ce seuil de puissance requise, les installations sont le plus souvent exploitées en mode marche/arrêt.

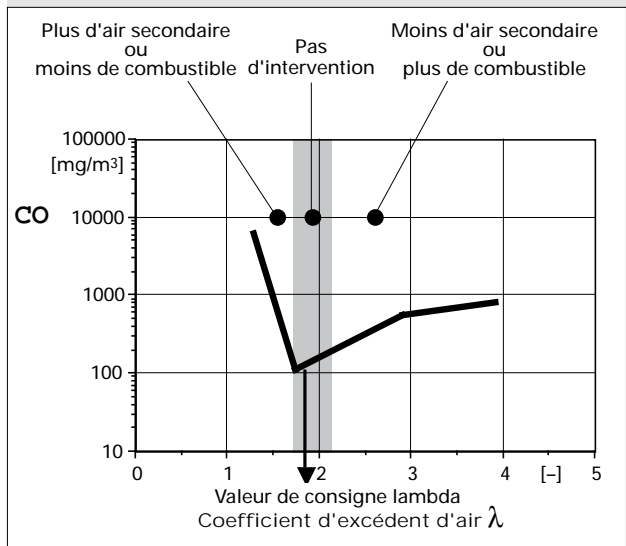
La régulation de la puissance permet d'accroître le taux d'utilisation annuelle en évitant les pertes en attente.

### Régulation de la combustion

La régulation de la combustion est un complément à la régulation de la dépression et à celle de la puissance. Elle sert à assurer une qualité élevée de la combustion. Une bonne combustion ne peut être obtenue dans un chauffage au bois que si le rapport combustible/air est optimal.

Etant donné que les caractéristiques du combustible peuvent être changeantes (densité en vrac, humidité, essence de bois, etc.), l'installation doit être réglée de nouveau lors de chaque changement de combustible. Comme ceci est rarement possible en pratique, les chauffages automatiques sont dotés d'une régulation de la combustion qui surveille celle-ci et la régule de manière optimale. Aujourd'hui, on rencontre surtout la régulation de la température et la régulation lambda; elles fonctionnent de la manière décrite ci-après.

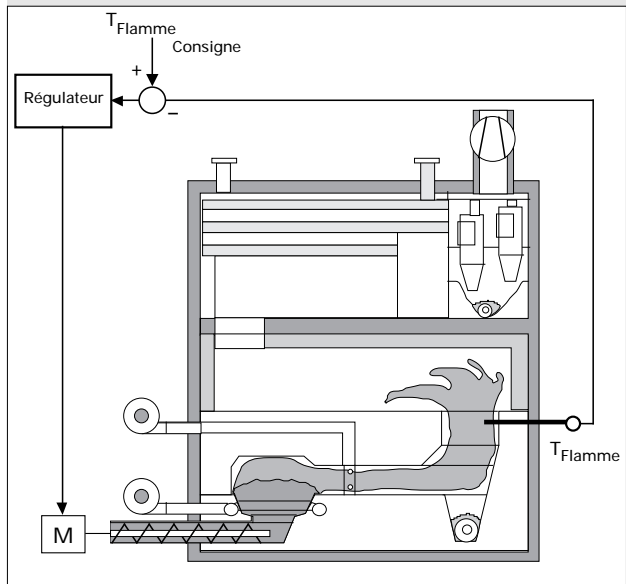
Principe de fonctionnement de la régulation de la combustion reposant sur la caractéristique CO/lambda

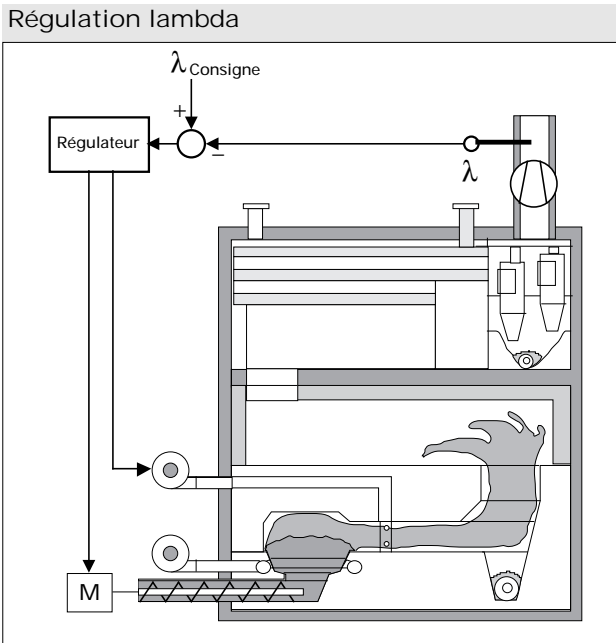


### Régulation de la température de combustion

Mesure de la température de flamme ou du foyer. Lorsque la température est trop basse, l'alimentation en combustible est accélérée; elle est réduite si la température est trop élevée.

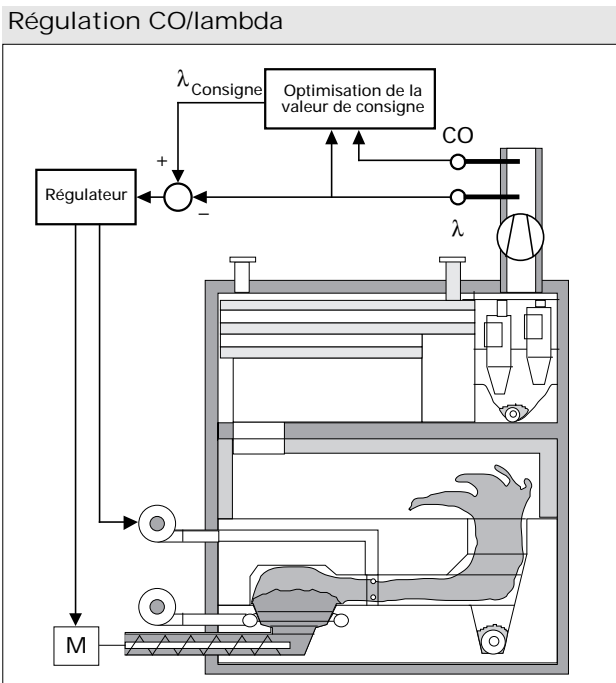
Régulation de la température de combustion





Régulation lambda

Mesure de l'excédent d'air, par exemple à l'aide d'une sonde lambda, et régulation de la quantité de combustible ainsi que, éventuellement, régulation fine de l'air secondaire.



Régulation CO/lambda

Mesure de l'excédent d'air et de la teneur en monoxyde de carbone, par exemple à l'aide d'une sonde lambda et d'une sonde CO. Par rapport à la régulation lambda seule, on obtient ainsi une optimisation de la valeur de consigne lambda permettant l'adaptation à toutes les caractéristiques du combustible.

En complément aux régulations mentionnées de la puissance et de la combustion, les chaudières à grille utilisent aussi la régulation de la couche. Plusieurs détecteurs optiques permettent de déterminer la hauteur du lit de braises en différents endroits sur toute la longueur de la grille. La régulation de l'amenée de combustible et le mouvement de certains éléments de la grille maintiennent le lit de braises à un niveau constant, ce qui permet la répartition égale de l'air primaire et une meilleure séparation des processus de gazéification et d'oxydation.



## 2.6 Epuration des gaz de combustion

Généralement, la séparation des poussières par cyclone suffit pour respecter le seuil de  $150 \text{ mg/Nm}^3$  (jusqu'à 5 MW) lorsque le combustible est du bois à l'état naturel. Par contre, les sous-produits de bois de transformation peuvent contenir de nombreuses matières indésirables et polluantes :

- pierres, sable ;
- clous, vis ;
- colles ;
- durcisseurs ;
- peintures, vernis, produits de préservation du bois ;
- revêtements, etc.

Ces matières peuvent provoquer le dégagement des substances dangereuses suivantes :

- poussières ;
- métaux lourds ;
- oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) ;
- acide chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ) ;
- chlorure d'ammonium ;
- hydrocarbures (en cas de mauvaise combustion).

D'après l'assortiment et la composition des sous-produits de bois de transformation, une épuration poussée des gaz de combustion peut être nécessaire. Il s'agit de procédés de séparation des poussières, des métaux lourds et de l'acide chlorhydrique, ainsi qu'éventuellement de réduction de la quantité d'oxydes d'azote.

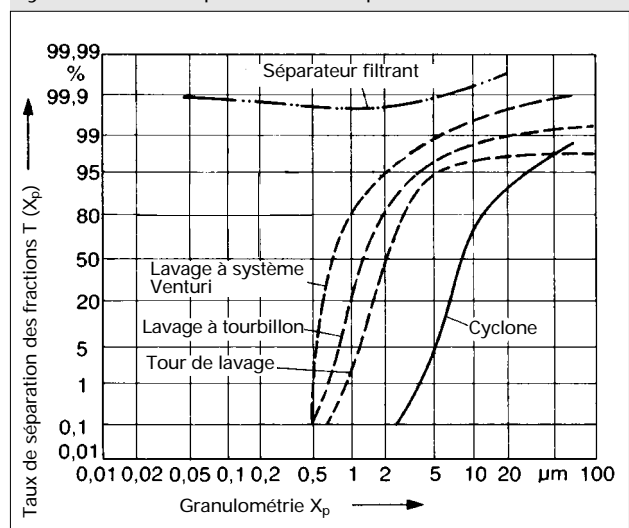
Séparation de la poussière et des métaux lourds

Les émissions de poussière lors de la combustion du bois à l'état naturel se composent de particules de poussière ainsi que de suie et de matières non consommées. La suie peut être évitée par la combustion complète.

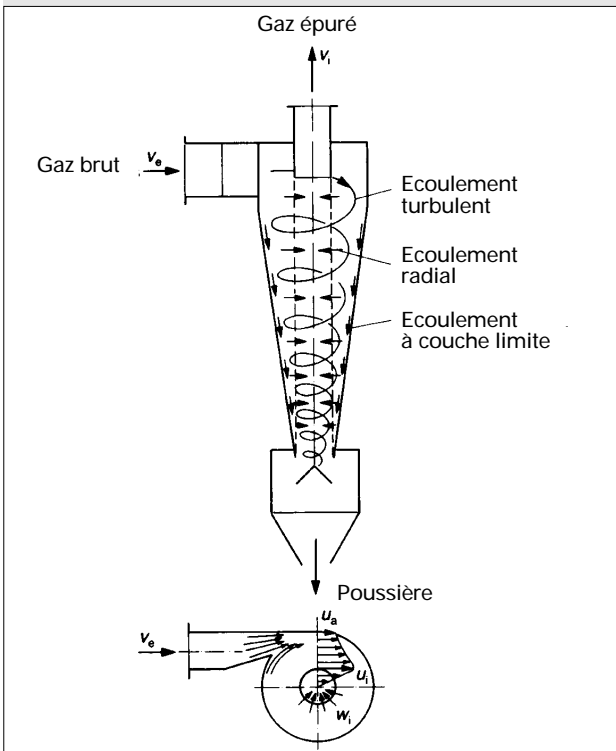
Il s'y ajoute, lorsque l'on brûle des sous-produits du bois, les émissions suivantes sous forme de poussière ou de particules solides :

- métaux lourds tels que le plomb, le zinc, le cadmium si le combustible contient, par exemple, des peintures ou des produits de préservation du bois ;
- matières solides sous formes de sels, par exemple chlorure d'ammonium.

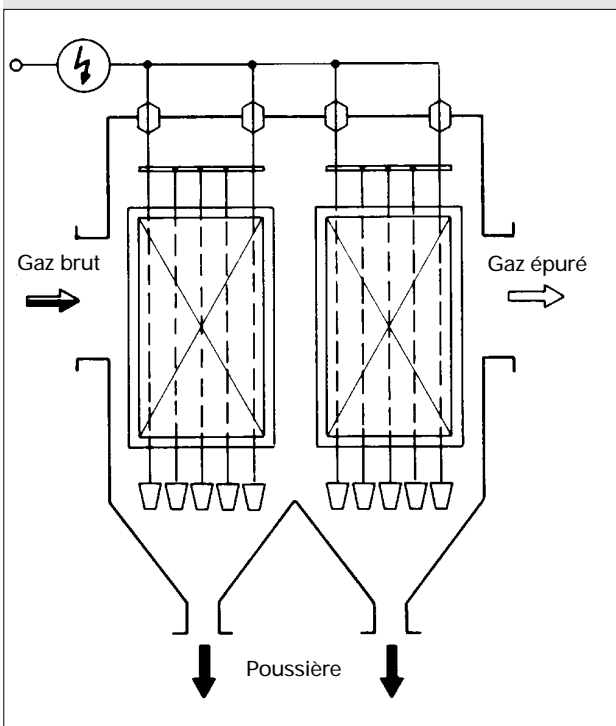
Taux de séparation des fractions de différents systèmes de séparation des poussières



## Cyclone



## Electrofiltre



Les métaux lourds peuvent être retenus dans une grande mesure à l'aide d'un séparateur de poussière. Toutefois, étant donné que la limite est plus sévère pour les métaux lourds, le séparateur de poussière doit être plus élaboré que dans le cas de la combustion de bois à l'état naturel. Les limites s'appliquant aux métaux lourds sont généralement respectées tant que la teneur en poussière se situe au-dessous de  $10 \text{ mg/m}^3$ . Par ailleurs, l'emploi d'électrofiltres, de filtres en tissu ou en céramique est indispensable: l'utilisation d'un cyclone ne suffit pas.

## Cyclone

Principe de séparation: un mouvement rotatif du flux entraîne les particules de poussière vers les parois extérieures du cyclone où elles tombent dans le réceptacle à poussière. Le gaz débarrassé de ses poussières est évacué par une tubulure centrale. Le degré de dépolluage d'un cyclone dépend de la grandeur et de la densité des particules, de la géométrie et de la perte de pression dans le cyclone.

L'effet de séparation des cyclones est limité. En fonction de la granulométrie et du type de poussière, les particules à partir de  $2$  à  $5 \mu\text{m}$  environ peuvent être séparées. Les valeurs typiques des gaz épurés des chauffages au bois se situent entre  $50$  à  $200 \text{ mg/m}^3$ . L'étanchéité du cyclone et de l'évacuation des poussières joue un rôle important pour le bon fonctionnement d'un cyclone, car la présence d'air parasite réduit les performances de séparation. La limite de poussière de  $150 \text{ mg/m}^3$  peut généralement être respectée avec un bon chauffage au bois doté d'un cyclone. Les cyclones les plus avantageux constituent les procédés de séparation des poussières les plus importants jusqu'à  $5 \text{ MW}$  de puissance. Toutefois, ils ne suffisent plus quand le combustible contient une forte proportion de particules fines (poussière de ponçage par exemple), car leur effet séparateur devient alors insuffisant.

## Electrofiltre

Principe de séparation: les particules de poussière sont chargées négativement dans un champ électrique intense; elles sont ensuite attirées par des électrodes de dépôt chargées positivement où elles restent collées; un dispositif mécanique les enlève par tassement.

Un électrofiltre permet d'atteindre des teneurs en poussière de 5 à 20 mg/m<sup>3</sup>. La limite de 50 mg/m<sup>3</sup> pour les chauffages au bois de plus de 5 MW de puissance peut ainsi être respectée. Comparés aux filtres en tissu, les électrofiltres ont une perte de pression moindre et sont moins sensibles aux flammèches. Leurs inconvénients sont leur coût élevé et leur encombrement.

Il peut y avoir formation de dioxine avec un électrofiltre, du fait du champ électrique. Pour l'éviter, la température ambiante de service du filtre ne devrait pas dépasser 130°C.

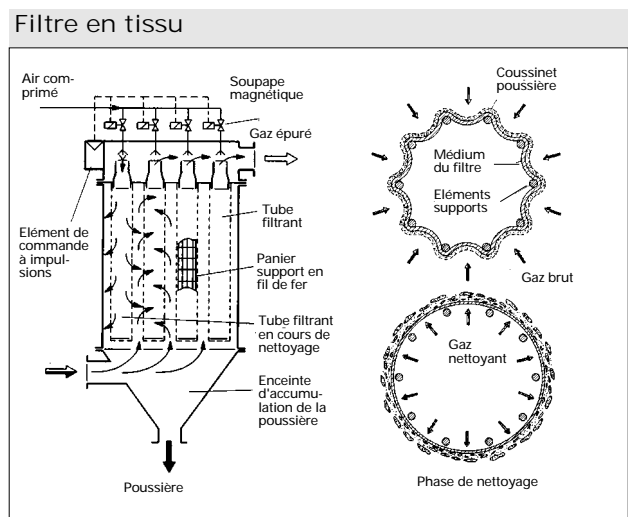
### Filtre en tissu et filtre en céramique

Principe de séparation: les gaz contenant de la poussière s'écoulent au travers d'un tissu poreux ou d'une couche de feutre de telle sorte que la poussière est séparée et se dépose sur le filtre. Le filtre est périodiquement nettoyé de la poussière qui s'y est déposée, soit par reflux de gaz épuré, soit à l'aide d'air comprimé. L'adjonction de chaux permet d'éliminer en même temps l'acide chlorhydrique (HCl).

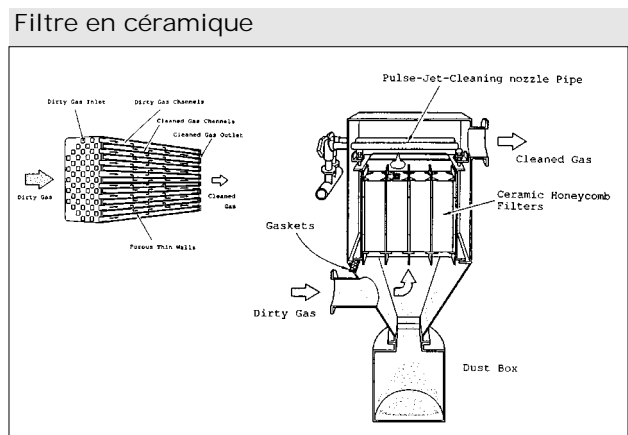
Le matériau utilisé pour le filtre est soit du tissu, soit du feutre. Les filtres sont alors nommés filtre en tissu ou filtre en non-tissé. Par ailleurs, on utilise aussi des fibres non organiques en céramique ou en métal. Les filtres sont alors nommés filtres en céramique ou filtres métalliques.

D'après le type de filtre et la composition de la poussière, on peut obtenir des valeurs de gaz épurés de 2 à 20 mg/m<sup>3</sup>. La température de sortie admissible des gaz de combustion est limitée par la nature du matériau du filtre. Les filtres en tissu peuvent supporter jusqu'à 250°C environ au maximum, alors que la température maximale admissible pour les filtres en céramique peut atteindre 400°C, voire même 800°C dans certains cas.

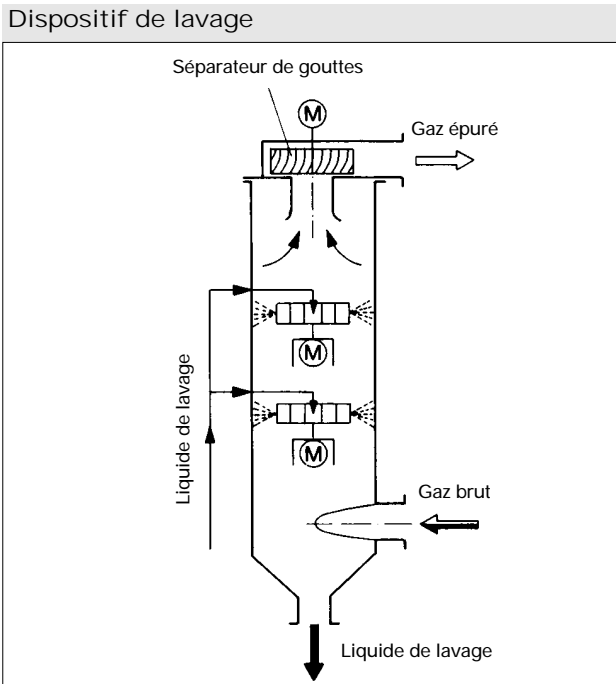
Le risque que posent les flammèches pour les filtres en tissu peut être éliminé par le montage d'un cyclone en amont, ou par des tôles de déflexion. Des températures excessives sont évitées par l'adjonction d'air externe ou par le recours à une conduite de dérivation. On peut éviter de passer en dessous du point de condensation lors du démarrage de l'installation de chauffage à l'aide d'une dérivation ou d'un chauffage électrique auxiliaire. La température de service doit être inférieure à 180°C afin d'éviter la formation de dioxine.



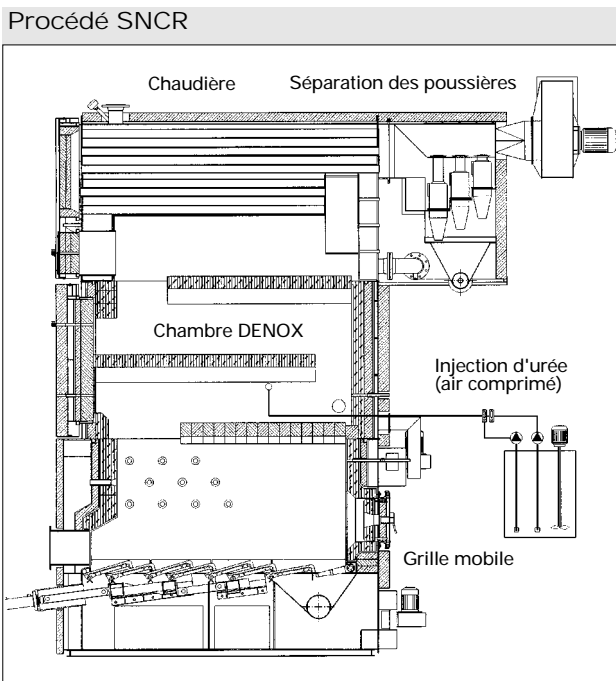
Structure d'un filtre tubulaire à nettoyage à pression et phases de filtration et de nettoyage d'un filtre tubulaire



Filtre en céramique construction en nid d'abeille  
A gauche: nid d'abeille, à droite: unité de filtre



Dispositif de lavage rotatif à deux étages



Chauffage à foyer à poussée sur grille mobile de 450 kW équipé d'une enceinte SNCR en aval et d'un dispositif d'injection d'urée.

## Lavage

Principe de séparation: la poussière est entraînée dans un mouvement tourbillonnant avec le liquide de lavage, de telle sorte que même les petites particules sont retenues dans un séparateur. Etant donné que les cendres de bois sont peu mouillables, les dispositifs de lavage ne conviennent pas très bien à la séparation de la poussière issue des chauffages au bois. Par contre, un tel dispositif peut éliminer l'acide chlorhydrique par exemple. De toute façon, le traitement préalable du liquide de lavage est indispensable. Cette nécessité de traiter préalablement l'eau ajoutée à la difficulté d'utilisation d'un séparateur pour les cendres de bois fait que les dispositifs de lavage ne revêtent qu'un intérêt limité dans le cas des chauffages au bois.

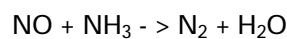
## Séparation de l'acide chlorhydrique HCl

Le chlore présent dans le combustible se manifeste dans les gaz de combustion sous forme d'acide chlorhydrique qui s'élimine, par exemple, à l'aide de chaux associée à un filtre en tissu.

Toutefois, l'acide chlorhydrique peut aussi être éliminé à l'aide d'un liquide basique dans un dispositif de lavage. Mais l'eau de lavage devant être préalablement traitée, le recours à de tels dispositifs est rare dans le cas de chauffages aux sous-produits de bois de transformation.

## Dénitrication des gaz de combustion

L'Ordonnance sur la protection de l'air prescrit une teneur limite en oxydes d'azote de 250 mg/m<sup>3</sup> dans la mesure où le débit massique d'azote dépasse 2500 g/h (voir l'annexe A3). Lors de la combustion de résidus de panneaux de particules avec une teneur en azote de l'ordre de 500 mg/m<sup>3</sup>, la dénitrification des gaz de combustion devient ainsi indispensable à partir de 2,5 MW de puissance environ. On pulvérise un agent réducteur (ammoniac ou urée) qui entraîne la conversion des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) en azote atmosphérique N<sub>2</sub>:



Lorsque les conditions de réaction sont défavorables, de l'ammoniac ou du gaz hilarant (dioxyde d'azote) peut être libéré. Les procédés suivants sont actuellement utilisés dans des installations pilotes:

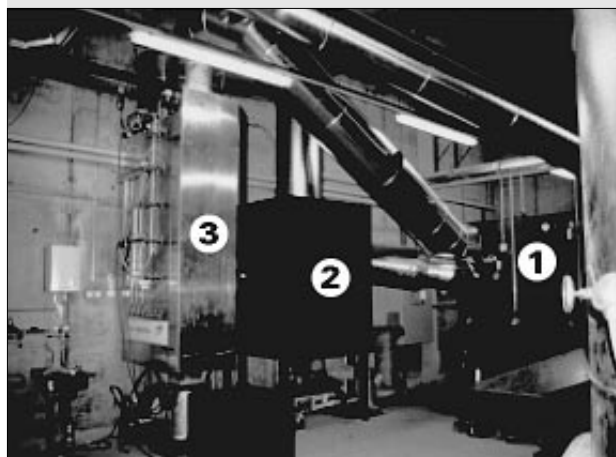
Procédé SNCR (réduction sélective non catalytique)

- Réduction de l'oxyde d'azote par pulvérisation d'ammoniac ou d'urée dans la chambre de combustion chaude à 850-950°C. Etant donné qu'une enceinte chaude est indispensable pour la réduction de l'oxyde d'azote, ce procédé convient avant tout aux nouveaux équipements. Il s'agit dans ce cas de tenir compte de l'importance du volume de la construction (hauteur!).

Procédé SCR (réduction catalytique sélective)

- Réduction de l'oxyde d'azote par pulvérisation d'ammoniac ou d'urée dans les gaz de combustion après la chaudière pour provoquer une réaction dans un catalyseur à 250-450°C. Ce procédé convient aussi à l'équipement ultérieur d'installations existantes.

Procédé SCR



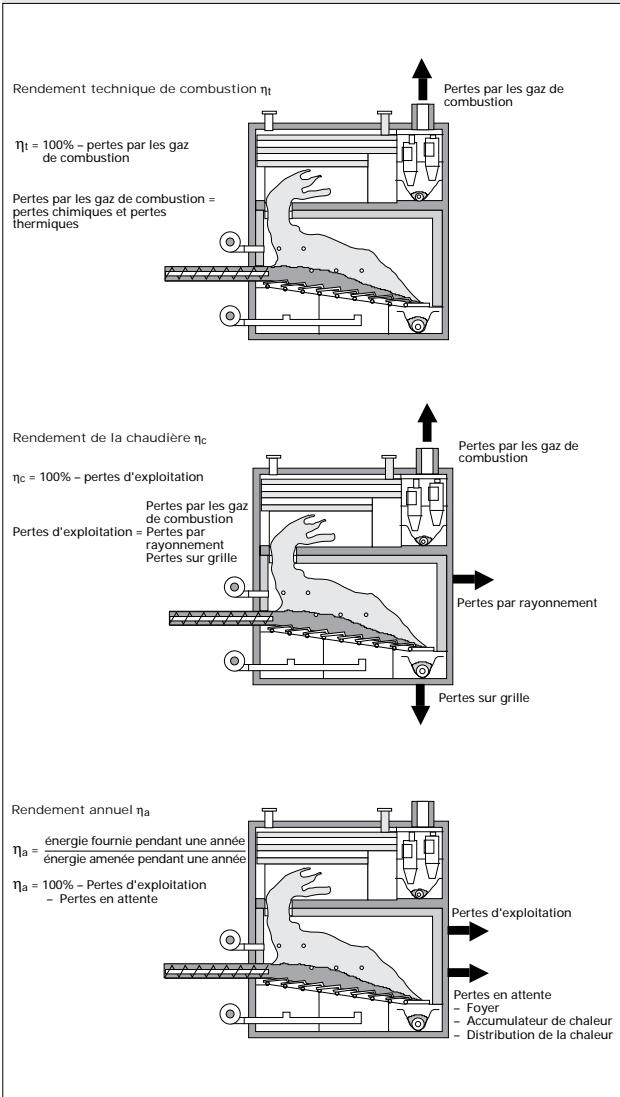
- 1 Chaudière
- 2 Multicyclone
- 3 Catalyseur

## 2.7 Valeurs caractéristiques d'émission

Les valeurs de combustion caractéristiques approximatives suivantes s'appliquent aux chauffages automatiques faisant recours à un cyclone :

Chauffages automatiques au bois à cyclone Grandeur de référence: 11% vol. O <sub>2</sub>			<1 MW	1 MW -5 MW
Lambda (air excédentaire)	Objectif Caractéristique	- -	1,5-1,8 1,5-2,5	
Température des gaz de combustion	Objectif Caractéristique	°C °C	<160 120-250	
Taux de rendement technique de combustion	Objectif Caractéristique	% %	92 80-90	92 80-93
CO	Caractéristique	mg/Nm <sup>3</sup>	<100 ... 1000	<100 ... 250
NO <sub>x</sub> Plaquettes forestières Sous-produits du bois	Caractéristique Caractéristique	mg/Nm <sup>3</sup>	150-300 400-600	
Poussières	Caractéristique	mg/Nm <sup>3</sup>	50-150	

Rendement annuel de combustion de la chaudière



## 2.8 Rendement annuel de combustion de la chaudière

### Rendement technique de combustion

Le rendement technique de combustion  $\eta_t$  tient compte des pertes dues aux gaz de fumées. Celles-ci se composent des pertes thermiques dues à la chaleur sensible des gaz de combustion et des pertes chimiques provenant d'une combustion incomplète.

Les facteurs importants sont :

- la température des gaz de combustion ;
- l'excédent d'air (teneur en  $O_2$  respectivement  $CO_2$ ) ;
- la teneur en CO des gaz d'échappement.

Un rendement technique de combustion plus élevé s'obtient au moyen de basses températures des gaz de combustion, d'un faible excédent d'air et de faibles émissions de CO.

### Rendement de la chaudière

Le rendement de la chaudière  $\eta_c$  est donné par le rapport entre la puissance, respectivement l'énergie fournie et amenée.

Le rendement de la chaudière tient compte, à côté des pertes dues aux gaz de combustion, des pertes de rayonnement et des pertes sur la grille. Les pertes de rayonnement interviennent du fait de la chaleur transmise par le foyer à la chaufferie. Les pertes sur la grille proviennent des résidus non brûlés dans les cendres du foyer. La notion de perte d'exploitation comprend les pertes dues au gaz de combustion, les pertes par rayonnement et les pertes sur la grille.

Le rendement de la chaudière peut être relevé à l'aide d'un rendement technique de combustion plus haut, par une bonne isolation de l'installation de chauffage et par une bonne combustion des cendres du foyer.

### Rendement annuel

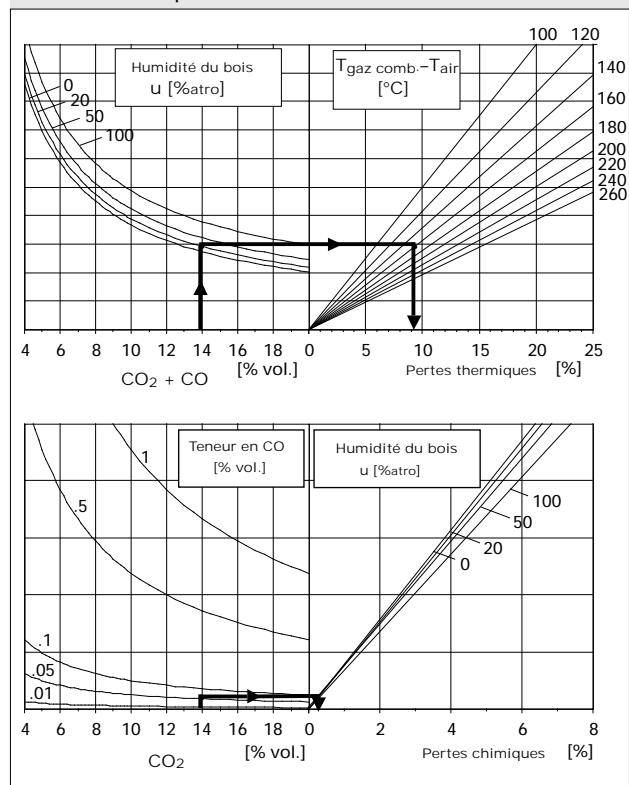
Le rendement annuel  $\eta_a$  est donné par le rapport entre quantité d'énergie fournie pendant une période de chauffage et la quantité d'énergie amenée.

En plus des pertes d'exploitation, le rendement annuel tient également compte des pertes pendant les périodes d'attente du chauffage, ainsi que les pertes de stockage et de distribution de la chaleur. Les pertes dues aux périodes d'arrêt surviennent aussi pendant les phases de service avec maintien du lit de braises.

On obtiendra un rendement annuel élevé :

- par un rendement technique de combustion élevé ;
- par un rendement de la chaudière élevé ;
- par le dimensionnement correct de la puissance de chauffage ;
- par la répartition éventuelle de la puissance sur deux ou plusieurs chaudières (installations monovalentes à plusieurs chaudières, installations bivalentes) ;
- par une bonne isolation de l'accumulateur et de la distribution de la chaleur ;
- par une production d'eau chaude intelligente pendant l'été ;
- par l'allumage automatique.

Nomogramme pour la détermination de rendement technique de combustion



#### Exemple

$\text{CO}_2$  = 14% vol.  
 $\text{CO}$  = 0,05% vol.  
 $u$  = 20% atro  
 $T_{\text{gaz éch.}} - T_{\text{air}}$  = 160°C

Pertes thermiques = 9%  
 Pertes chimiques = 0,2%

Pertes par les gaz de combustion = 9,5%  
 Taux de rendement technique de combustion = 90,5%

## 3. Systèmes

---

3.1	Installations de production de chaleur et composants auxiliaires	51
	Installation à une chaudière à accumulateur	52
	Installation bivalente bois/mazout, bois/gaz	54
	Installation monovalente à plusieurs chaudières	56
	Echangeur de chaleur complémentaire	57
	Condensation des gaz de fumées	58
	Production d'électricité à partir du bois et couplage chaleur-force au bois	60
<hr/>		
3.2	Réseaux thermiques	62
	Objectifs	62
	Conception	62
	Exploitation d'été et d'hiver	63

---



## 3. Systèmes

### 3.1 Installations de production de chaleur et composants auxiliaires

Les installations de production de chaleur se réalisent avec une ou plusieurs chaudières et en mode bivalent ou monovalent. Les buts de leur conception sont les suivants :

- atteindre un rendement annuel aussi élevé que possible ;
- éviter tout surdimensionnement ;
- limiter le nombre des phases d'allumage et d'extinction ;
- réduire les pertes pour le maintien du lit de braises ;
- réduire la pollution de l'air par une qualité optimale de la combustion.

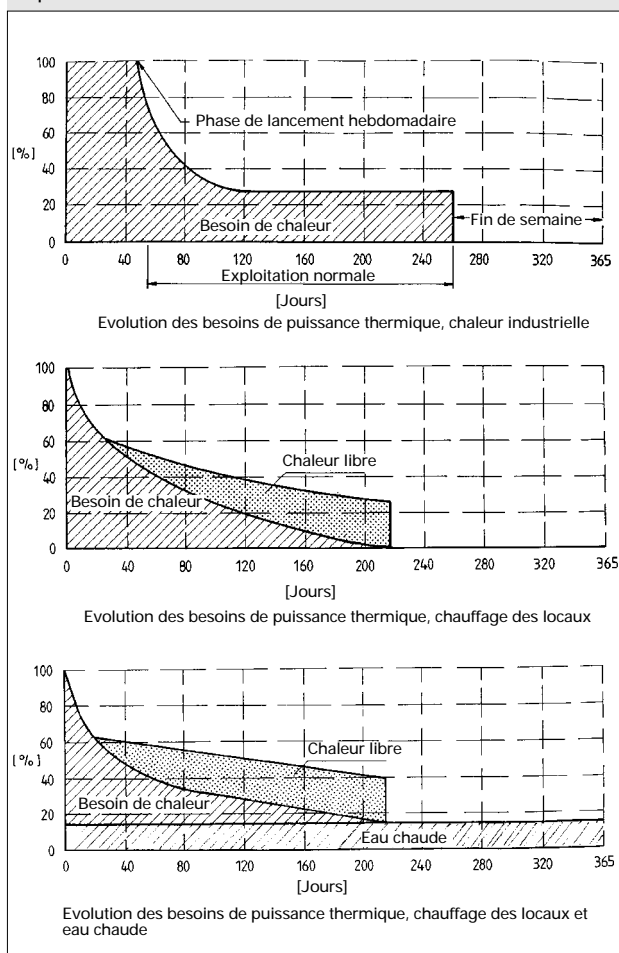
Les besoins de puissance différenciés au long de l'année sont souvent mieux couverts au moyen de plusieurs chaudières qu'avec un seul foyer. Le recours à plusieurs chaudières permet d'exploiter l'installation plus longtemps sur sa plage optimale de fonctionnement.

La nature et la quantité des besoins de chaleur exercent une influence sur la production de chaleur. C'est pourquoi il convient de tenir compte, lors de la conception, de la destination de la chaleur :

- pour le chauffage de locaux utilisés pendant la période de chauffage et pendant toute la journée ;
- pour la chaleur industrielle utilisée toute l'année pendant l'horaire de travail ;
- pour le chauffage de locaux et pour l'eau chaude sanitaire

Les pointes de puissances extrêmes et de brève durée ne doivent pas être couvertes avec une chaudière à bois, mais au moyen d'une installation bivalente, ou à l'aide d'un accumulateur de chaleur.

Besoins de chaleur de quelques usagers représentatifs



Chaleur libre : charges internes + énergie solaire passive

Les pointes de puissances extrêmes et brèves ne doivent pas être couvertes par le bois.

Domaine d'utilisation des installations à une chaudière

- Bâtiments commerciaux à exigences réduites en matière de confort
- Nouveaux bâtiments de construction massive à capacité élevée de stockage de chaleur
- Systèmes de distribution de chaleur à faible température de retour (inférieure à 50°C si possible)
- Plage de puissance jusqu'à 500 kW environ

Exécution des installations à une chaudière

- Dimensionnement de la chaudière à bois sans réserves de puissance d'après la norme SIA 384/2
- Système de chauffage à régulation de la puissance en continu entre 30% et 100%
- Accumulateur technique auxiliaire pour au moins une heure à pleine charge
- Service de réparation rapide avec piquet 24h/24h et entretien régulier de l'installation

Options pour les installations à une chaudière

- Utilisation de plaquettes de bois aussi sèches que possible, voire préséchées, pendant la période de transition
- Système électronique de commande et de surveillance

Mode d'exploitation

- La chaudière doit être dotée d'un dispositif de maintien de la température de retour
- La capacité optimale de l'accumulateur de chaleur est réalisée lorsqu'une température de départ de la chaudière élevée et une température de retour des usagers faible sont maintenues
- La préparation de l'eau chaude pendant la période de chauffage constitue une charge de base valable pendant la période de transition
- Ce type d'installation ne convient pas au service d'été

Installation à une chaudière à accumulateur

Les installations à une seule chaudière conviennent particulièrement aux nouvelles constructions dont les besoins de chaleur sont clairement définis ainsi qu'aux bâtiments bénéficiant d'une bonne isolation thermique. Ces installations sont utilisées pour des puissances petites à moyennes; leur réalisation exige une excellente définition de leurs conditions de fonctionnement. La raison principale du choix d'une installation à une seule chaudière réside dans les économies réalisées par la suppression des frais liés à une chaudière à mazout, à sa citerne et à sa cheminée. Il faut, par ailleurs, s'assurer que les investissements économisés ne se verront pas compensés par des coûts d'exploitation plus élevés (exploitation inefficace).

Malgré les dispositifs de régulation de puissance dont on dispose aujourd'hui, les installations à une seule chaudière doivent toujours être exploitées avec un accumulateur de chaleur. Les petits accumulateurs d'une capacité d'au moins une heure de service à pleine charge réduisent notablement le nombre des phases d'allumage et d'extinction. Les pointes de charge après les phases de réduction de puissance sont lissées et la régulation de la puissance dispose de plus de temps pour s'adapter.

De plus grands accumulateurs d'une capacité de plusieurs heures d'exploitation à pleine charge servent surtout à compenser d'éventuels dérangements de la chaudière. Le recours à des accumulateurs de grande taille est également recommandé pour les constructions légères ou anciennes et mal isolées qui ne disposent que d'une faible inertie thermique.

### Concept de régulation pour les installations à une chaudière

L'accumulateur et la chaudière fonctionnent en parallèle. La chaudière est régulée en fonction de la puissance. L'accumulateur est chargé en fonction de la température extérieure sur 4 niveaux thermiques. Lorsque la température extérieure est élevée, une charge partielle de l'accumulateur permet la réduction de la puissance de la chaudière, de telle sorte que l'accumulateur continue d'être chargé à puissance partielle; lorsque la température extérieure est basse, l'accumulateur est chargé en mode d'exploitation à pleine puissance. De plus, la température extérieure détermine le point de départ de tout nouveau chargement ainsi que l'intensité de la charge. L'installation doit être conçue de telle sorte que la chaleur contenue dans l'accumulateur tienne plusieurs heures en phase de transition pendant laquelle la chaudière est en mode d'attente. Les objectifs de la régulation sont les suivants :

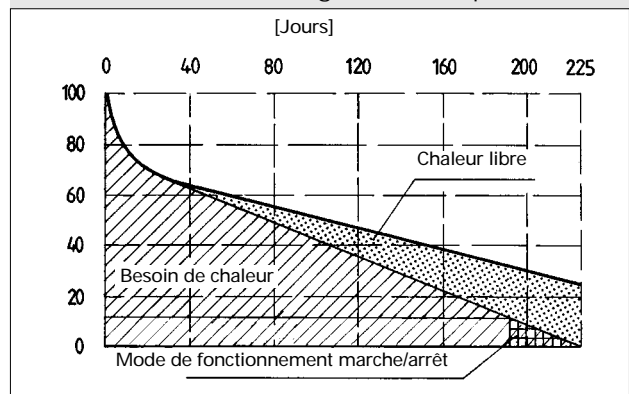
- obtenir des durées de fonctionnement aussi longues que possible, la chaudière étant exploitée à la puissance la plus faible possible de telle sorte que sa puissance corresponde précisément à celle qui est requise ;
- en mode de fonctionnement marche/arrêt, l'accumulateur doit être déchargé avant l'enclenchement de la chaudière et totalement rechargé avant son arrêt.

Un allumage automatique permet la poursuite confortable du processus de chauffage. Cette commande est activée dans les situations suivantes :

- abaissement de la température de la chaudière en dessous du seuil minimum ;
- accumulateur vide ;
- la température de départ n'est plus atteinte, malgré l'accumulateur.

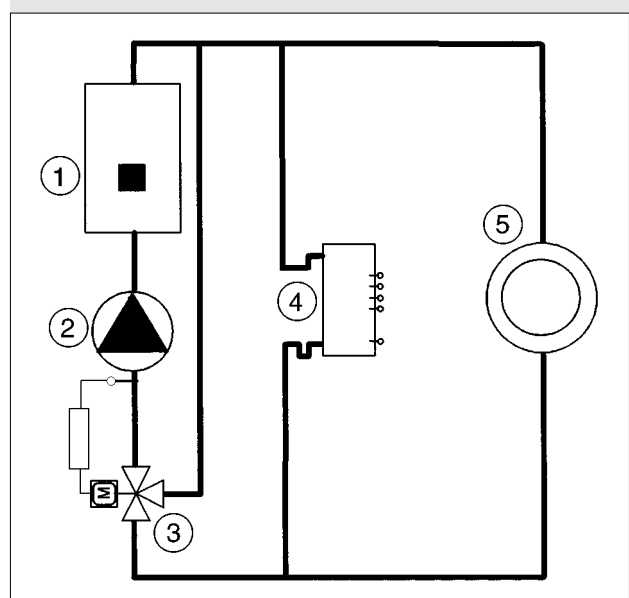
L'allumage automatique présente des difficultés lors du recours à des plaquettes de bois vert.

Besoins de puissance thermique d'une installation à une chaudière en mode de fonctionnement marche/arrêt et à allumage automatique



Mode de fonctionnement marche/arrêt : le chauffage est arrêté, puis remis en service au moyen d'un dispositif d'allumage automatique. Un mode d'exploitation marche/arrêt à maintien du lit de braises est indiqué, par contre, pour des puissances plus élevées.

Schéma hydraulique d'une installation à une chaudière et à accumulateur



- 1 Chauffage automatique au bois
- 2 Pompe
- 3 Maintien de la température de retour
- 4 Accumulateur
- 5 Usagers

Domaine d'utilisation des installations bivalentes

- Pratiquement tous les objets, des installations petites à grandes

Exécution de la chaudière à bois

- Dimensionnement à environ 60% à 80% des besoins de puissance thermique
- Réglage en continu de la puissance entre 30% et 100%
- Commutation automatique de la chaudière destinée aux pointes de charge (en fonction des besoins et en cas de panne)
- La mise en service de la chaudière à bois se fait manuellement

Exécution de la chaudière destinée aux pointes de charge

- Dimensionnement de 50% à 60% des besoins de puissance thermique
- Brûleur à deux niveaux ou modulant

Options

- Accumulateur technique pour la chaudière à bois
- Allumage automatique de la chaudière à bois

Mode d'exploitation

- Les deux chaudières sont équipées d'un dispositif de maintien de la température de retour
- La chaudière destinée aux pointes de charge est mise en parallèle avec la chaudière à bois
- Il est souhaitable d'assurer également la préparation de l'eau chaude sanitaire pendant la saison de chauffage
- Le service d'été peut être assuré à l'aide de la chaudière destinée aux pointes de charge (au mazout ou à gaz); il n'est toutefois pas pertinent dans les grands réseaux thermiques, du fait des pertes élevées.

Installation bivalente bois/mazout, bois/gaz

Les chauffages automatiques au bois de grandes dimensions en tant qu'installations bivalentes à plusieurs chaudières sont dotés d'une chaudière à mazout ou à gaz destinée à couvrir les pointes de charge. Les raisons qui militent en faveur de l'emploi d'un deuxième combustible sont les suivantes:

- grande sécurité d'exploitation;
- mode de fonctionnement automatique;
- utilisation sous faible charge et sous charge de pointe;
- fonctionnement éventuel en été pour la préparation d'eau chaude.

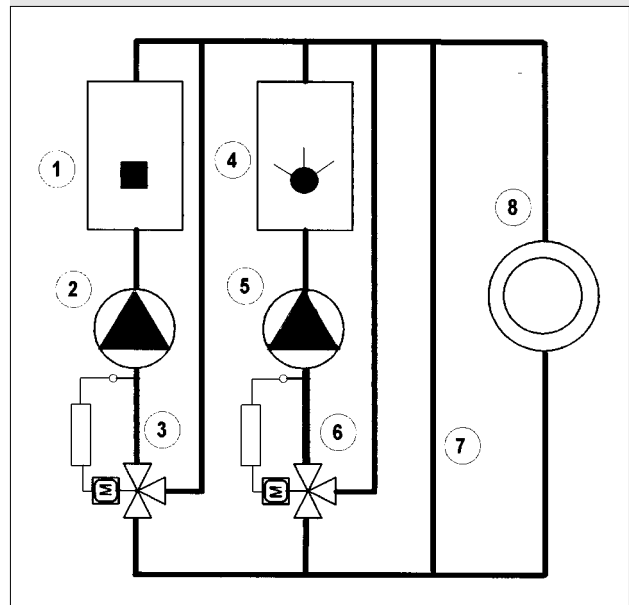
Une installation bivalente se compose d'au moins deux chaudières utilisant des combustibles différents. La chaudière à bois sert ici d'unité de charge principale fonctionnant si possible pendant toute la saison de chauffage, à l'exception de la période transitoire dont les besoins en chaleur sont réduits et variables. Une chaudière de 60% à 80% de la puissance thermique nécessaire suffit à couvrir la charge de base. La chaudière destinée aux pointes de charge et fonctionnant au mazout ou au gaz doit être dimensionnée pour 50% à 60% du besoin de puissance thermique; on l'équipera d'un brûleur à deux niveaux ou modulant. Cette répartition de la puissance permet de couvrir les besoins en chaleur à raison de plus de 80% à 90% au moyen du bois.

*Concept de régulation pour les installations bivalentes*

Les deux chaudières sont en parallèle. L'enclenchement de la chaudière destinée aux pointes de charge est manuel ou répond à un ordre d'enclenchement donné par régulation de la charge de la chaudière au bois lorsque la température de départ ne peut plus être atteinte.

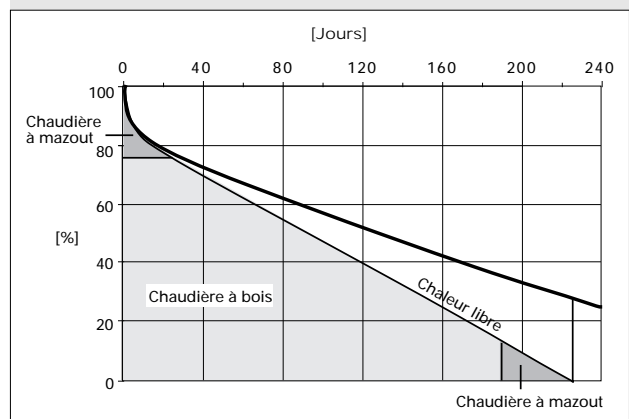
Un accumulateur de chaleur ne présente guère d'avantage pour les installations bivalentes et c'est pourquoi l'on n'en prévoit que rarement. C'est la chaudière d'appoint qui intervient au cours de la période de transition et lorsque surviennent des pointes de charge, ce qui permet d'exploiter la chaudière à bois de manière optimale.

Schéma hydraulique d'une installation bivalente



- 1 Chaudière automatique au bois
- 2-5 Pompe
- 3-6 Maintien de la température de retour
- 4 Chaudière à mazout
- 7 Dérivation
- 8 Usagers

Courbe de puissance thermique d'une installation bivalente au bois et au mazout



Les crêtes et les creux de charge sont couverts par le mazout.

Domaine d'utilisation des installations monovalentes à plusieurs chaudières

- Grands objets isolés ou installations de chauffage à distance à besoins de puissance thermique importants (supérieurs à 500 kW environ)
- Anciens et nouveaux bâtiments

Exécution

- Répartition de la puissance sur les deux chaudières à raison de 1/3 et 2/3 des besoins de puissance thermique
- Régulation en continu de la puissance entre 30% et 100% pour les deux chaudières
- Gestion professionnelle de l'installation et service de piquet 24 h/24 h en cas de dérangement sont des conditions préalables impératives

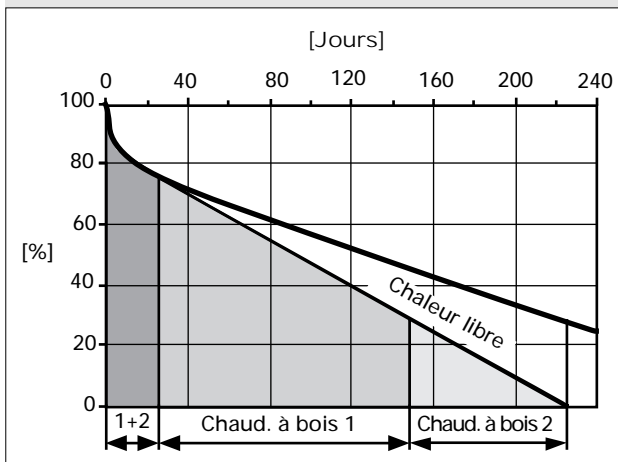
Options

- Allumage automatique des chaudières à bois
- Séchage préalable des plaquettes vertes dans le local de chauffage chaud

Mode d'exploitation

- Les chaudières à bois sont équipées d'un dispositif de maintien de la température de retour
- Commutation en cascade au moyen d'une commande de séquençement
- Connexion en parallèle des deux chaudières sur l'accumulateur de chaleur
- Préparation de l'eau chaude sanitaire souhaitable pendant la saison de chauffage
- Le service d'été n'est pertinent que dans des cas exceptionnels

Courbe de puissance thermique d'une installation monovalente à plusieurs chaudières



Installation monovalente à plusieurs chaudières

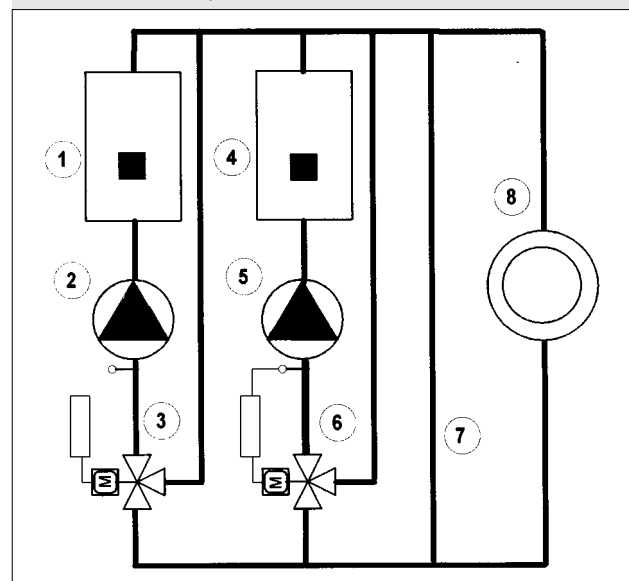
La répartition de la production de chaleur sur deux unités de chaudière ou plus utilisant le même combustible permet d'atteindre un comportement semblable à celui d'une installation bivalente et de tirer le meilleur parti possible de l'énergie bois, également dans les grandes installations. La répartition de la puissance autorise une régulation plus fine, avec une moindre consommation d'énergie et une combustion plus propre. En cas de panne d'une chaudière, la seconde assure automatiquement le fonctionnement de l'installation jusqu'à sa remise en état.

C'est pour des raisons de coûts que les systèmes à deux chaudières sont utilisés principalement dans des installations de taille moyenne à grande. Ils ne sont qu'à peine plus coûteux qu'une installation bivalente.

#### Concept de régulation

La mise en service de chacune des chaudières se fait manuellement par le préposé, ou par allumage automatique.

Schéma hydraulique d'une installation monovalente à plusieurs chaudières



- 1-4 Chaudière automatique au bois
- 2-5 Pompe
- 3-6 Maintien de la température de retour
- 7 Dérivation
- 8 Usagers

### Echangeur de chaleur complémentaire

Le rendement de la production de chaleur peut être augmenté en poursuivant le refroidissement des gaz de fumées dans un échangeur de chaleur complémentaire, de telle sorte que la température des gaz demeure constante dans la cheminée, à 80°C environ. Le refroidissement des gaz de fumées est obtenu ici par le préchauffage du retour du système hydraulique.

Lors de l'allumage de l'installation de chauffage ou en cas de dépassement vers le bas du seuil de température de consigne de 80°C, une partie des gaz de fumées est amenée directement dans la cheminée par un clapet de dérivation, jusqu'à ce que la température de consigne soit de nouveau atteinte.

#### Mode d'exploitation

- L'échangeur de chaleur placé en aval assure le refroidissement des gaz de fumées juste au-dessus du point de condensation

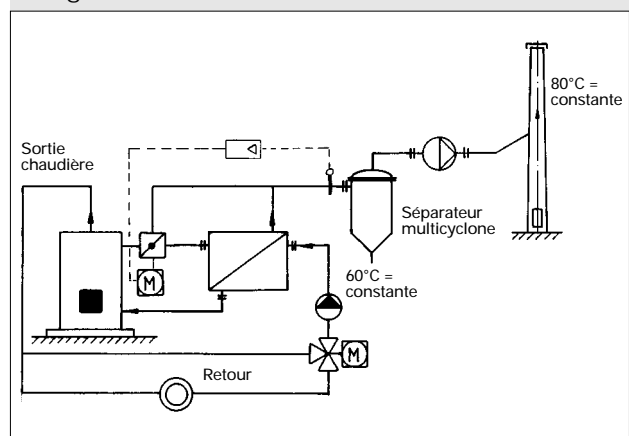
#### Exécution

- Avec un excédent d'air de  $\lambda = 2$ , le refroidissement supplémentaire des gaz de fumées de 10°C provoque une amélioration de 1% du rendement

#### Domaine d'utilisation

- Installations à partir de 100 kW.

### Echangeur de chaleur complémentaire dans le flux des gaz de fumées



## Mode de fonctionnement

- Le condensat peut être réinjecté dans les conduites d'eaux usées sans traitement préalable en cas de qualité élevée de la combustion ( $\text{CO} < 250 \text{ mg/Nm}^3$  à 11% vol.  $\text{O}_2$ )
- L'installation de chauffage doit être dotée d'une régulation de la combustion et il y a lieu de l'exploiter avec un excédent d'air  $\lambda$  inférieur à 1,8

## Domaine d'utilisation

- La condensation des gaz de fumées convient particulièrement aux chauffages à partir de 500 kW environ, ainsi que pour l'emploi de combustibles à teneur en eau élevée
- La condensation des gaz d'échappement n'est pas pertinente si l'on utilise des combustibles secs ( $x < 30\%$ )

## Condensation des gaz de fumées

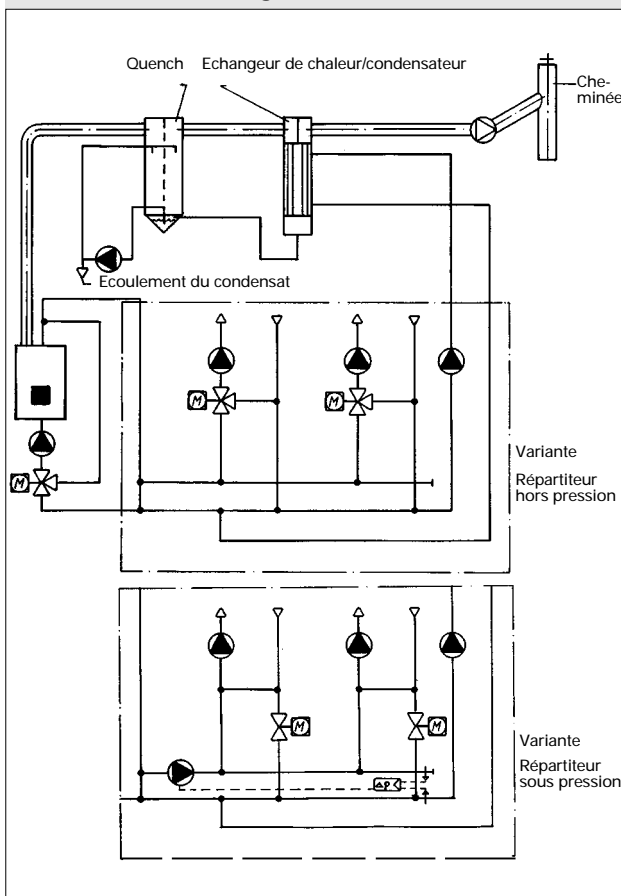
Le refroidissement du flux des gaz de fumées en dessous du point de condensation permet de récupérer une partie de l'énergie consacrée dans la chaudière à la vaporisation de l'eau contenue dans le combustible. On peut ainsi profiter, au lieu du seul pouvoir calorifique « inférieur », du pouvoir calorifique « supérieur » grâce à la chaleur récupérée par la condensation. C'est pourquoi les installations équipées d'un dispositif de condensation des gaz de fumées sont également appelées chaudières à pouvoir calorifique supérieur.

L'énergie à disposition n'est pas réduite, dans les installations à condensation des gaz de fumées, lorsque l'on y brûle des plaquettes de bois vert.

Tant que le chauffage au bois est exploité avec un excédent d'air  $\lambda$  inférieur à 1,8 et que les gaz de fumées sont refroidis à  $50^\circ\text{C}$ , le rendement d'un chauffage à plaquettes de bois vert s'en trouvera augmenté de 10% à 20%. Les conditions préalables au bon fonctionnement du système de condensation des gaz de fumées sont une teneur en eau élevée (entre 40% et 60%) et une faible température moyenne de retour (au moins  $10^\circ\text{C}$  en dessous du point de condensation des gaz de fumées).

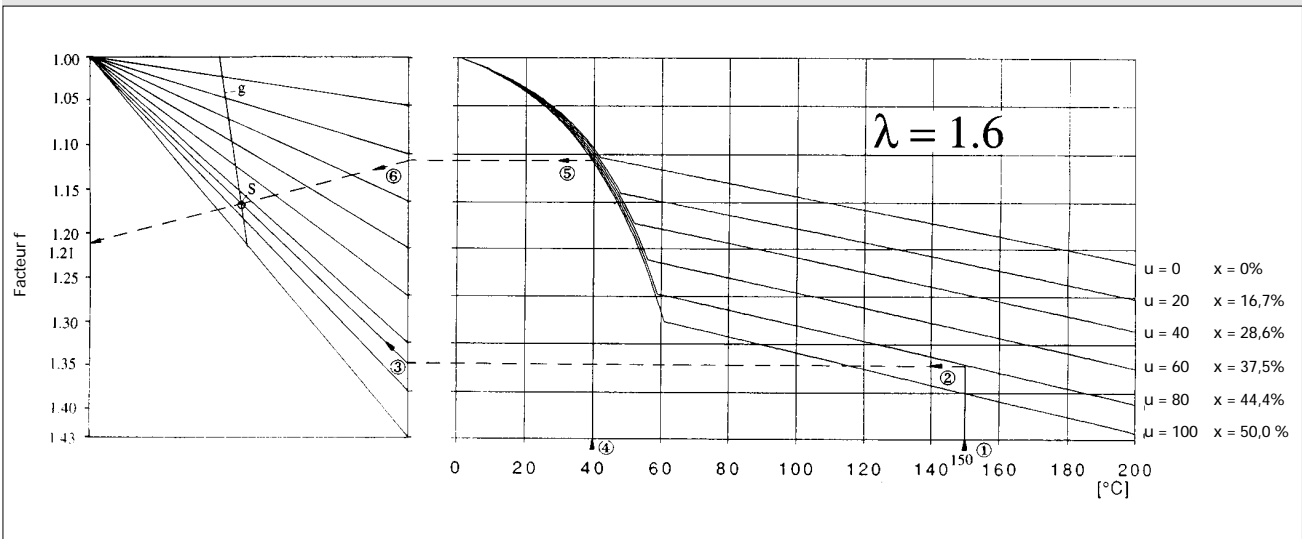
Le recours à la condensation des gaz de fumées fait actuellement l'objet, en Suisse, d'essais dans des installations pilotes. De nombreuses installations de ce type sont exploitées depuis quelques années déjà au Danemark et en Autriche.

Schéma hydraulique d'un chauffage au bois à condensation des gaz de fumées





Accroissement du rendement en % en fonction de la température des gaz de fumées pour un excédent d'air  $\lambda = 1.6$

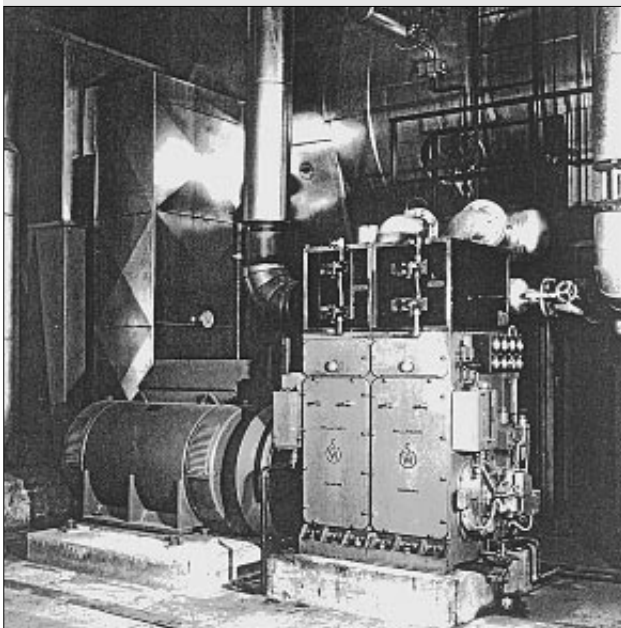


Exemple:  $u_{\text{combustible}} = 80$ ,  $x_{\text{combustible}} = 44\%$  – Les gaz de fumées peuvent être refroidis de  $150^{\circ}\text{C}$  ( $\eta_f = 90\%$ ) à  $40^{\circ}\text{C}$ .

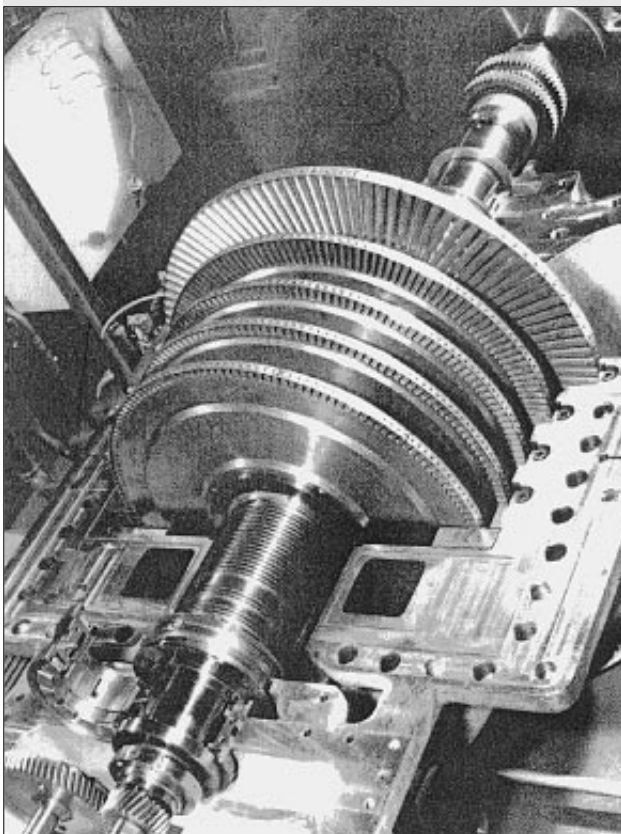
Calcul: Le calcul de l'amélioration du rendement se fait selon les points 1 à 6, comme indiqué sur le diagramme ci-dessus. Au point 6, on tracera une droite par l'intersection S. L'intersection S se trouve toujours sur la droite g et résulte du point 3.

Résultat: Le refroidissement des gaz de fumées entraîne l'augmentation du rendement d'un facteur de 1,21 par rapport au point de départ. Le rendement de combustion à  $40^{\circ}\text{C}$  est ainsi de  $1,21 * 90\% = 109\%$ .

Moteur à vapeur à deux cylindres



Turbine à vapeur de faible puissance



Production d'électricité à partir du bois et couplage chaleur-force au bois

L'intérêt pour la production de courant à partir du bois est souvent prioritaire dans les installations communales et entreprises de transformation du bois ayant de gros besoins d'électricité. Il s'agit ici en premier lieu de la production combinée de chaleur et d'électricité par couplage chaleur-force (CCF). C'est la gazéification du bois avec utilisation des gaz dans un moteur à combustion interne qui intervient en premier lieu pour la production de force, ainsi que la production de vapeur pour l'entraînement d'un moteur ou d'une turbine à vapeur. La production de courant à partir du bois est ainsi notablement plus complexe que la production de chaleur et son exploitation économique n'est possible que si des conditions particulières sont satisfaites.

Des installations destinées à la gazéification du bois dans des carburateurs à lit fixe sont proposées à partir de quelques kW et jusqu'à quelques MW de puissance thermique. Toutefois, la gazéification du bois n'a pas encore atteint le degré de maturité technique permettant de disposer sur le marché de systèmes de production d'électricité. Leur bon fonctionnement dépend souvent d'assortiments de combustibles spéciaux (par exemple petits plots de bois dur). Le rendement de la gazéification est généralement plutôt faible, étant donné que du charbon de bois est produit en plus du gaz de bois. Par ailleurs, le gaz de bois extrait est généralement souillé de goudrons et de particules solides. Son épuration est nécessaire pour son utilisation dans un moteur. L'installation devient ainsi plus coûteuse et l'on doit s'attendre à des résidus et à des condensats devant faire l'objet d'une élimination ad hoc.

La technique de production de vapeur à partir du bois est au point pour l'essentiel, tout comme les machines à vapeur nécessaire à la production de force. Toutefois, les coûts spécifiques d'investissement (Fr./kW<sub>él</sub>) sont élevés pour les installations petites et moyennes. On utilise aussi bien des moteurs que des turbines à vapeur sur la plage de puissance inférieure (jusqu'à 3 MW<sub>él</sub> environ). Le rendement électrique des équipements de petite taille est toutefois relativement faible. Les rendements caractéristiques obtenus dans la production d'électricité uniquement se situent entre 15% à 20%. Dans le cas du couplage chaleur-force, l'utilisation globale du combustible (électricité et chaleur) augmente la rentabilité bien que le rendement

électrique diminue dans ce cas. Seules les turbines à vapeur entrent en considération pour les puissances élevées (jusqu'à quelques centaines de MW<sub>é</sub>). L'emploi de turbines à plusieurs étages (puissances très élevées) et le recours à d'autres mesures techniques permettent d'atteindre des rendements supérieurs à ceux des petites installations.

Coût élevé et rendement global comparativement faible réduisent le domaine d'utilisation des installations de couplage chaleur-force au bois. Le bois énergie disponible devrait en principe être utilisé afin d'atteindre un degré de substitution maximum des énergies non renouvelables. Etant donné l'approvisionnement énergétique actuel de la Suisse, c'est avant tout la substitution des combustibles fossiles destinés à la production de chaleur qu'il faut s'efforcer de réaliser.

L'estimation économique rapide des installations de production d'électricité à partir du bois et à l'aide de moteurs et turbines à vapeur de 1 à 10 MW<sub>th</sub> est décrite dans la brochure

*Electricité par le bois*

*Estimation économique de la génération d'électricité par le bois*

DIANE 8, Bois et papier de récupération, source d'énergie

Office fédéral de l'énergie, Berne 1994

N° de commande 805.182 f

Vendu par l'OCFIM, 3000 Berne

## 3.2 Réseaux thermiques

### Objectifs

Les raisons qui militent en faveur d'un projet de réseau thermique résident dans l'obtention d'un rendement annuel élevé associé à un coût avantageux de la chaleur utile au moyen de grandes installations de chauffage automatique au bois. En même temps, le confort proposé aux usagers est amélioré et les émissions de substances polluantes sont réduites.

Dans le cas d'une desserte optimale, d'une charge suffisante et d'une densité de raccordement appropriée, les grands chauffages automatiques au bois peuvent atteindre un rendement annuel de 80% à 85%.

### Conception

Il convient de tenir compte des points suivants lors de la conception d'un réseau thermique :

- le réseau de chauffage à distance doit être en forme d'étoile rayonnant autour de la centrale thermique; la longueur des segments ne doit généralement pas être supérieure à 1,5 km;
- la station de transfert aux usagers peut être directe (sans échangeur de chaleur) ou indirecte (avec échangeur de chaleur assurant la séparation du circuit de chauffage à distance et du circuit de l'utilisateur); pour des motifs de coûts, il est préférable de recourir au transfert direct de la chaleur;
- la densité de raccordement doit être, pour des motifs économiques, d'au moins 1 à 2 kW par mètre de tranchée;
- le réseau de conduites à distance doit avoir une excellente qualité d'eau;
- la température de départ sera réglée en fonction des conditions météorologiques. Afin de réduire les pertes de chaleur au minimum, elle ne doit pas dépasser 80°C. La différence entre la température de départ et la température de retour doit être comprise entre 25 et 30°C;
- les pertes thermiques ne dépasseront pas 5% pendant la saison de chauffage, et 10% pendant toute l'année;
- la pompe du réseau de chauffage à distance doit être commandée au moyen d'un régulateur à

Réseau de chauffage à distance en forme d'étoile

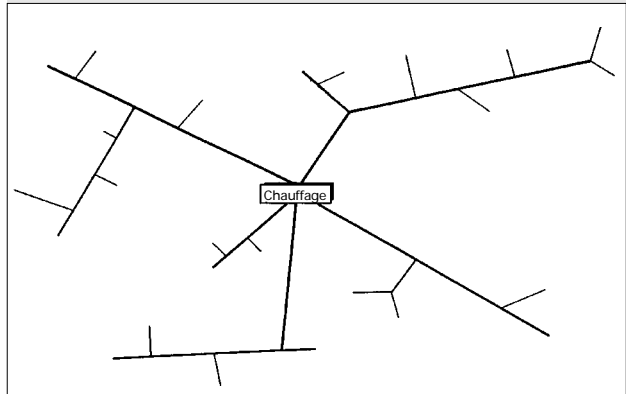


Schéma hydraulique d'une sous-station à transfert direct

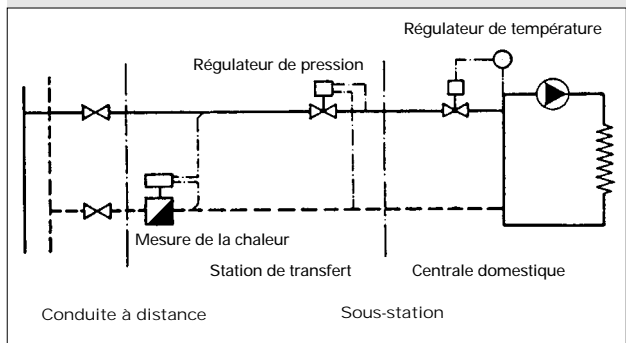
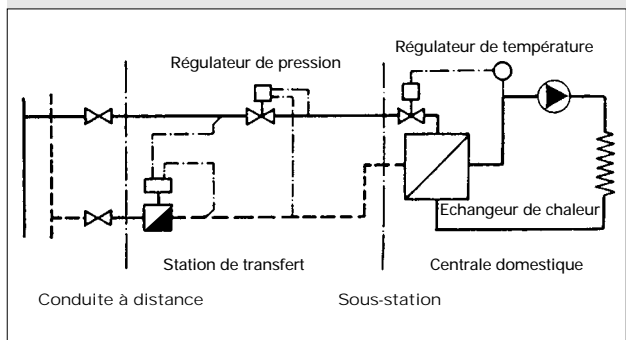


Schéma hydraulique d'une sous-station à transfert indirect



pression différentielle à l'extrémité de la conduite à distance, de telle sorte qu'elle travaille en permanence sur sa courbe caractéristique ;

- une pompe plus petite, adaptée au flux volumique réduit est indiquée en été pour une éventuelle fourniture de l'eau chaude sanitaire.

#### Exploitation d'été et d'hiver

La fourniture d'eau chaude sanitaire en été n'entre en considération qu'en cas de besoins importants (équipements sportifs ou habitations plurifamiliales par exemple). Dans ce cas, les pertes doivent être limitées par des livraisons d'eau chaude échelonnées et par un mode d'exploitation spécial pour l'été.

Toutefois, dans la plupart des cas, la fourniture d'eau chaude en été est rendue aléatoire du fait des pertes thermiques élevées dans la chaudière et le réseau thermique. Souvent, la consommation d'électricité du réseau thermique est supérieure à celle de la production décentralisée (sur les lieux de consommation) de l'eau chaude sanitaire.

Exemple: Service d'été pour la production d'eau chaude destinée à une école

Conduite à distance	400 m à DN 100
Besoin de chaleur journalier	300 kWh/jour
Besoin de chaleur journalier moyen	200 kWh/jour

(Ecole en service 6 jours/semaine, 14 semaines de vacances)

Pertes thermiques de la conduite à distance	200 kWh/jour
Pertes thermiques de la chaudière	200 kWh/jour
Besoins d'énergie auxiliaire	30 kWh/jour

Les pertes thermiques sont ici notablement supérieures aux besoins de chaleur. L'exploitation du réseau thermique en été n'est donc pas pertinente.

---

## 4. Composants

---

4.1	Chargement des silos et des halles de stockage, systèmes d'extraction	67
	Chargement des silos	67
	Couvercle	67
	Convoyeur de remplissage	69
	Répartiteur de silo	70
	Conteneur à pompe	70
	Extracteurs de silo	71
	Convoyeur de fond	72
	Vis centrale	73
	Vis conique	73
	Vis pendulaire	74
	Conteneur à extracteur (en lieu et place d'un silo)	75
	Remplissage et extraction des halles de stockage	75
	Chargeur sur pneus	75
	Grue	76
	Convoyeur à chaîne et à racloirs	77
	Systèmes de chargement et de déchargement à convoyeur mobile	78

---

4.2	Convoyeurs	79
	Convoyeurs pneumatiques	79
	Vis sans fin	80
	Systèmes à racloirs	80
	Convoyeur à chaîne	81

---

4.3	Systèmes de foyer	82
	Foyer à poussée inférieure	82
	Avant-foyer à grille	83
	Foyer à grille fixe ou mobile	84
	Foyer à alimentation par projection	85

---

4.4	Critères de sélection du système de foyer	86
-----	---	----

---

## 4. Composants

### 4.1 Chargement des silos et des halles de stockage, systèmes d'extraction

Le système de stockage du bois qui convient dépend de la consommation de combustible et de la forme d'approvisionnement retenue. Dans le cas où le bois provient de l'extérieur, le volume de stockage doit connaître, si possible, dix rotations par an. Pour les installations petites à moyennes, on a généralement recours à un silo de stockage du bois énergie. Par contre, une halle de stockage s'avère plus avantageuse pour les installations à partir de 2 MW. Pour les installations utilisant des plaquettes forestières de bois vert, la construction d'une halle de stockage et d'un silo journalier peut constituer une solution économique.

Dans le cas de l'approvisionnement à partir de régions d'altitude où l'abattage du bois ne peut intervenir pendant toute l'année, le bois sera stocké en grumes à une altitude inférieure où il sera déchiqueté au fur et à mesure des besoins. Cette solution permet la construction de silos plus petits et plus avantageux chez l'utilisateur.

Lorsque les besoins de plaquettes de bois sont importants et que les rotations sont fréquentes, le bois énergie peut être entreposé sur une aire de dépôt. Pour éviter toute souillure par du sable ou des pierres, l'aire de dépôt sera goudronnée. Les expériences faites à ce jour ont montré que la profondeur de pénétration de l'eau de pluie sur de très grandes aires de dépôt est limitée et que la teneur en eau ne dépasse donc pas 50%. L'entreposage sur une aire de dépôt convient avant tout au stockage des écorces. Il faut toutefois considérer qu'une teneur en eau augmentée risque de poser des problèmes selon le combustible et le type de chaudière utilisés.

#### Chargement des silos

Différents systèmes de chargement sont utilisés selon le type et le cycle de fourniture du combustible. Le système de chargement doit être simple, avantageux et solide et ne réclamer que le minimum d'entretien. Il sera en outre adapté aux conditions locales.

#### Couvercle

La construction du couvercle du silo joue un rôle essentiel dans le cas des silos dont l'ouverture est

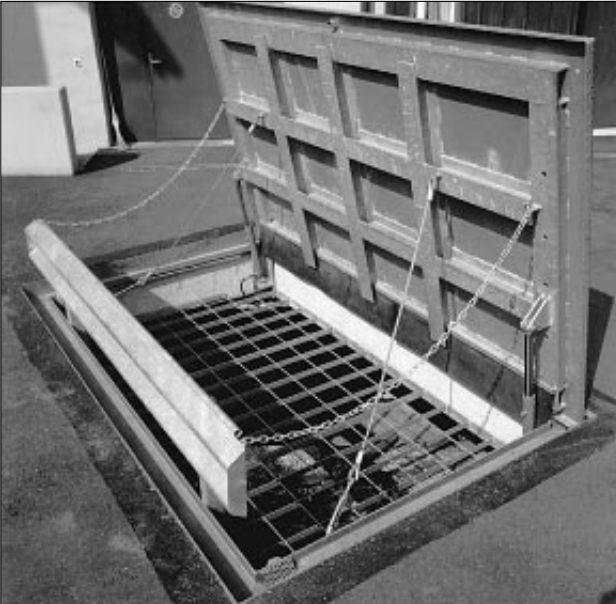
Halle de stockage de plaquettes de bois



Bois en grumes – Stockage intermédiaire



Couvercle de silo carrossable



Couvercle de silo non carrossable



au niveau du sol et que les camions remplissent directement.

Dans la mesure où un couvercle carrossable est indispensable, il faut veiller à ce que la fermeture du couvercle soit possible après le remplissage, sans travail de nettoyage des gouttières et des charnières. Les coûts élevés et les problèmes posés par l'irruption d'eau dans le silo font que les couvercles carrossables sont réservés à éviter.

Dans le cas d'une exécution non carrossable du couvercle, il convient de poser celui-ci sur un muret périphérique en béton de 20 cm de hauteur environ. On évite ainsi tout risque de pénétration d'eau et l'on économise des coûts supplémentaires.

Les dimensions courantes des couvercles de silo sont actuellement de 2,0 x 3,0 m. Il faut toutefois s'orienter vers des ouvertures plus grandes pour faciliter l'exploitation, car le travail de déchargement en est rendu plus aisé :

- déchargement plus rapide du fait de la réduction des manœuvres nécessaires des camions, et meilleur écoulement des plaquettes ;
- plus de nettoyage de la place de déchargement ;
- moins de dégâts causés au couvercle du silo.

Le couvercle du silo peut également être exécuté de manière fractionnée. La solidité s'en trouve ainsi améliorée et le confort d'utilisation s'accroît du fait du moindre poids de chacune des parties du couvercle. Cette disposition prévient par ailleurs la chute des plaquettes à côté de l'ouverture de remplissage ainsi que tout risque d'enfoncement du couvercle du silo en cas de chute d'un bloc compact de plaquettes du pont du camion.

Les prescriptions de la CNA exigent la pose d'une grille ou de barres de protection sur l'orifice de remplissage. Le maillage de la grille ne doit pas dépasser 20 cm x 20 cm. Lors de l'utilisation de simples barres parallèles, leur écartement ne doit pas dépasser 15 cm. Etant donné que les plaquettes de bois ont tendance à former des ponts, leur écoulement est ralenti sur une grille qui freine leur flux.

Il est recommandé, pour faciliter le déchargement, que le couvercle s'ouvre de plus de 90°, donc au-delà du point d'équilibre. On aura ainsi suffisamment de place pour les camions à benne basculante et l'on évitera en même temps que le couvercle ne se referme de lui-même.



### Convoyeur de remplissage

Rôle: le convoyeur de remplissage assure, dans les silos situés en dessous du niveau du sol, le transport des plaquettes du puits de chargement dans le silo, tout en permettant un meilleur remplissage de ce dernier.

Fonctionnement: des cylindres hydrauliques animent d'un mouvement alternatif des tiges mobiles à barres transversales dont la forme en coin assure le déplacement du combustible dans la direction désirée.

Caractéristiques: les forces très importantes engendrées par les cylindres hydrauliques doivent être absorbées par le bâtiment.

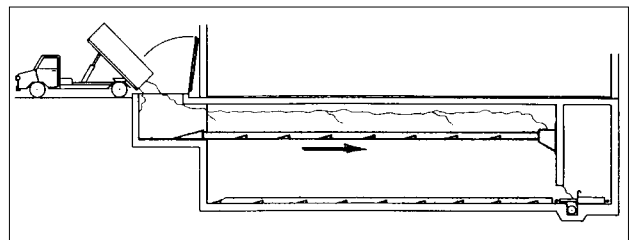
### Convoyeur de remplissage

Avantages:

- meilleur remplissage du silo;
- meilleure utilisation des locaux par l'installation de chauffage.

Inconvénients:

- coûts d'investissement élevés;
- déchargement lent (attente pour les fournisseurs de bois).



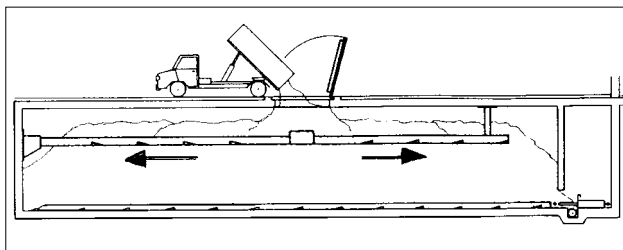
#### Répartiteur de silo

##### Avantages:

- moindre consommation d'énergie;
- indépendant de la forme du combustible et de sa teneur en eau;
- insensible aux corps étrangers de grande taille;
- permet des silos longs;
- économise couvercles de silo supplémentaires.

##### Inconvénients:

- durées de déchargement prolongées (attente pour les fournisseurs de bois);
- coûts d'investissement élevés.



#### Conteneurs à pompe pour plaquettes de bois

##### Avantages:

- pas besoin d'aménagements sur place;
- pas de salissure par les plaquettes tombées sur le sol;
- économie de coûts d'investissement pour les systèmes de chargement et de répartition;
- taux de remplissage élevé du silo (jusqu'à 98%).

##### Inconvénients:

- dépendance vis-à-vis du fournisseur de bois énergie;
- longues durées de déchargement (20 minutes environ contre 5 minutes environ pour un conteneur à bascule);
- émission de poussière dans le cas de plaquettes sèches; ne convient pas aux poussières de ponçage ni aux copeaux de rabotage;
- frais de livraison supplémentaires de Fr. 4.-/m<sup>3</sup> PI environ;
- bruit provoqué par le système de pompage.



#### Répartiteur de silo

Rôle: le répartiteur de silo distribue horizontalement les plaquettes de telle sorte que le remplissage du silo soit égal, quelle que soit sa forme.

Fonctionnement: le répartiteur fonctionne comme un convoyeur tout en travaillant à partir de l'orifice de remplissage dans deux directions opposées.

Caractéristiques: construction simple et solide pour le convoyage horizontal. Les forces engendrées par les cylindres hydrauliques doivent être absorbées par le bâtiment.

Remarque: si les données de construction le permettent, il est préférable de construire un silo à trois couvercles, plutôt qu'un silo à un couvercle et répartiteur.

#### Conteneur à pompe

Rôle: le conteneur à pompe assure le remplissage du silo lorsque l'accès direct des camions n'est pas possible.

Fonctionnement: les plaquettes de bois sont pompées directement du conteneur (capacité de 25 m<sup>3</sup> environ) dans le silo. Un système de transport interne amène les plaquettes dans le silo, par une conduite flexible. Pour le vider complètement, le conteneur est incliné pour que les plaquettes glissent dans la zone d'extraction et, de là, parviennent dans le silo.

Caractéristiques: système mobile et polyvalent; il convient surtout aux plaquettes forestières de bois vert.

## Extracteurs de silo

### Extracteur de fond à poussoirs

Rôle: extraction en continu du bois énergie dans les silos de grande surface.

Fonctionnement: une ou plusieurs tiges à barres transversales se déplacent dans un mouvement alternatif provoqué par des cylindres hydrauliques. Du fait de la forme en coin des barres, les plaquettes sont poussées vers la vis sans fin. Les systèmes modernes sont équipés de tiges à déplacement solide vers l'avant et séparé vers l'arrière, ce qui réduit les forces de poussée de chacune des tiges.

Caractéristiques: les forces engendrées par les cylindres hydrauliques doivent être absorbées par le bâtiment. Le poids du combustible appliqué sur le système de convoyage détermine les forces de poussée. Le dispositif doit être adapté au silo.

Utilisation: ce système convient à tous les combustibles.

### Extracteur de fond à poussoirs

#### Avantages:

- extraction sur une grande surface;
- sécurité d'exploitation et indépendance par rapport à la teneur en eau;
- absence de pièces d'entraînement dans le silo;
- indépendance vis-à-vis de la forme et de la grandeur du bois énergie.

#### Inconvénients:

- forces de poussée élevées à absorber par le bâtiment;
- longueur d'acheminement et quantité limitées;
- seul le transport en ligne droite est possible.



Système à poussoirs de fond



Cylindre hydraulique pour systèmes à poussoirs de fond et convoyeur transversal

Convoyeur de fond

Avantages:

- nombreuses possibilités d'adaptation au combustible et à l'emplacement du silo.

Inconvénients:

- éléments d'entraînement dans le silo;
- coûts d'investissement élevés;
- entretien et maintenance indispensables;
- construction complexe.

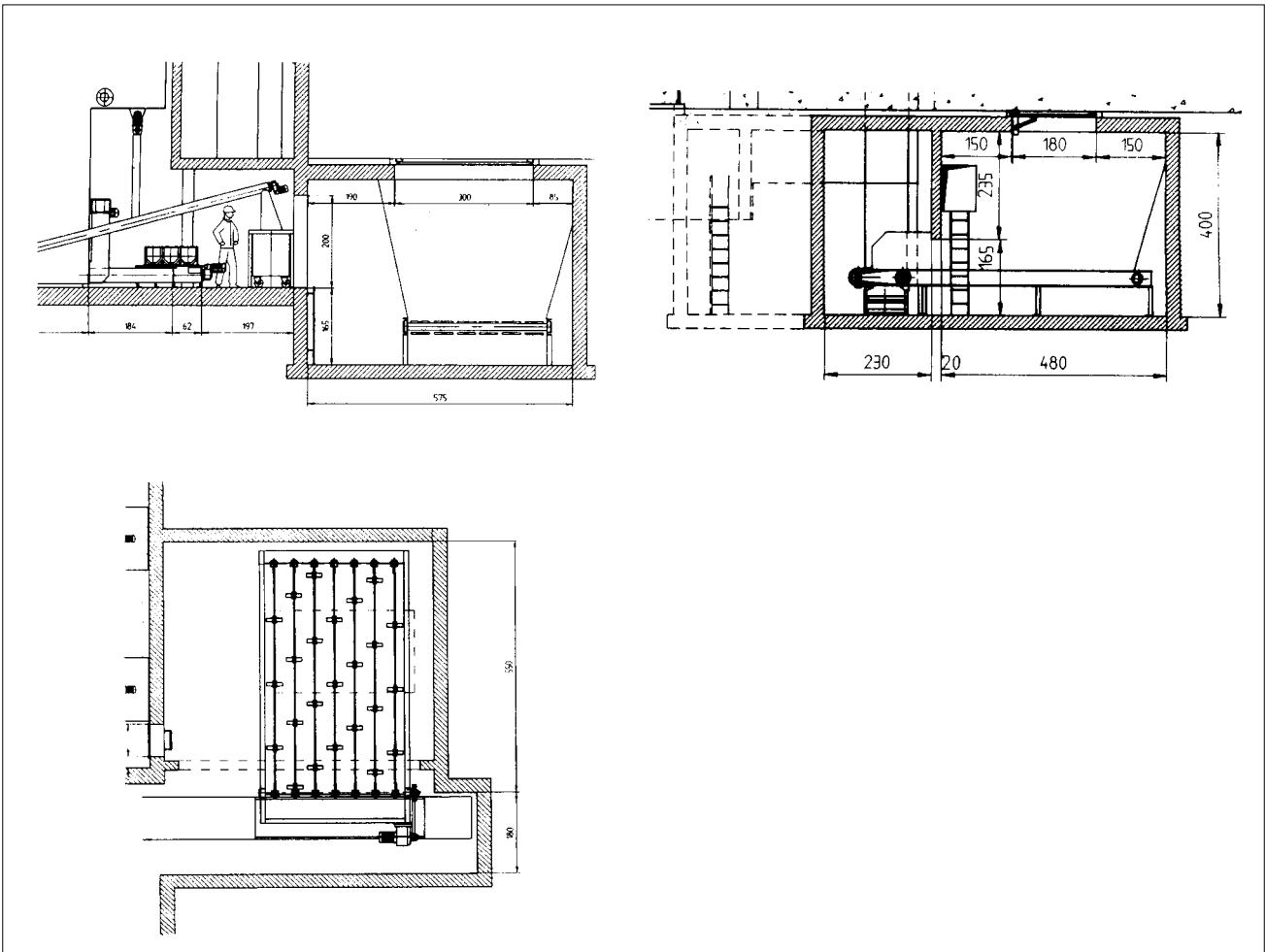
Convoyeur de fond

Rôle: transport du bois énergie à partir de silos de petite surface (silo intermédiaire, silo journalier).

Fonctionnement: le convoyeur de fond fonctionne comme un convoyeur à bande. La chaîne de transport est munie de profils transversaux qui transportent le bois énergie. Le dispositif peut être réalisé sur mesure. La largeur et la hauteur du silo déterminent le nombre de chaînes de transport.

Caractéristiques: le convoyeur de fond est conçu en fonction du combustible utilisé, ce qui lui confère un haut degré de performance.

Utilisation: ce système convient à tous les combustibles.



### Vis centrale

Rôle: assurer la vidange des silos de forme carrée ou circulaire.

Fonctionnement: la vis centrale décrit un cercle sur le fond du silo et amène le combustible horizontalement au centre du silo.

Caractéristiques: diamètre utile à partir de 4,0 m.

Utilisation: ce système convient aux plaquettes de bois sec ainsi qu'aux copeaux et aux poussières produits par les entreprises de transformation du bois (sans pierres ni morceaux d'aboutage).

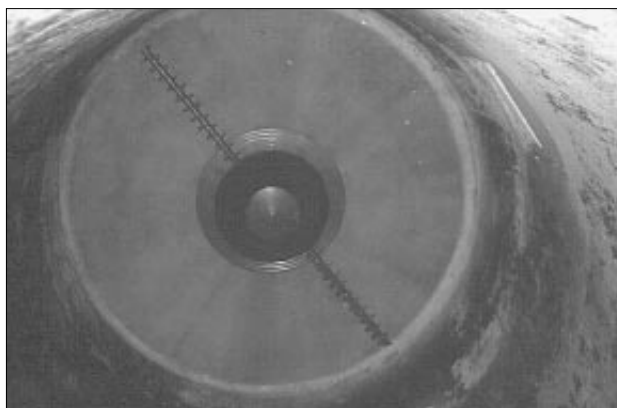
### Vis centrale

Avantages:

- construction simple;
- faible formation de ponts;
- grande hauteur de silo (sous réserves d'orifices d'intervention appropriés).

Inconvénients:

- sensibilité aux morceaux de grande taille (les bouts de bois et les pierres doivent être préalablement enlevés);
- éléments d'entraînement dans le silo.



### Vis conique

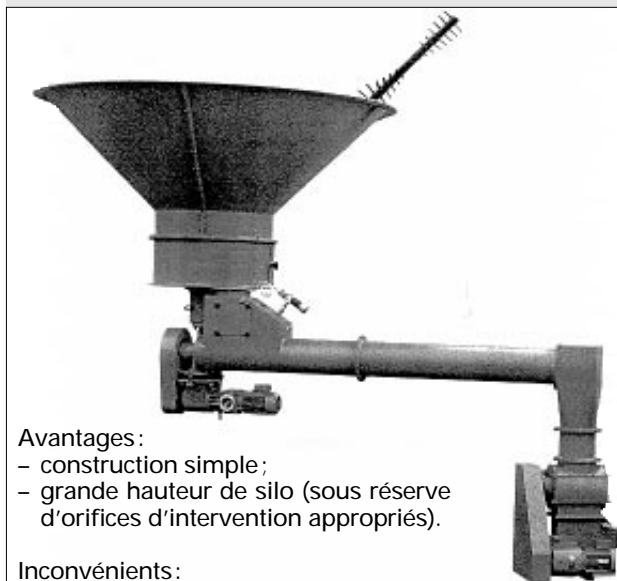
Rôle: vidange en continu de silos hauts de section circulaire, octogonale ou carrée.

Fonctionnement: construction semblable à celle de la vis centrale; toutefois, la vis d'alimentation n'est pas horizontale, mais inclinée. Le combustible est amené au dispositif d'extraction situé au centre du silo.

Caractéristiques: diamètre utile de 1,5 à 5,0 m. Ce système convient aux silos hauts à condition que les risques de formation de ponts soient réduits.

Utilisation: ce système convient aux plaquettes de bois sec ainsi qu'aux copeaux et poussières produits par les entreprises de transformation du bois (sans pierres ni morceaux d'aboutage).

### Vis conique



Avantages:

- construction simple;
- grande hauteur de silo (sous réserve d'orifices d'intervention appropriés).

Inconvénients:

- impossibilité de tirer parti de tout le volume de stockage disponible (un volume résiduel reste dans le silo);
- la surface au sol traitée est limitée;
- éléments d'entraînement dans le silo.

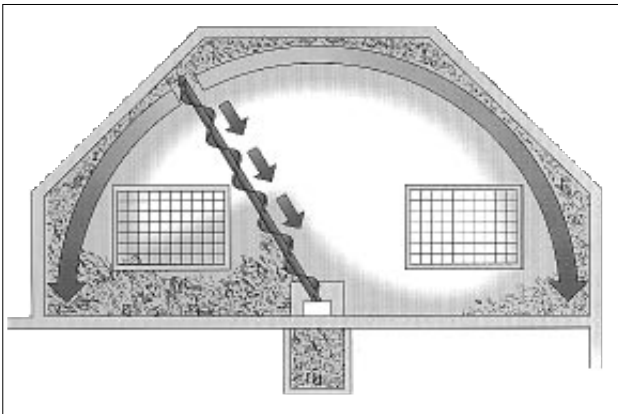
### Vis pendulaire

#### Avantages :

- construction simple ;
- faible formation de ponts ;
- grande hauteur de silo (sous réserves d'orifices d'intervention appropriés) ;
- pas d'éléments d'entraînement dans le silo.

#### Inconvénients :

- impossibilité de tirer parti de tout le volume ; un volume résiduel reste dans le silo ;
- sensibilité aux gros morceaux de combustible (les bouts de bois et les pierres doivent être éliminés au préalable).



### Vis pendulaire

Rôle : vidange en continu des silos de section carrée ou rectangulaire.

Fonctionnement : la vis d'extraction est située sur le bord du silo et exécute un mouvement pendulaire décrivant un cercle horizontal sur un secteur limité au fond du silo ; le bois énergie est ainsi amené au dispositif d'extraction.

Caractéristiques : la vis d'extraction pendulaire s'utilise surtout dans les silos de section carrée ou rectangulaire. Les pièces d'entraînement sont logées en dehors du silo.

Utilisation : ce système convient aux plaquettes forestières de bois vert après élimination des pierres et des morceaux d'aboutage, ainsi qu'aux copeaux et poussières provenant des entreprises de transformation du bois.

Conteneur à extracteur (en lieu et place d'un silo)

Rôle: alimentation directe d'une installation de chauffage à l'aide d'un système de conteneurs mobiles.

Fonctionnement: le conteneur de plaquettes (capacité de 30 m<sup>3</sup> environ) est déchargé du camion. Le système d'extraction interne est couplé au dispositif d'alimentation du chauffage; c'est le système de chauffage qui commande l'extraction du combustible du conteneur. Un deuxième conteneur plein est prêt à assurer l'alimentation ininterrompue en combustible dès que le premier est vide.

Caractéristiques: pas de système de stockage fixe; en fonction de la puissance du système de chauffage, plusieurs conteneurs pleins seront nécessaires. Ce système requiert la fourniture en continu de plaquettes de bois en conteneurs. Ce type d'alimentation en plaquettes n'est actuellement possible que dans le Nord-Ouest de la Suisse où l'on peut également louer les conteneurs.

Utilisation: ce système convient aux plaquettes forestières de bois vert.

Remplissage et extraction des halles de stockage

Chargeur sur pneus

Rôle: chargement et déchargement d'aires et de halles de stockage.

Fonctionnement: le chargeur sur pneus amène le bois d'énergie livré ou préparé sur place dans la halle de stockage ou le répand sur l'aire de dépôt. A partir de là, un silo intermédiaire est alimenté en fonction des besoins.

Caractéristiques: ce mode d'exploitation demande beaucoup de travail et de temps. Le chargeur sur pneus, bien que polyvalent, ne peut être automatisé.

Conteneur à plaquettes mobile en lieu et place d'un silo

Avantages:

- pas d'investissement pour un silo fixe;
- durées de déchargement brèves lors de la livraison des plaquettes.

Inconvénients:

- dépendance vis-à-vis du fournisseur de plaquettes;
- nécessité d'une surface de stockage en dehors du système de chauffage;
- il est recommandé de disposer d'une protection visuelle simple (protection contre le vent en hiver);
- coûts d'exploitation accrus du fait du loyer du conteneur (Fr. 6.-/jour environ);
- risque de gel en hiver.



Chargeur sur pneus

Avantages:

- indépendance vis-à-vis de la place disponible et possibilité d'emploi polyvalent;
- s'adapte au combustible de manière optimale;
- possibilité de séparer différents types de combustible.

Inconvénients:

- exige beaucoup de main d'œuvre;
- consommation d'énergie élevée;
- bruyant.



#### Grue

##### Avantages:

- peut être adaptée au combustible;
- automatisation possible; mais complexe.

##### Inconvénients:

- n'est pertinent que pour des lieux de stockage de grandes dimensions;
- fonctionnement généralement manuel;
- exploitation coûteuse; obligation d'entretien imposée par la loi.



#### Grue

Rôle: chargement et déchargement des halles de stockage.

Fonctionnement: la grue à grappin assure, en mode automatique ou par commande manuelle, le chargement et le déchargement des halles de stockage. La grue saisit depuis le haut le bois énergie sur une aire de dépôt ou dans un bunker et le dépose dans un silo journalier.

Caractéristiques: ce système est indépendant de la hauteur et de la surface, dans les limites des cheminements de la grue. Capacité horaire maximale: 60 m<sup>3</sup>.



### Convoyeur à chaîne et à racloirs

Rôle: transport de bois énergie sous différentes formes, horizontalement et verticalement.

Fonctionnement: le convoyeur à chaîne et à racloirs fonctionne comme un convoyeur à bande. Deux chaînes se déplacent parallèlement dans une enceinte close. Des raclettes sont montées entre les deux chaînes; elles transportent le bois énergie à sa destination.

Caractéristiques: le convoyeur à chaîne et à racloirs peut servir pour différents types de combustibles et à teneur en eau variable. La direction de transport va de l'horizontale à la verticale, mais seulement en ligne droite. Des modifications appropriées (divers orifices de rejet, transports transversaux mobiles) permettent le chargement de silos ou de halles de stockage de grande surface.

### Convoyeur à chaîne et à racloirs

Avantages:

- capacité de transport élevée;
- nombreuses possibilités de mise en œuvre.

Inconvénients:

- construction coûteuse;
- investissement élevé;
- entretien et maintenance indispensables;
- bruit.



Systèmes de chargement et d'extraction à convoyeurs à chaîne et à racloirs, mobiles horizontalement et verticalement

Avantages:

- utilisation optimale du volume du local de stockage;
- adaptable au type de bois énergie.

Inconvénients:

- pertinent seulement pour des locaux de stockage de grandes dimensions;
- construction coûteuse.



Systèmes de chargement et de déchargement à convoyeur mobile

Rôle: chargement et répartition du combustible dans des halles de stockage.

Fonctionnement: un convoyeur à chaîne et à racloirs transversaux est monté sur un cadre mobile verticalement et horizontalement. Le système s'adapte ainsi automatiquement au degré de remplissage de la halle de stockage. Lors du chargement, le système sert de répartiteur; lors du déchargement, il amène les plaquettes de bois au système d'alimentation du chauffage.

Caractéristiques: ce système s'adapte toujours à la hauteur du stock de combustible dans la halle. Longueur utile: jusqu'à 28 m environ.

## 4.2 Convoyeurs

### Convoyeurs pneumatiques

Rôle : transport horizontal ou vertical.

Fonctionnement : le bois énergie sec et de petit format est amené dans le silo par un flux d'air engendré par un ventilateur de transport. Le flux est ralenti par la section d'entrée plus large du silo, de telle sorte que les plaquettes tombent. Un filtre autonettoyant automatique sépare les particules fines de l'air évacué. Dans le cas des systèmes à aspiration centrale, un cyclone sépare le bois énergie de l'air. Un système supplémentaire de séparation de l'air évacué peut être nécessaire en fonction de la proportion de particules fines. Dans certains systèmes, l'air pulsé est repris et de nouveau utilisé.

Caractéristiques : la conception doit être adaptée avec précision à l'assortiment de bois énergie. Le système est indépendant de la dénivellation et de la longueur ; il est plus ou moins bruyant selon l'isolation phonique et le format du combustible.

Utilisation : convient aux copeaux secs et aux poussières provenant des entreprises de transformation du bois.

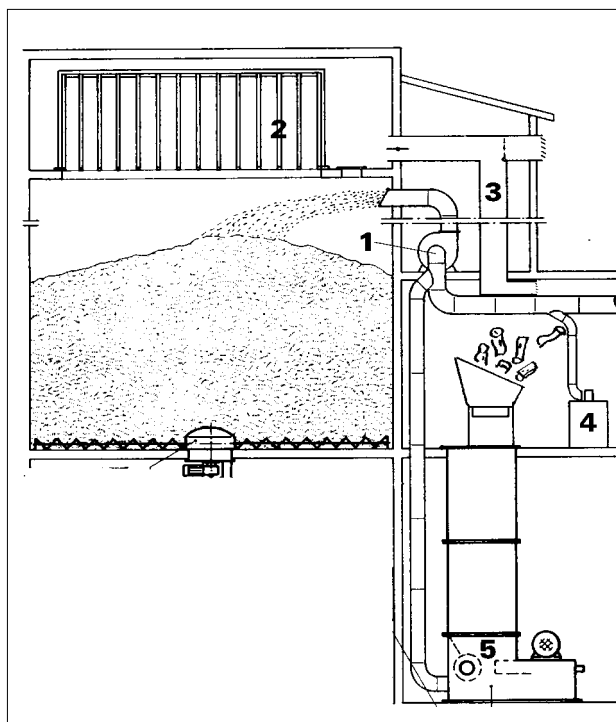
### Transport pneumatique

#### Avantages:

- s'adapte bien aux données du bâtiment;
- propre;
- fonctionne sans problèmes sur de grandes distances tant horizontales que verticales.

#### Inconvénients:

- ne convient qu'aux combustibles secs et de petit format;
- sensible à une teneur en eau élevée;
- bruyant;
- exige des dispositifs supplémentaires pour le silo;
- risque d'explosion du fait de la teneur en poussières.



- 1 Ventilateur d'aspiration
- 2 Filtre
- 3 Canal d'air en retour
- 4 Machines de transformation du bois
- 5 Déshiqueteur pour les sous-produits de la transformation du bois en morceaux

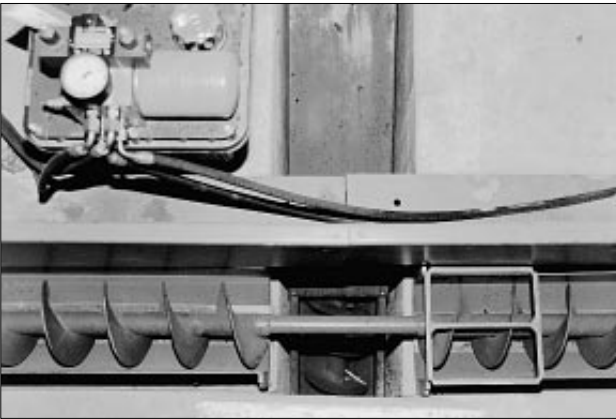
#### Vis sans fin

##### Avantages:

- efficacité élevée
- dimensions réduites;
- construction simple et peu coûteuse;
- utilisation aisée;
- faible consommation d'électricité.

##### Inconvénients:

- les dimensions du bois de feu sont réduites (pas de bout bois ni de pierres);
- transport possible seulement en ligne droite;
- inclinaison limitée de l'axe de transport.



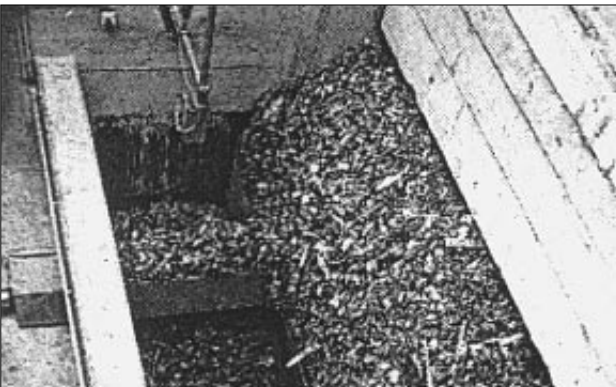
#### Systèmes à racloirs

##### Avantages:

- sécurité de fonctionnement;
- indépendance vis-à-vis de la forme, de la grandeur et de la teneur en eau du bois énergie;
- pas d'éléments d'entraînement dans le silo.

##### Inconvénients:

- forces de poussée élevées à absorber par le bâtiment;
- longueur de transport et quantité limitées;
- utilisable seulement en ligne droite.



#### Vis sans fin

Rôle: transport horizontal ou légèrement incliné.

Fonctionnement: une vis hélicoïdale en exécution simple ou double transporte le bois énergie dans une auge ouverte ou fermée. L'entraînement est assuré par un moteur électrique, réglable si nécessaire. La vis de transport est en exécution massive ou en fil de fer. Le diamètre du noyau dépend du format du combustible à transporter.

Caractéristiques: ce système est indépendant de la teneur en eau; construction simple et manipulation peu compliquée.

Utilisation: convient à tous les types de combustible.

#### Systèmes à racloirs

Rôle: transport horizontal du bois énergie.

Fonctionnement: un ou plusieurs cylindres hydrauliques meuvent alternativement une ou plusieurs tiges de transports munies de racloirs transversaux. La forme en coin des barres transversales provoque le déplacement du combustible dans la direction souhaitée. Les racloirs sont adaptés à la situation locale. Le poids exercé sur le système à racloirs détermine la force de poussée.

Caractéristiques: les forces engendrées par le système hydraulique doivent être absorbées par le bâtiment.

Utilisation: convient à tous les types de combustible.

### Convoyeur à chaîne

Rôle: transport horizontal à vertical.

Fonctionnement: le convoyeur à chaîne fonctionne comme un convoyeur à bande. Deux chaînes se déplacent en parallèle dans un carter fermé. Des racloirs sont montés entre les chaînes; ils transportent le bois énergie vers sa destination.

Caractéristiques: la direction de transport est horizontale à verticale, mais seulement en ligne droite. Un convoyeur à chaîne modifié en conséquence peut aussi servir de répartiteur de silo.

Utilisation: convient à tous les types de combustible.

### Convoyeur à chaîne et à racloirs

Avantages:

- capacité de transport élevée;
- nombreuses possibilités d'emploi.

Inconvénients:

- construction coûteuse;
- investissement élevé;
- entretien et maintenance indispensables;
- bruyant.



Foyer à poussée inférieure

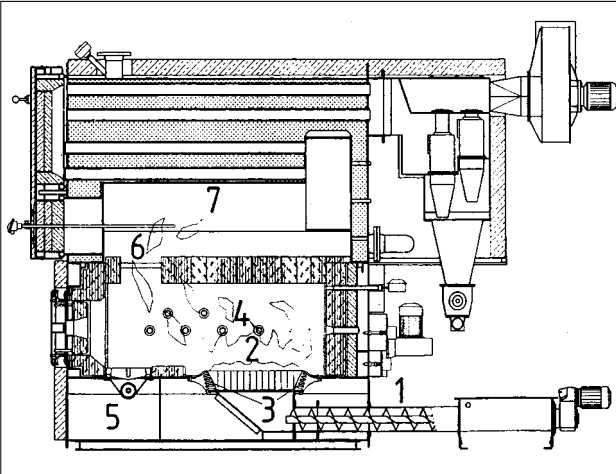


Schéma de principe

- 1 Amenée du combustible
- 2 Cornue de combustion
- 3 Air primaire
- 4 Air secondaire
- 5 Extraction des cendres
- 6 Zone de postcombustion
- 7 Echangeur de chaleur

Caractéristiques d'exploitation

Puissance du chauffage: de 20 kW à 2,5 MW

Mode de

fonctionnement: puissance fournie réglable de 30% à 100%  
possibilité de régulation de la combustion

Alimentation: automatique

Combustible: plaquettes forestières  
copeaux contenant au maximum 50% de poussière  
teneur en eau  $x = 5\% - 50\%$

Nettoyage

de la chaudière: l'évacuation des cendres est manuelle ou automatique; le nettoyage manuel de la chaudière est nécessaire au moins toutes les quatre semaines.

Points à observer tout particulièrement

- La chambre de postcombustion doit être adaptée à la qualité du combustible (notamment à sa teneur en eau).
- L'air primaire doit être injecté régulièrement dans le foyer.
- Les installations à plusieurs niveaux obtiennent un bon rendement de chaudière à tous les niveaux de puissance.

### 4.3 Systèmes de foyer

Le marché propose un grand nombre de chaudières à bois qui se différencient essentiellement par la technique de combustion, par la puissance et par leur degré d'automatisation. Il faut veiller avant tout, dans le cas d'un chauffage au bois, à choisir un système convenant à l'assortiment de bois utilisé, dont l'exploitation soit sûre et qui respecte les dispositions de l'Ordonnance sur la protection de l'air.

Foyer à poussée inférieure

#### Déroulement de la combustion

Le système d'alimentation amène le bois énergie du silo ou du conteneur journalier depuis le bas dans le cœur du foyer (cornue) où il se consume. L'air comburant est pulsé par des ventilateurs sur le fond de la cornue (air primaire) et au-dessus du foyer (air secondaire). Les gaz issus de la pyrolyse du bois se consomment dans la chambre de postcombustion. Après la combustion complète des gaz dans la chambre de combustion, les gaz de fumées chauds passent par un échangeur de chaleur.

#### Exploitation

L'exploitation du chauffage est entièrement automatique. Lorsque de la chaleur est nécessaire, l'amenée de combustible et d'air comburant est enclenchée. Lorsqu'il n'y a plus besoin de chaleur, l'amenée de combustible et d'air comburant est coupée. Le feu est maintenu en réenclenchant de temps en temps l'amenée de combustible (relais temporisé). La modification de la vitesse d'amenée ou des intervalles de chargement permet le réglage du volume transporté, et donc de la quantité du combustible. Le réglage du volume transporté doit être adapté à la nature du combustible utilisé. Ces fonctions sont aujourd'hui assurées par des commandes programmables à mémoire.

Les installations modernes à plusieurs niveaux sont conçues de telle sorte qu'une bonne combustion de rendement élevé soit garantie. L'excédent d'air optimal se situe sur la plage  $\lambda = 1,5 - 2,0$ .

#### Caractéristiques

On brûle, dans les foyers à poussée inférieure, des plaquettes de bois dont la teneur en eau se situe entre 5% et 50%. L'enceinte de combustion et la chambre de postcombustion doivent être adaptées à la qualité du combustible utilisé, en particulier à

sa teneur en eau. Une installation prévue pour la combustion de plaquettes à 50% de teneur en eau atteint une température trop élevée si l'on y brûle du bois sec, ce qui risque d'endommager le matériel et de provoquer la formation de scories.

### Avant-foyer à grille

#### Déroulement de la combustion

Les avant-foyers sont des foyers de combustion séparés de la chaudière elle-même. Le combustible est transporté de la zone de séchage à la zone de distillation et de combustion dans l'avant-foyer. Après le canal les gaz combustibles provenant de la distillation sont mélangés à l'air secondaire et amenés dans la chaudière pour la postcombustion et la transmission de la chaleur à l'eau de chauffage.

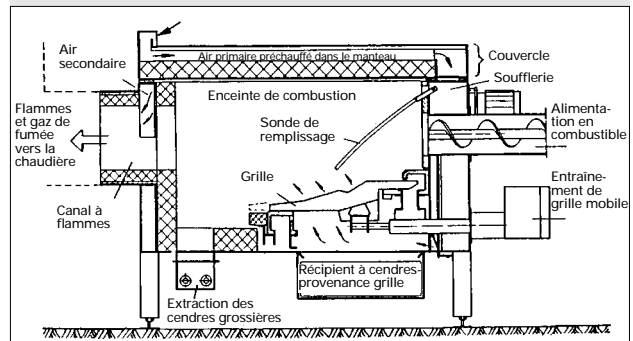
#### Exploitation

Une vis de dosage alimente automatiquement l'avant-foyer de plaquettes de bois. La postcombustion des gaz de distillation intervient dans l'enceinte de postcombustion dans la chaudière ; la puissance de l'installation est réglable.

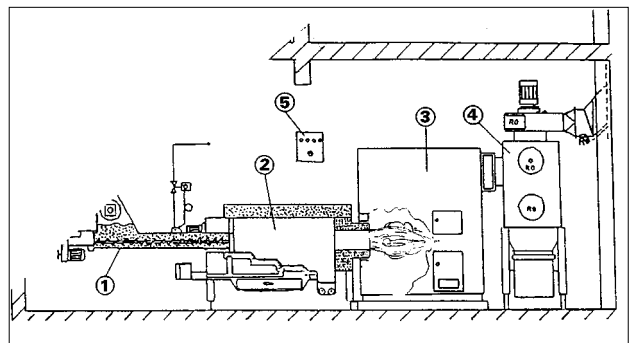
#### Caractéristiques

L'avant-foyer atteint des températures élevées, ce qui constitue la condition préalable à une bonne combustion et à de faibles émissions. Il faut toutefois veiller à ce que des avant-foyers insuffisamment isolés et non refroidis à l'eau entraînent d'importantes pertes par rayonnement.

### Avant-foyer



Avant-foyer (sans la chaudière)



Avant-foyer (avec chaudière et séparateur de poussières)

- 1 Vis sans fin de dosage
- 2 Avant-foyer à grille mobile
- 3 Chaudière
- 4 Séparateur de poussières
- 5 Armoire de commande

#### Caractéristiques d'exploitation

Puissance de chauffage jusqu'à 2 MW  
 Mode de fonctionnement régulation de la combustion, puissance réglable de 30% à 100%

Alimentation automatique  
 Combustible plaquettes forestières, sous-produits de bois de menuiserie et de construction teneur en eau  $x = 5\% - 45\%$

Nettoyage chaudière évacuation des cendres manuelle ou automatique; le nettoyage manuel de la chaudière est indispensable au moins toutes les 4 semaines.

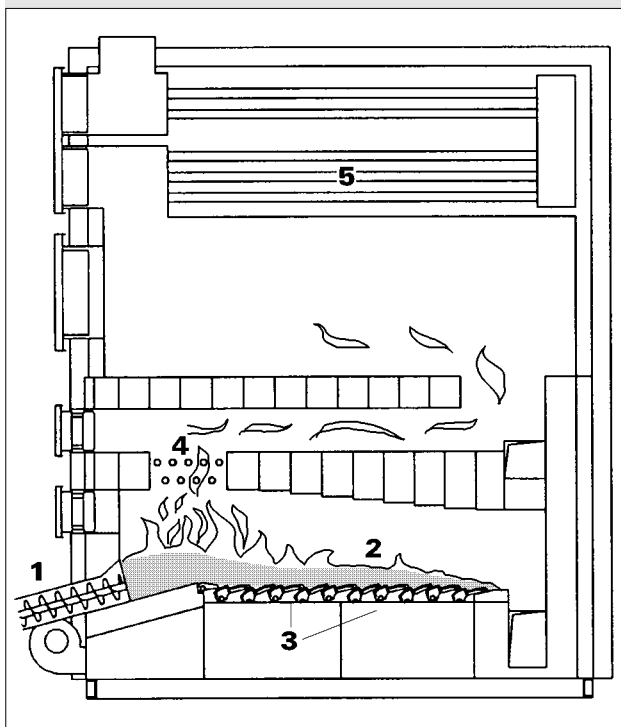
#### Variantes du système

- grille horizontale (grille fixe ou mobile)
- grille en escaliers (grille fixe ou mobile)
- brûleur en tunnel
- foyer à poussée inférieure

#### Point à observer

- L'avant-foyer et la chaudière doivent être soigneusement adaptés l'un à l'autre.

Foyer à grille mobile



- 1 Alimentation en combustible
- 2 Grille
- 3 Air primaire
- 4 Air secondaire
- 5 Echangeur de chaleur

## Caractéristiques d'exploitation

Puissance de chauffage à partir de 150 kW  
 Mode de fonctionnement régulation de la combustion, puissance réglable de 30% à 100%

Alimentation en combustible automatique  
 Combustible sous-produits de la transformation du bois, copeaux contenant jusqu'à 10% de poussières, écorces, plaquettes forestières teneur en eau  $x = 5\% - 60\%$

Nettoyage de la chaudière l'évacuation des cendres est manuelle ou automatique; le nettoyage manuel de la chaudière est indispensable au moins toutes les 4 semaines.

## Foyer à grille fixe ou mobile

*Déroulement de la combustion*

Le bois énergie est amené du silo, dans la plupart des cas, par une vis sans fin ou par un convoyeur à racloirs sur une grille fixe ou mobile. L'amenée d'air primaire au travers de la grille et d'air secondaire sur le lit de combustible fait passer celui-ci par les étapes de séchage, de gazéification et de combustion. L'évacuation automatique des cendres intervient à l'extrémité de la grille.

*Exploitation*

L'exploitation du chauffage est entièrement automatique. L'enclenchement et le déclenchement se font en fonction des besoins de chaleur, comme dans le cas des foyers à poussée inférieure. Selon le système de grille, certains fournisseurs ne proposent que des systèmes à un seul niveau. Les installations modernes à plusieurs niveaux sont par contre conçues pour que la combustion soit irréprochable à tous les niveaux avec un rendement élevé. L'excédent d'air optimal se situe sur la plage  $\lambda = 1,5 - 2,0$ .

*Caractéristiques*

Les foyers à grille conviennent surtout aux combustibles provoquant une abondante formation de cendres et de scories. Ils permettent également de brûler des combustibles à teneur en eau élevée. Dans les foyers à grille mobile à flamme inversée (principe du contre-flux), un préséchage du combustible intervient dans la première zone de la grille, ce qui permet de brûler du bois énergie dont la teneur en eau peut aller jusqu'à 60%.

## Variantes du système (grille mobile)

- Grille horizontale
- Grille en escaliers

## Variantes du système pour d'autres foyers à grille

- Grille à vis sans fin
- Grille à chaîne sans fin

## Points à observer

- Le système de grille doit être adapté à l'assortiment de bois énergie
- Le foyer doit être adapté à la qualité du combustible (avant tout à sa teneur en eau)
- Les installations à plus d'un niveau de puissance sont possibles; elles ne sont toutefois pas proposées par tous les fabricants. Un degré de rendement de chaudière élevé avec de faibles émissions doit être obtenu à tous les niveaux de puissance. L'excédent d'air optimal se situe dans la plage  $\lambda = 1,5 - 2,0$



## Foyer à alimentation par projection

### *Déroulement de la combustion*

Un dispositif de projection amène le bois énergie dans l'enceinte de combustion et le répartit régulièrement sur le lit de braises. Ainsi, contrairement à ce qui se passe dans un foyer à poussée inférieure, le bois est amené sur le lit de braises. L'air primaire est introduit au travers de ce dernier et l'air secondaire est injecté au-dessus du lit de braises.

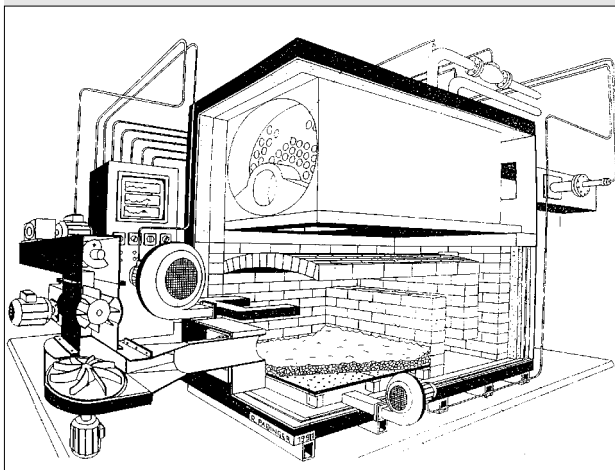
### *Exploitation*

L'exploitation du chauffage est entièrement automatique. La quantité d'air comburant est réglée par une sonde placée dans les gaz de fumées (sonde oxy réagissant aux gaz combustibles) jusqu'à ce que la proportion de gaz combustibles dans les gaz de fumées soit réduite au minimum. L'amenée de combustible ne dépend pas seulement de la température de la chaudière, mais aussi de la puissance thermique demandée.

### *Caractéristiques*

Ce système de combustion convient avant tout au bois énergie sec, de petit format et à faible teneur en cendres. L'exploitation stationnaire dans des conditions optimales de combustion permet d'atteindre un rendement de chaudière élevé à tous les niveaux de charge. L'excédent d'air se situe sur la plage  $\lambda = 1,5 - 2,0$ .

## Chauffage à bois automatique à alimentation par projection



### Caractéristiques d'exploitation

Puissance du chauffage	dès 150 kW
Mode de fonctionnement	régulation de la puissance de 30% à 100%
Alimentation en combustible	automatique
Combustible	plaquettes de sous-produits de la transformation du bois et copeaux à teneur élevée en poussières
Nettoyage de la chaudière	l'évacuation des cendres est automatique ou manuelle; le nettoyage manuel de la chaudière est indispensable toutes les 4 semaines au moins.

## Déroutement de la prise de décision

1 <sup>re</sup> étape :	<b>PUISSANCE » OFFRE DE BOIS ÉNERGIE</b> A partir de la puissance, on détermine le bois énergie entrant en considération.
2 <sup>e</sup> étape :	<b>ASSORTIMENT DE BOIS » SYSTÈME DE FOYER</b> Des systèmes de foyer bien déterminés conviennent à chaque assortiment de bois énergie.
3 <sup>e</sup> étape :	<b>SYSTÈME DE FOYER » FOURNISSEUR</b> Il y a lieu de tenir compte de différents critères pour le choix du fournisseur de la chaudière: <ul style="list-style-type: none"> <li>- comparaison du rendement annuel de combustion de la chaudière,</li> <li>- valeurs de mesure du rendement et des émissions (essais officiels),</li> <li>- durée de fin de combustion et dimensions de la chaudière,</li> <li>- garantie et conditions de livraison,</li> <li>- prix et service après-vente.</li> </ul>

## 4.4 Critères de sélection du système de foyer

Les différents types de foyer conviennent plus ou moins bien à tel ou tel domaine d'utilisation. Les principaux critères de choix sont les suivants :

- l'assortiment de bois énergie ;
- la puissance thermique.

Il y a de grandes différences entre les produits dans la même catégorie de foyers (à grille mobile par exemple). C'est pourquoi le choix d'un foyer doit se faire en consultation avec les différents fournisseurs. Voici, à titre indicatif, quelques types de foyers particulièrement bien adaptés à certains combustibles pour différentes catégories de puissance.

## Domaines d'utilisation caractéristique des principaux systèmes de foyer

Système de foyer	Puissance [kW]	Assortiment de bois énergie			
		A	B	C	D
Foyer à poussée inférieure	20 – 2500	-	++	++	-
Avant-foyer	< 2000	+	++*	+	-
Grille mobile	> 150	++	+	+	++

## Assortiment de bois énergie

- A = plaquettes provenant de bois usagé de construction
- B = plaquettes de bois et copeaux  
teneur en eau x = 5%-50%
- C = plaquettes de bois et copeaux à 50%  
au maximum de teneur en poussières  
teneur en eau x < 20%
- D = plaquettes de bois et écorces  
teneur en eau x < 60%

## Appréciation

- ne convient pas
- + convient
- ++ convient, domaine d'utilisation caractéristique
- \* teneur en eau maximum: 45%

## 5. Etudes préalables et avant-projet

---

5.1	Avantages et contraintes du bois énergie	89
	Avantages écologiques	89
	Avantages économiques	89
	Contraintes d'exploitation	90
	Intérêt public	90

---

5.2	Bois forestier et sous-produits de la transformation du bois: les différences	91
	Bois énergie provenant de la forêt	91
	Sous-produits de la transformation du bois	92

---

5.3	Déroulement de l'étude préalable et de l'avant-projet	93
	Prendre des contacts suffisamment tôt	93
	Procéder par étapes	94
	Principes supérieurs de planification	95

---

5.4	Données de base	97
	Conditions préalables en matière de construction et d'exploitation	97
	Origine du bois énergie et conditions de fourniture	97
	Réseau thermique	97
	Combinaison avec d'autres agents énergétiques	97
	Dispositions légales	98
	Types de chaudières	98

---

5.5	Conception globale	99
	Estimation d'ensemble des besoins de puissance et de la consommation annuelle de combustible	99
	Dimensionnement des équipements producteurs de chaleur	99
	Dénitrification et condensation des gaz de fumées	99
	Dimensionnement du silo à combustible	100
	Stockage intermédiaire saisonnier des plaquettes	101
	Place nécessaire et dimensions de la chaufferie	101

---

5.6	Estimation globale des coûts	102
	Objectif	102
	Estimation du prix de la chaleur utile	102

---

5.7	Comparaison des variantes	103
	Forme et contenu	103
	Comparaison économique	103
	Structure des coûts du prix de la chaleur utile	104
	Influence du prix de l'énergie sur l'aspect économique	104
	Facteurs économiques importants	104

---

---

5.8	Avant-projet	105
	Situation de départ après le choix du système	105
	Emplacement de la chaudière, de la cheminée et du silo	105
	Intégration du dispositif d'évacuation des cendres	106
	Dispositifs spéciaux de sécurité	106

---

## 5. Etudes préalables et avant-projet

### 5.1 Avantages et contraintes du bois énergie

#### Avantages écologiques

Tant que l'on n'utilisera pas plus de bois qu'il n'en pousse, la combustion du bois n'ajoutera pas de CO<sub>2</sub> dans le cycle de la nature. L'utilisation du bois énergie est ainsi neutre du point de vue du CO<sub>2</sub>, ce qui constitue l'un de ses avantages décisifs par rapport aux combustibles fossiles.

Les émissions à la cheminée ne sont pas les seules qui comptent pour établir une comparaison entre les émissions de substances dangereuses d'un chauffage au bois et celles d'un chauffage à mazout ou à gaz. Il faut bien plutôt dresser le bilan écologique de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. C'est ainsi que les avantages de l'agent énergétique bois, indigène et renouvelable, peuvent être mis en évidence :

- meilleure gestion de la forêt et amélioration de la fonction de protection contre les avalanches dans les régions de montagne ;
- création de places de travail dans des régions économiquement faibles ;
- soutien de l'économie forestière, avant tout dans les régions de montagne reculées.

Si l'on utilisait 1 mio de m<sup>3</sup> de bois énergie de plus qu'aujourd'hui, ce sont 200 000 tonnes de mazout qui pourraient être substituées et 1200 places de travail qui seraient créées en Suisse. Pour un coût économique supplémentaire de 90 millions de francs environ annuels, on pourrait ainsi réduire de 621 000 tonnes les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'écosphère (OFEFP, publication 131).

#### Avantages économiques

Les coûts externes de la consommation d'énergie (provoqués par des dommages causés à l'environnement et à la nature, par l'accroissement des coûts de la santé, etc.) ne sont pas assumés aujourd'hui par ceux qui en sont responsables ; ils sont au contraire virés au passif des générations futures ou supportés par la collectivité en général.

La Confédération a élaboré des directives qui permettront de tenir compte des coûts externes dans le prix de l'énergie par le biais d'une taxe sur l'éner-

#### Emissions de substances polluantes à la cheminée

Substance polluante	Chaudière à mazout		Chauffage à plaquettes de bois *	
	mg/m <sup>3</sup>	mg/kWh	mg/m <sup>3</sup>	mg/kWh
Dioxyde de soufre SO <sub>2</sub>	248	312	38	71
Monoxyde de carbone CO	18	23	712	1317
Oxydes d'azote NO <sub>x</sub>	72	90	232	429
Poussières	14	18	142	263
Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	215 000	270 000	0**	0**
Hydrates de carbone HC	24	30	6	10

\* Combustion du bois à l'état naturel

\*\* La combustion du bois libère 300 mg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> qui n'impose toutefois aucune charge supplémentaire dans le cycle du CO<sub>2</sub>.

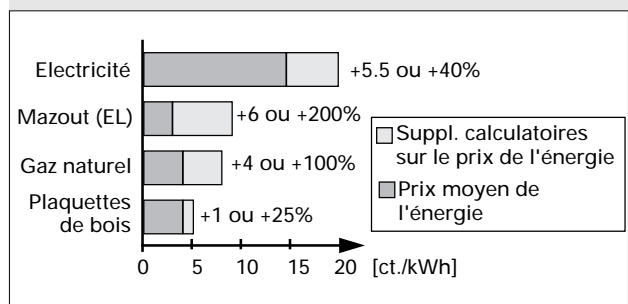
#### Nuisances causées par l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement par kWh d'énergie finale

Substance polluante	Chauffage au mazout		Chauffage à plaquettes de bois *	
	Suisse	Global.	Suisse	Global.
	mg/kWh	mg/kWh	mg/kWh	mg/kWh
Dioxyde de soufre SO <sub>2</sub>	358	663	77	77
Monoxyde de carbone CO	27	47	1412	1412
Oxydes d'azote NO <sub>x</sub>	115	244	521	521
Poussières	19	24	271	271
Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	275 000	300 000	7	7
Hydrates de carbone HC	84	161	41	41

\* Combustion du bois à l'état naturel

Source: OFEFP, publication 131, Energie tirée du mazout ou du bois, Berne 1990; les chiffres ont été convertis pour se référer aux kWh d'énergie finale.

#### Prix de l'énergie et suppléments calculatoires sur le prix de l'énergie pour tenir compte des coûts externes



Source: Coûts externes et suppléments calculatoires sur le prix de l'énergie dans les domaines de l'électricité et de la chaleur, Berne 1994, N° de commande 724270 d, OCFIM, 3000 Berne.

## Tâches de l'exploitant de l'installation

## Tâches quotidiennes :

- contrôle de la combustion et de la température des gaz de fumées ;
- vidange du tiroir à cendres ;
- en plus, à la limite de la saison de chauffage : mise en service de la chaudière par allumage manuel en mode d'amorçage.

## Tâches hebdomadaires :

- nettoyage du foyer au moyen d'un aspirateur à cendres ;
- aspiration des conduits de fumées (toutes les deux à trois semaines) ;
- vidange du conteneur à cendres (90 l) ;
- contrôle du niveau d'huile du système hydraulique ;
- contrôle du niveau de remplissage du silo à plaquettes ;
- en cas de besoin : commande des plaquettes et surveillance de leur livraison.

## Tâches semestrielles :

- grand nettoyage (en accord avec le ramoneur) ;
- à l'issue de la saison de chauffage : vidange du silo à plaquettes (quantité résiduelle non entraînée par les racloirs) ;
- changement de l'huile du système hydraulique.

## L'ASEB en tant que point de contact pour obtenir des informations

L'Association suisse pour l'énergie du bois (ASEB) encourage l'utilisation pertinente, écologique, moderne et efficace de l'énergie bois. Elle gère un service d'information et de conseil, communique des adresses, fait un travail de relations publiques, dirige le Programme d'encouragement en faveur de l'énergie du bois (PEEB) dans le cadre du programme d'action Energie 2000 et prend constamment position sur les questions relevant de la politique énergétique.

L'ASEB est le premier interlocuteur pour tous les milieux intéressés à l'énergie bois, sous quelque forme que ce soit.

Association suisse pour l'énergie du bois ASEB  
En Budron H6  
1052 Le Mont-sur-Lausanne  
Tél. : 021 / 653 07 77

Schweizerische Vereinigung für Holzenergie VHE  
Falkenstrasse 26  
8008 Zurich  
Tél. : 01 / 252 30 70

gie, ce qui permettra de faire valoir les avantages écologiques du bois par rapport aux autres agents énergétiques. Les décisions d'investissement pourront ainsi faire l'objet d'une meilleure évaluation et l'on sera en mesure de comparer les différents agents énergétiques à la lumière de coûts réels.

## Contraintes d'exploitation

Les chauffages au bois automatiques et modernes permettent de réduire au minimum les travaux liés à leur exploitation. Leurs futurs possesseurs doivent néanmoins savoir que, par rapport aux chauffages modernes au mazout ou au gaz, leur exploitation réclame un certain travail supplémentaire tant pour leur utilisation que pour leur entretien.

Des activités quotidiennes, hebdomadaires et semestrielles sont ainsi liées à l'exploitation d'un chauffage automatique au bois.

## Intérêt public

Il existe, dans de nombreuses régions de Suisse, des raisons relevant de l'écologie et de l'économie forestière d'intérêt public qui plaident en faveur d'une utilisation accrue de l'agent énergétique indigène qu'est le bois. Cet intérêt s'oppose souvent aux considérations économiques dominantes des maîtres d'ouvrages. C'est pour combler, en partie au moins, ce conflit d'intérêts que la Confédération et certains cantons encouragent les chauffages au bois par le biais d'aides à l'investissement et de contributions financières.

L'information sur les possibilités d'aides financières constitue donc l'une des tâches du concepteur. Même si une confirmation de contribution ne peut généralement pas être obtenue au stade de l'étude préalable déjà, il y a lieu de prendre des contacts aussi tôt que possible avec les éventuels bailleurs d'aides financières.

Il faut veiller, par ailleurs, au fait que certaines banques proposent des intérêts bonifiés pour des crédits dits écologiques. Ici aussi, il convient d'attirer l'attention du maître d'ouvrage sur les possibilités que présentent de telles aides financières.

## 5.2 Bois forestier et sous-produits de la transformation du bois : les différences

Le bois n'est pas un combustible homogène aux caractéristiques chimiques et physiques constantes. Sa forme, son contenu énergétique et sa teneur en eau se modifient et peuvent différer en fonction de son origine et de sa préparation. Ces différences exercent également une influence sur la technique des équipements nécessaires à la manutention, l'entreposage et la combustion.

Alors que l'on dispose, pour le bois énergie provenant de la forêt, d'un éventail connu de systèmes et de composants éprouvés, les conditions sont notablement plus difficiles pour les sous-produits provenant des entreprises de transformation du bois. Là, ce sont souvent des questions relevant de l'exploitation qui viennent s'ajouter aux aspects purement techniques de la production de chaleur. Mentionnons ici la collecte des copeaux et de la poussière de ponçage sur les machines de transformation, la réutilisation des copeaux (pour la fabrication des briquettes par exemple), ou l'acquisition d'une machine à déchiqueter convenant aux sous-produits de bois en morceaux.

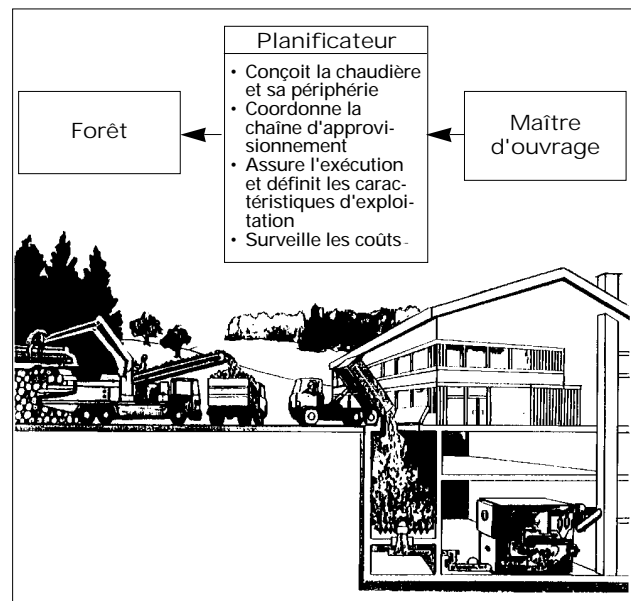
### Bois énergie provenant de la forêt

Dans le cas du bois énergie provenant de la forêt, il s'agit avant tout d'assurer un déroulement sans faille entre la chaîne d'approvisionnement en bois énergie et le système de chauffage. A toutes fins utiles, il y a lieu de distinguer si l'exploitant du chauffage est en même temps le fournisseur du bois énergie (une commune disposant de ses propres forêts par exemple), ou si le combustible doit être acquis auprès d'un fournisseur externe.

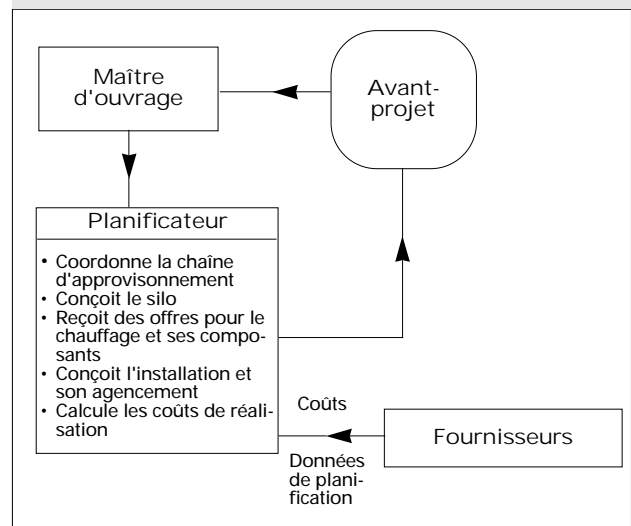
La coordination avec la chaîne d'approvisionnement constitue une tâche supplémentaire que doit assumer le concepteur. La réglementation SIA en matière d'honoraires ne traite pas de ce travail complémentaire qu'il convient de régler, de cas en cas, avec le mandant.

### Planification pour le bois énergie provenant de la forêt

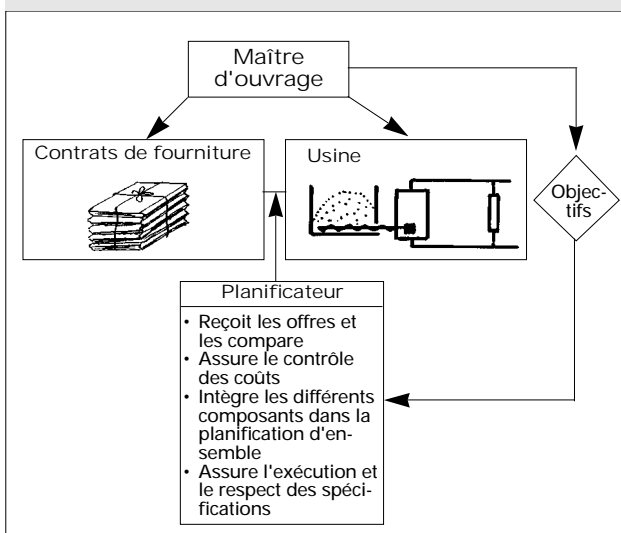
La préparation du bois, son stockage et sa manutention constituent l'essentiel



### Avant-projet pour le bois provenant de la forêt



Planification pour l'exploitation du bois provenant de l'industrie



Sous-produits de la transformation du bois

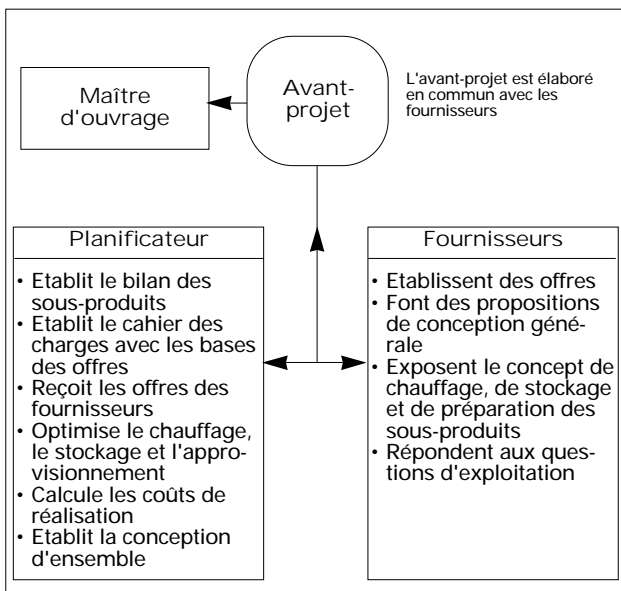
Etant donné les caractéristiques spécifiques de chaque entreprise de transformation du bois, le concepteur qui ne dispose pas des connaissances particulières de la branche doit s'assurer le soutien de spécialistes compétents. Il y a généralement lieu, dès le début, de s'assurer la participation de fournisseurs appropriés de systèmes de chauffage au bois et de la préparation du bois. Le concepteur en chauffage indépendant peut toutefois apporter une aide importante au maître d'ouvrage lors du choix du système et pour s'assurer de la qualité d'exécution du chauffage au bois et de tous ses autres composants.

Une vue d'ensemble des principales particularités des entreprises de transformation du bois se trouve dans la documentation suivante :

Valorisation énergétique des restes de bois, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne 1994. N° de commande 724.238 d, OCFIM, 3000 Berne

Planification pour l'exploitation du bois provenant de l'industrie

Les questions d'exploitation constituent l'essentiel.





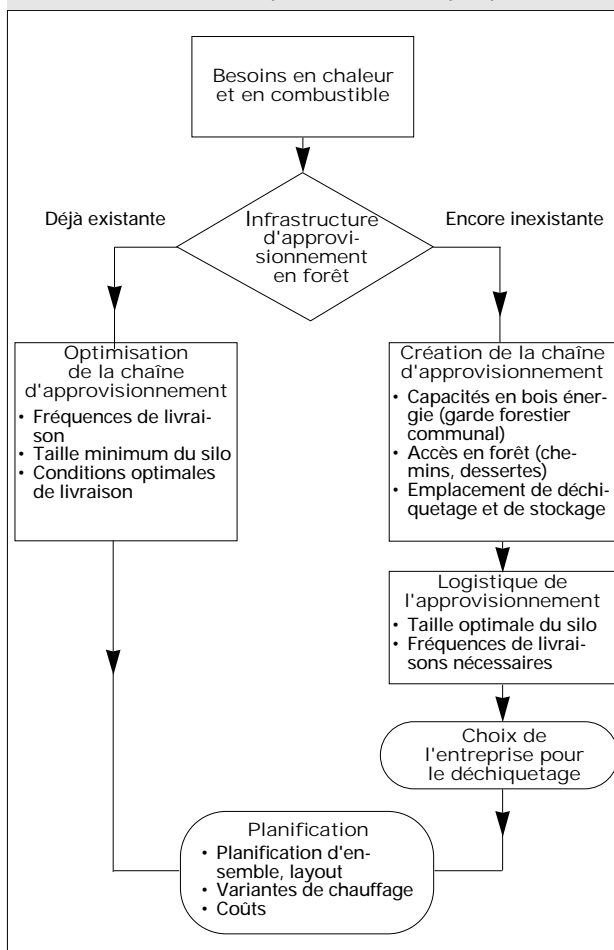
### 5.3 Déroulement de l'étude préalable et de l'avant-projet

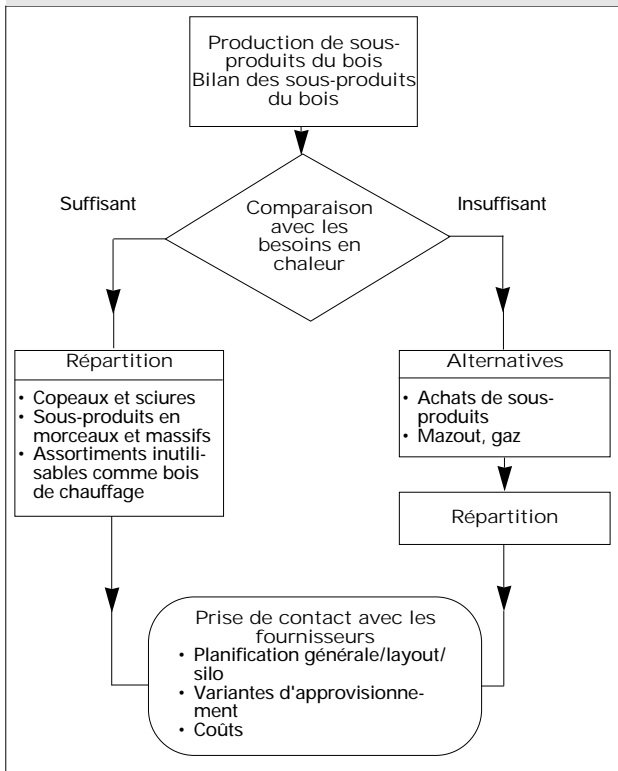
Prendre des contacts suffisamment tôt

Contrairement à la production conventionnelle de chaleur, l'ensemble de la mise en œuvre du combustible (origine, préparation, transport, stockage intermédiaire, livraison, alimentation) n'est pas pré-déterminé dans le cas des chauffages au bois. C'est donc l'une des tâches principales du concepteur que de prêter attention suffisamment tôt aux aspects relevant de ce domaine et d'indiquer au maître d'ouvrage quelles sont les différentes possibilités d'approvisionnement en sollicitant l'avis de différents spécialistes :

- fournisseurs de chauffages et d'équipements d'alimentation appropriés ;
- entreprises forestières ou forestiers expérimentés dans la coupe de bois énergie, dans la préparation du bois et dans des solutions intégrées complètes à base de plaquettes ;
- fournisseurs de bois énergie disposant d'une vaste palette d'offres en matière de technique de remplissage (chargement du silo) ;
- entrepreneurs expérimentés dans la construction des silos.

Cas 1 : Commune disposant de ses propres forêts



**Cas 2 : Sous-produits du bois des entreprises de transformation**


Procéder par étapes

La réussite de la réalisation d'un chauffage automatique au bois dépend d'une série de conditions préalables :

- les prescriptions en matière de construction doivent être respectées ;
- l'équilibre régional ne doit pas en pâtir ;
- l'étude du projet et des coûts doit être menée comme dans une entreprise ;
- le cadre financier doit être clairement défini.

Avant d'entreprendre l'avant-projet, le concepteur participera à la collecte des informations qui pourront aider le maître de l'ouvrage dans ses décisions et dans l'élaboration de propositions de solution. Une course en solitaire du concepteur jusqu'à la conclusion de l'étude préalable ne permettra jamais de trouver une solution optimale. Il convient plutôt de procéder par étapes et de présenter, entre chacune d'elles, des données pouvant servir de bases de décision au maître d'ouvrage.

L'étude préalable est ainsi un travail à réaliser en commun avec le concepteur, l'entreprise forestière, le fournisseur de chauffage et le maître d'ouvrage.

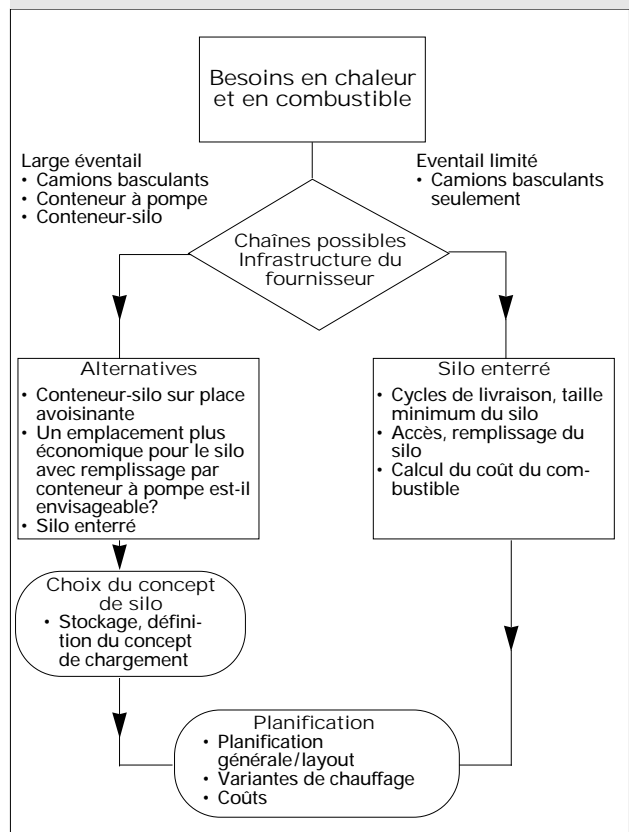
### Principes supérieurs de planification

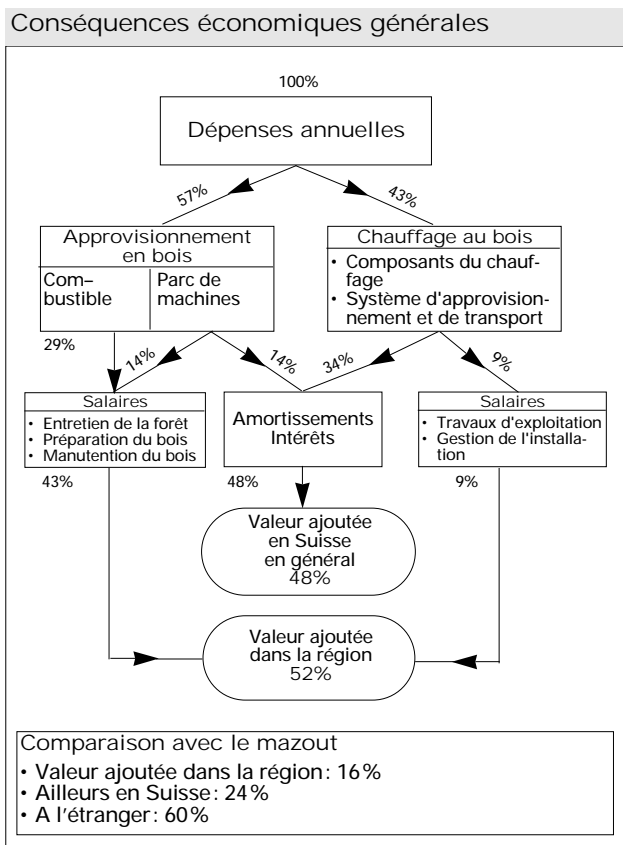
Diverses questions de fond doivent être éclaircies avant de commencer l'étude préalable. Parallèlement à la désignation de l'emplacement qui prend en compte les intérêts supérieurs de la politique énergétique et de la protection de l'air, il y a lieu d'examiner les aspects intéressant l'économie régionale et de définir également les conditions cadres d'exploitation.

#### *Politique régionale de protection de l'air*

Dans les grandes agglomérations, la réduction des charges en oxydes d'azote est prioritaire. Le bilan local des émissions doit tenir compte du fait que les chauffages au bois émettent localement plus de NO<sub>x</sub> que les chauffages au mazout. Il en résulte que le recours à grande échelle au bois énergie n'est parfois pas souhaitable dans des régions fortement chargées de NO<sub>x</sub>. Il incombe donc au concepteur, dès réception du projet, de prendre connaissance des dispositions régionales sur la protection de l'air en vigueur.

### Cas 3: Bois énergie provenant de fournisseurs externes





*Retombées sur l'économie*

Les projets de grande dimension (réseaux de chauffage à distance par exemple) ne manquent pas de revêtir une importance certaine du point de vue de l'économie régionale. L'exploitation d'un chauffage au bois de 500 kW entraîne dans la région une valeur ajoutée de l'ordre de Fr. 70000.- par an dont l'artisanat local profitera tout autant que les fournisseurs de bois énergie. Ceci correspond, dans les régions rurales, à près d'une place de travail, ce qui n'est pas à négliger dans des régions économiquement faibles. C'est pourquoi le concepteur doit traiter des aspects économiques dès les premiers contacts avec les autorités communales.

*Rentabilité*

Toute conception réussie d'exploitation d'un chauffage au bois se doit de respecter certaines conditions cadres. Les analyses des coûts de différents réseaux thermiques ont montré que les systèmes rentables sont ceux dont le prix de l'énergie utile se situe entre 8 et 12 centimes au kWh.

Des coûts trop élevés sont signes d'une capacité de rendement du chauffage ou de frais de capital trop élevés. Il incombe au concepteur, dès le début du projet, de se prononcer sur les coûts de la chaleur utile.

## 5.4 Données de base

Conditions préalables en matière de construction et d'exploitation

Il y a lieu d'examiner, dès la conception du projet, les conditions qui autorisent le recours à un chauffage automatique au bois. En l'occurrence, il faut prendre en considération la disponibilité à consentir des investissements plus élevés ainsi que les possibilités d'obtenir des aides financières et des crédits bonifiés, en plus des questions relevant de l'exploitation elle-même.

Origine du bois énergie et conditions de fourniture

Les caractéristiques du bois énergie et les conditions de sa fourniture doivent être déterminées avec précision pour pouvoir choisir le type de chauffage. A ce stade, il faut savoir que les contraintes imposées par les prescriptions de l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI) et les limites fixées par l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) sont plus sévères pour les sous-produits provenant de la transformation du bois que pour le bois tiré de la forêt.

Réseau thermique

Les analyses de sensibilité montrent que le taux d'utilisation de la puissance disponible d'un chauffage automatique au bois exerce une influence déterminante sur le prix de la chaleur utile. C'est pourquoi il importe, surtout pour les installations de grande dimension, d'examiner la possibilité d'un réseau de chauffage à distance. La production plus importante d'énergie utile permettra une meilleure répartition des coûts. Lors de l'établissement du budget, il faudrait se rapprocher de la structure des coûts suivante :

- 50% de coûts fixes (frais de capital et frais auxiliaires) ;
- 50% de coûts variables (coûts de l'énergie).

Pour y parvenir, la densité de raccordement doit généralement se situer entre 1,0 et 2,0 kW par mètre de fouille pour les conduites à distance.

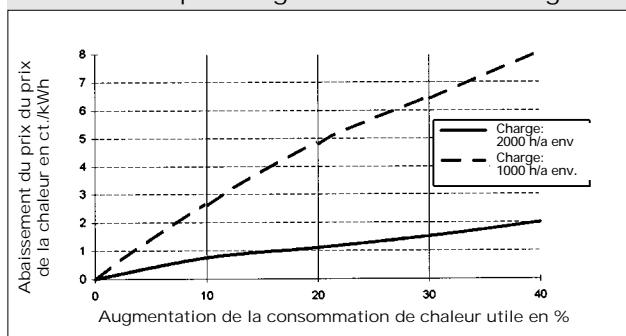
Combinaison avec d'autres agents énergétiques

La combinaison d'un chauffage automatique au bois avec d'autres agents énergétiques se justifie parfois, surtout pour couvrir les pointes ou les creux de la demande de chaleur. Toutefois, c'est au chauffage au bois qu'il appartient de couvrir la majeure

### Définition des conditions préalables

- Y a-t-il suffisamment de place pour un chauffage automatique au bois ?
- Où la centrale de chauffage et le stockage du combustible peuvent-ils être placés ?
- Quels sont les accès au lieu de stockage du combustible ?
- Le modèle d'approvisionnement « déchetage au silo » entre-t-il en ligne de compte ?
- Quels sont les principaux assortiments de bois ?
- Quelle est l'infrastructure existante pour le bois énergie ?
- Qui sont les fournisseurs possibles de bois énergie ?
- Quelles sont les conditions de voisinage (Ordonnance sur la protection contre le bruit, Ordonnance sur la protection de l'air) ?
- A quel point le maître d'ouvrage est-il disposé à consentir des investissements supplémentaires par rapport à des installations conventionnelles ?
- Quelles sont les subventions envisageables ?

### Abaissement des coûts de production de la chaleur par l'augmentation de la charge



Coûts de production de la chaleur:

Lors de l'étude des installations de chauffage automatique au bois, il y a lieu de viser les coûts de production de chaleur ci-dessous; la limite supérieure concerne les installations de la plage de puissance 500 kW, la limite inférieure celles de plus de 1000 kW.

	Chauffage à plaquettes de bois	Chauffage au mazout
Production de la chaleur	de 8 à 12 ct./kWh	de 7 à 10 ct./kWh
Réseau thermique	de 2 à 4 ct./jWh	de 2 à 4 ct./kWh

Source: Wirtschaftlichkeit der Holzenergienutzung in der Gemeinde (Analyse économique de l'utilisation de l'énergie bois dans les communes), Office fédéral de l'énergie, Berne 1994

## Normes et directives importantes

## Directives de la CNA

- Silos à plaquettes de bois vert, N° de commande 66050.f; 1993
- Règles relatives aux silos à copeaux de bois, N° de commande 1875.f; 1976
- Engins de manutention continue, N° de commande 1545.f; 1972

## Directives de l'AEAI

- Directives de protection incendie, 1993: installations thermiques  
Chap. 2.3, 2.4, 4.3, 4.5

## Directives SICC:

- 93-1 Dispositifs techniques de sécurité pour les installations de chauffage
- 93-1 Aération et ventilation des chaufferies

partie des besoins en énergie (charge de base). Un chauffage au bois de taille réduite mais de durée de fonctionnement accrue peut être réalisé en dimensionnant le système en conséquence. Cependant, il faut savoir que la couverture des pointes de charge par des chauffages automatiques au bois n'est pas indiquée non plus, du fait des coûts élevés que cela entraîne. Les coûts du capital pour une centrale thermique de grande taille peuvent notamment être réduits en recourant à une chaudière à mazout pour couvrir les pointes de charge. Les phases de fonctionnement à charge réduite (en dessous de la puissance minimum de la chaudière) peuvent aussi être couvertes à l'aide d'un accumulateur de chaleur.

## Dispositions légales

Il existe, en plus des dispositions de l'OPair, toute une série d'autres prescriptions relatives à l'installation des différents composants d'un chauffage au bois. Ce sont des considérations de sécurité qui figurent au premier plan :

- directives de la CNA sur les silos et équipements de convoyage, en vue de la prévention des accidents;
- directives de l'AEAI sur les chaufferies et locaux de stockage du combustible, en vue de la prévention des incendies;
- directives SICC sur les réseaux hydrauliques et l'aération des chaufferies.

Il convient d'examiner aussi les incidences des dispositions légales sur le bruit (Ordonnance sur la protection contre le bruit) surtout lors de la livraison du combustible et le déchetage au moyen d'appareils mobiles ou stationnaires. Le bruit provoqué par les convoyeurs à chaîne ou à vis sans fin retiendra également toute l'attention nécessaires.

## Types de chaudières

Il ne s'agit pas, au cours de la phase d'étude préalable, de distinguer jusque dans les moindres détails entre les différents systèmes de chaudière. Il faut plutôt chercher à disposer d'un aperçu des systèmes qui entrent en considération, en mettant en relief leurs principales caractéristiques.

Chaque type de chaudière est conçu pour un assortiment donné de combustible. Celui-ci doit être préparé sous une forme appropriée. Le format, la teneur en eau, la densité, la teneur en poussières et en écorces de l'assortiment de bois influent aussi bien sur le choix de la chaudière que sur la réalisation des dispositifs de transport et des équipements de stockage.

## 5.5 Conception globale

Estimation d'ensemble des besoins de puissance et de la consommation annuelle de combustible

Une première estimation d'ensemble des besoins de puissance et de combustible repose sur la surface de plancher des locaux à chauffer. Il y a lieu de tenir également compte des pointes de brève durée qui ne sont pas prises en considération avec la seule surface de plancher :

- équipements de ventilation ;
- production d'eau chaude sanitaire ;
- pointes de chauffage après de longues périodes d'absence (exploitation de menuiserie après les vacances de Noël par exemple).

Les rénovations fournissent d'ordinaire suffisamment d'informations sur la consommation annuelle de combustible, ce qui permet d'estimer les besoins de chaleur utile et la puissance thermique indispensable.

Il conviendra, dans le projet détaillé (chapitre 6), de préciser ces estimations d'après la norme SIA 384/2.

Dimensionnement des équipements producteurs de chaleur

Il est indispensable, pour tous les chauffages automatiques, d'effectuer un dimensionnement aussi précis que possible en fonction du besoin maximum de chaleur. Les équipements surdimensionnés fonctionnant à une puissance insuffisante sont coûteux et ont tendance à tomber plus souvent en panne.

Dénitrification et condensation des gaz de fumées

La dénitrification des gaz de fumées constitue une option possible, surtout pour les assortiments de combustible à teneur élevée en azote (bois de récupération, matériaux collés dérivés du bois, panneaux de particules). Le recours à des procédés de dénitrification des gaz de fumées fait actuellement l'objet d'essais dans des installations pilotes.

La condensation des gaz de fumées offre la possibilité, pour les combustibles à forte teneur en eau, d'une substantielle amélioration du rendement. Cette technique fait actuellement également l'objet d'essais en Suisse.

Valeurs indicatives pour l'estimation de la puissance thermique et des besoins annuels en combustible

Base: surface de référence énergétique SRE d'après la norme SIA 384/2

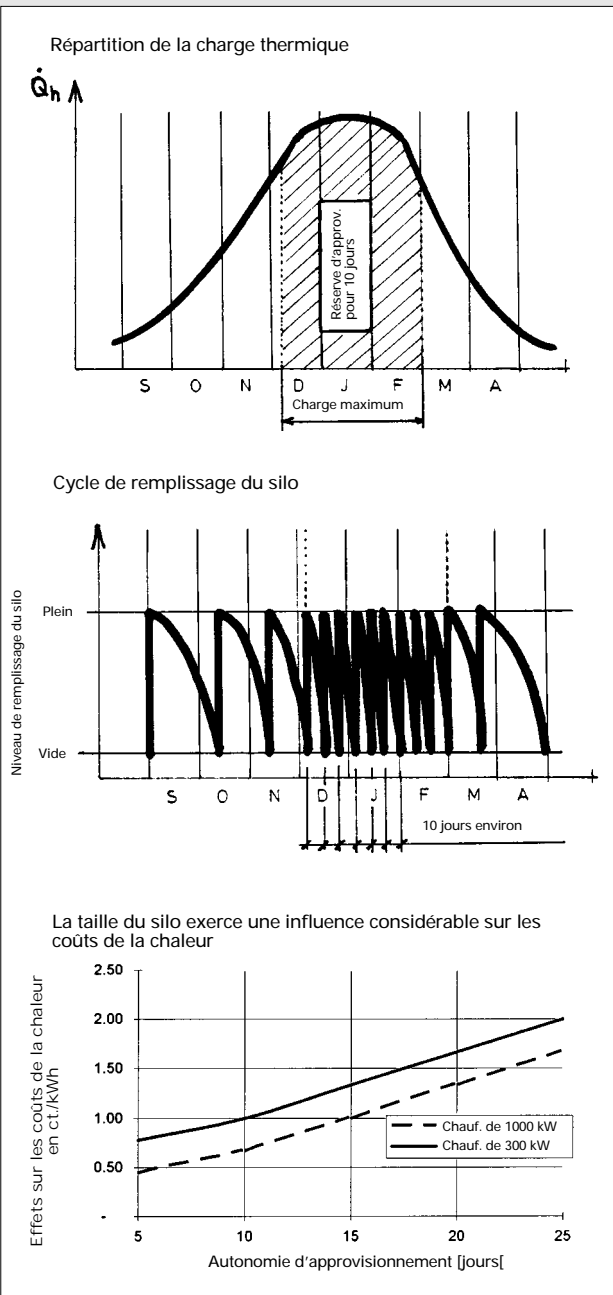
Besoins annuels de combustible par m<sup>2</sup> SRE

Combustible	Nouvelles constructions	Anciennes constructions	Unité
Plaquettes de bois dur	0.08	0.9-0.13	m <sup>3</sup> Pl/m <sup>2</sup> a
Plaquettes de résineux	0.10	0.11-0.16	m <sup>3</sup> Pl/m <sup>2</sup> a
Mazout	8	9-14	kg/m <sup>2</sup> a

Besoins en puissance thermique par m<sup>2</sup> SRE

Combustible	Nouvelles constructions	Anciennes constructions	Unité
Chauffage des locaux	30	40-60	W/m <sup>2</sup>
Eau chaude	10	10	W/m <sup>2</sup>
Pointes de chauffage	10	20	W/m <sup>2</sup>
Total	50	70-90	W/m <sup>2</sup>

Conception du silo



Taille recommandée du silo

Capacité nette = 5 x besoin journalier maximum + 30 m<sup>3</sup>

Les procédés de dénitrification et de condensation des gaz de fumées prendront, lorsque des conditions particulières entrent en jeu, probablement de l'importance au cours des années à venir. Ces techniques sont toutefois liées à des coûts accrus et l'on ne dispose pas encore d'expériences pratiques sur de nombreuses années.

Dimensionnement du silo à combustible

Aucun autre composant ne permet d'économiser ou de dépenser autant que le silo à combustible. C'est pourquoi sa conception doit tendre vers l'efficacité jusque dans ses moindres détails. Le silo doit être le plus petit possible, pour d'évidentes raisons de coût. Sa taille ne peut toutefois pas être déterminée sans tenir compte de la logistique; elle fait partie intégrante du concept d'approvisionnement en combustible.

Généralement, on contient les coûts dans des limites raisonnables, si le silo est conçu pour une autonomie d'approvisionnement moyenne d'une dizaine de jours, ce qui représente environ dix remplissages pendant un hiver moyen.

Voici un exemple tiré d'une étude de sensibilité des coûts en fonction de la taille du silo: dans le cas d'un chauffage à plaquettes de bois de 300 kW de puissance, un silo d'une capacité de 10 jours augmente le prix des plaquettes de Fr. 9.- à Fr. 10.-/m<sup>3</sup> Pl; si la capacité est portée à 30 jours, l'augmentation du prix des plaquettes passe à plus de Fr. 20.- /m<sup>3</sup> Pl.

Le nombre des mouvements de véhicules pour le remplissage du silo ne dépend pas de la taille de ce dernier, mais bien du besoin annuel en combustible et de la capacité de transport des véhicules utilisés. Un camion peut transporter jusqu'à 40 m<sup>3</sup> de plaquettes.



### Stockage intermédiaire saisonnier des plaquettes

L'approvisionnement le plus avantageux à partir de la forêt est l'approvisionnement direct, sans stockage intermédiaire, c'est-à-dire le déchetage mobile et l'amenée directe au silo du consommateur.

Le recours à un stockage intermédiaire saisonnier renchérit notablement les plaquettes; il convient donc d'en éviter la construction. Si un stockage intermédiaire doit être réalisé, par exemple dans les régions d'altitude, il y a lieu de construire si possible un dépôt de grande taille pour plusieurs chauffages au bois.

Un stockage intermédiaire peut aussi servir à l'entreposage du bois en piles provenant de plusieurs coupes en un lieu de rassemblement; le bois sera ensuite décheté sur place (appareil mobile ou stationnaire).

Le renchérissement du prix des plaquettes du fait d'un stockage intermédiaire doit rester en dessous de Fr. 5.-/m<sup>3</sup> PI.

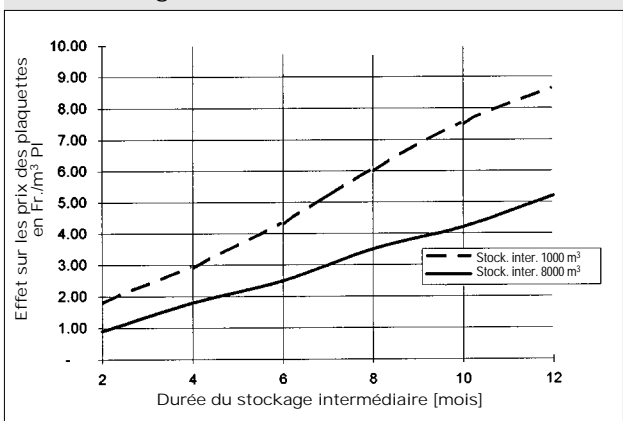
### Place nécessaire et dimensions de la chaufferie

La chaufferie doit être suffisamment haute pour abriter un chauffage automatique au bois. Une hauteur de 3 m est indispensable, même pour des chauffages de puissance moyenne, afin de pouvoir loger le séparateur des poussières et le dispositif d'évacuation des cendres en garantissant un certain confort d'utilisation.

Si, dans le cas d'installation de grande taille, il faut prévoir la dénitrification ou la condensation des gaz de fumées, la hauteur du local devra alors être portée à 4,5 m au moins.

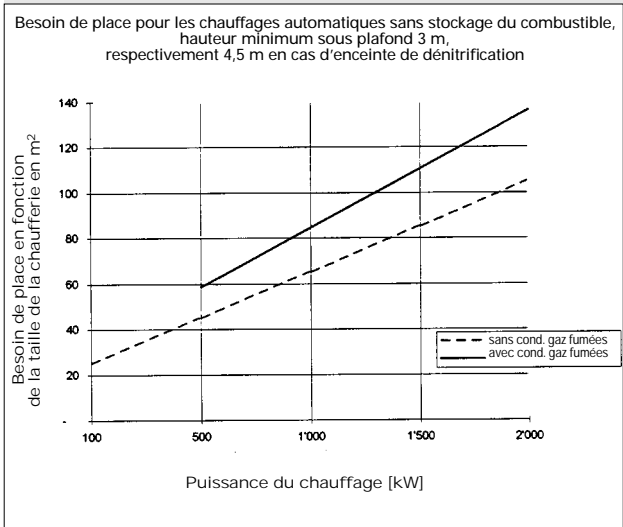
Lors de la conception de la chaufferie, il faut avoir présent à l'esprit que le local et l'échangeur de chaleur doivent être régulièrement nettoyés. L'espace autour de la chaudière et le dispositif d'évacuation des cendres sera donc généreusement dimensionné. Par ailleurs, il convient de prévoir suffisamment de place dans la chaufferie pour un conteneur de réserve pour les cendres (d'une capacité de 600 l dans les installations de grande dimension), ainsi que pour l'aspirateur à cendres.

### Renchérissement du prix des plaquettes du fait d'un stockage intermédiaire saisonnier

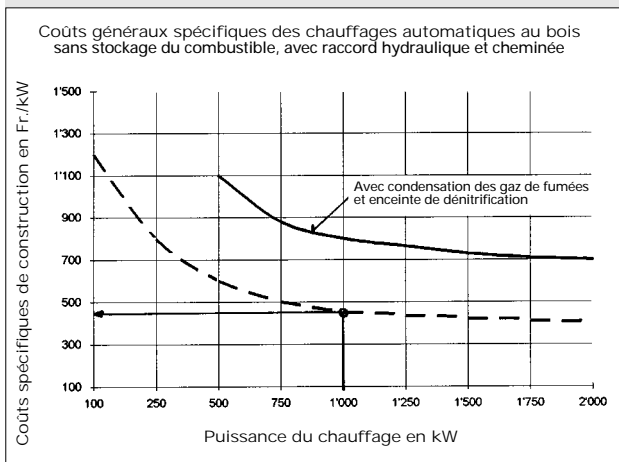


Conséquence: ce n'est que dans des stockages intermédiaires régionaux à brève durée d'entreposage que les coûts supplémentaires pour les plaquettes de bois peuvent être contenus dans des limites admissibles.

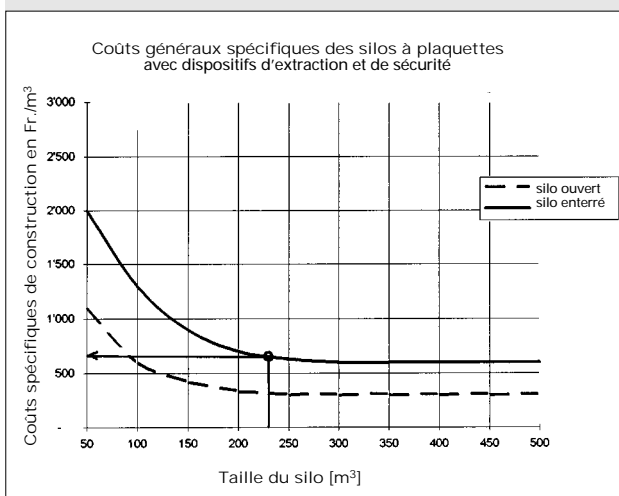
### Besoin de place pour les chauffages automatiques au bois



## Coûts des chauffages



## Coûts des silos



## Exemple

Prix de la chaleur utile dans le cas de figure suivant:

Puissance du chauffage: 1000 kW  
 Charge: 2000 heures annuelles de charge complète  
 Durée d'amortissement: 15 ans  
 Intérêts du capital: 5% (facteur d'annuité de 9,63%)

Chaleur utile:	2000 MWh/a
Coûts du chauffage au bois:	Fr. 450 000.-
Coûts du silo de 230 m <sup>3</sup> :	Fr. 150 000.-
Coûts du capital:	Fr. 58 000.-/a
Coûts de l'énergie (4 ct./kWh environ):	Fr. 80 000.-/a
Maintenance/entretien (environ 3,5% des coûts d'investissement):	Fr. 21 000.-/a
Prix de la chaleur utile:	8,0 ct./kWh

## 5.6 Estimation globale des coûts

## Objectif

Lors de l'étude préalable, une comparaison de différentes variantes dans l'étude préalable doit toujours intervenir à partir d'offres pour les composants les plus importants. Il est donc nécessaire de soumettre au maître d'ouvrage un aperçu des coûts ainsi qu'une comparaison avec les systèmes de chauffage conventionnels. C'est ainsi que le maître d'ouvrage pourra se déterminer en toute connaissance de cause en faveur de l'installation d'un chauffage automatique au bois.

Les diagrammes ci-contre peuvent servir à une estimation très approximative des coûts. Ils aideront en même temps à conduire une analyse plus poussée du projet spécifique et à choisir le type de chaudière et de silo le mieux adapté.

## Estimation du prix de la chaleur utile

Le caractère économique ou non d'une installation de production de chaleur se juge au coût d'obtention de la chaleur, soit au prix de la chaleur utile. Dans ce contexte, à côté des investissements, c'est la puissance de l'installation qui joue un rôle décisif.

Le prix de la chaleur utile d'un chauffage au bois automatique jusqu'à 500 kW de puissance ne devrait pas dépasser 14 ct./kWh. Pour les installations de plus de 500 kW, ce prix devrait rester en deçà de 10 ct./kWh.

Une première estimation des coûts peut être élaborée au moyen des diagrammes ci-contre.

## 5.7 Comparaison des variantes

### Forme et contenu

La comparaison des variantes permet la sélection du système. Elle se fera avec les propres facteurs de pondération du maître d'ouvrage, en tenant compte de tous les aspects techniques, économiques et écologiques. Le concepteur élabore les éléments nécessaires à la prise de décision qui appartient au maître d'ouvrage.

Il importe de tenir compte de tous les aspects pertinents lors de la prise de décision, étant donné que les seuls facteurs de rendement militent souvent contre le chauffage au bois. L'évaluation des critères écologiques et le souci de l'intérêt économique général revêtent ainsi une très grande importance.

### Comparaison économique

La comparaison économique se fait sur la base des coûts totaux annuels qui se composent des coûts du capital et des frais d'exploitation.

Les coûts du capital se calculent selon la méthode des annuités. Additionnés aux coûts de l'énergie, de l'entretien et de la maintenance, ils forment les coûts totaux annuels de la production de chaleur.

En plus de la comparaison avec les prix actuels de l'énergie, il y a également lieu de procéder à un calcul comparatif qui tienne compte des coûts externes. On peut appliquer ici la méthode des suppléments ajoutés au coût de l'énergie (chapitre 5.1).

#### Exigences pour la comparaison des variantes

- Définition des principes fondamentaux et des hypothèses de base
- Descriptif des variantes avec schéma de principe et caractéristiques
- Calcul des éventuelles aides financières aux investissements de la part de la Confédération et du canton
- Récapitulation des coûts d'investissement et calcul des coûts des intérêts et de l'amortissement
- Récapitulation de la consommation annuelle et des coûts moyens annuels de l'énergie
- Exploitation, maintenance et entretien; coûts moyens annuels de maintenance
- Comparaison économique en se fondant sur les coûts totaux annuels et les coûts de la production de chaleur
- Evaluation de l'écocompatibilité et des risques techniques
- Effets sur l'économie régionale
- Recommandations et arguments

Coûts annuels = coûts du capital + frais d'exploitation

#### Facteur d'annuité pour le calcul des coûts du capital

Taux d'intérêt Années	4%	5%	6%	7%
5	0,225	0,231	0,237	0,244
10	0,123	0,130	0,136	0,142
15	0,090	0,096	0,103	0,110
20	0,074	0,080	0,087	0,094
30	0,058	0,065	0,073	0,080

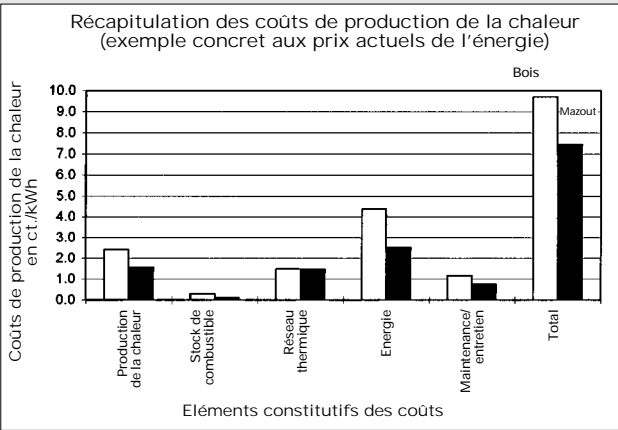
Coûts d'exploitation = coûts de l'énergie + coûts d'utilisation + frais de maintenance et d'entretien

Coûts de l'énergie = besoins annuels en combustible x prix du combustible

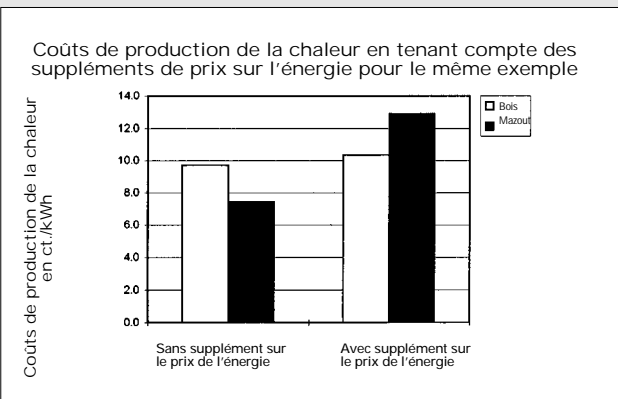
Coûts d'utilisation = main d'œuvre en heures x taux horaire

Frais de maintenance et d'entretien = 3% à 4% des coûts d'investissement

**Structure des coûts de la chaleur utile  
(Coûts de production de la chaleur)**

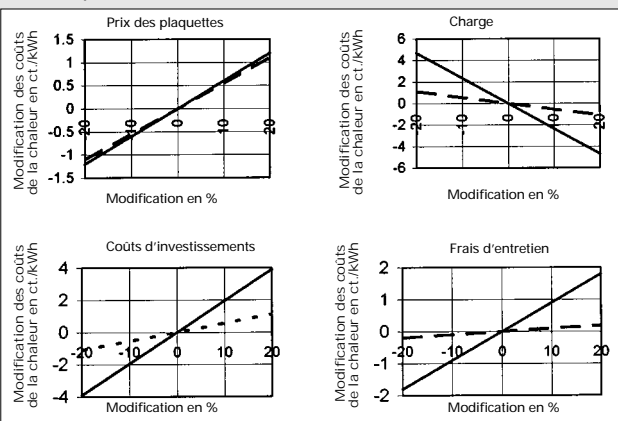


**Influence des coûts externes ajoutés au prix de l'énergie**



Calcul selon le chapitre 5.1

**Effets de la modification des conditions cadres sur le prix de la chaleur utile**



Source: Wirtschaftlichkeit der Holzenergienutzung in der Gemeinde (Analyse économique de l'utilisation de l'énergie bois dans les communes), Office fédéral de l'énergie, Berne 1994

**Structure des coûts du prix de la chaleur utile**

Il est possible, à partir des coûts annuels totaux, de dégager la structure des coûts de production de la chaleur. Selon que l'on est en présence d'un seul consommateur ou d'un réseau de chauffage à distance, la répartition des coûts peut se faire de la manière suivante:

- part des coûts d'investissement pour la production de chaleur;
- part des coûts d'investissement pour le réseau de chauffage à distance et pour la mise à disposition de la chaleur;
- part des coûts résultant du stockage du combustible;
- part des coûts du bois énergie;
- part des coûts d'exploitation, d'entretien et de maintenance.

**Influence du prix de l'énergie sur l'aspect économique**

Le calcul des coûts présente une large marge d'imprécision, même si les chiffres de base sont rassemblés avec soin. C'est surtout lorsque les résultats sont proches les uns des autres que les valeurs doivent faire l'objet d'une interprétation très prudente. Dans ces cas, la correction au moyen des coûts externes reportés sur le prix de l'énergie peut jouer un rôle décisif (voir le chapitre 5.1).

**Facteurs économiques importants**

Les facteurs économiques les plus importants sont les suivants:

- prix des plaquettes;
- frais d'entretien;
- coûts des investissements;
- puissance de l'installation.

L'importance du rôle de ces facteurs doit être estimée par le concepteur.

## 5.8 Avant-projet

Situation de départ après le choix du système

Avant d'entreprendre l'avant-projet, il faut avoir déterminé le type de chaudière, la taille du silo, son exploitation, ainsi que la chaîne d'approvisionnement. Seront également connus la place nécessaire, l'emplacement de la chaufferie et du silo, les besoins de puissance et de combustible ainsi que les dispositions de la CNA, de l'AEAI et de l'OPair qui doivent être respectées. On disposera également d'une estimation des coûts de production de la chaleur faite lors de l'étude préalable. L'agencement de la chaudière et du stock de combustible sera fixé, pour le système retenu, au stade de l'avant-projet. C'est également à cette occasion que l'on examinera les équipements complémentaires et qu'ils seront définis avec précision (dispositifs d'évacuation des cendres et de sécurité, par exemple).

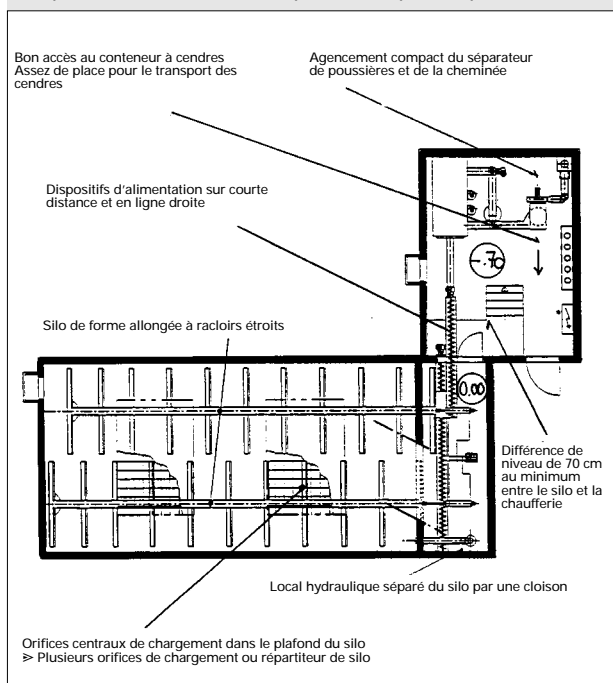
Emplacement de la chaudière, de la cheminée et du silo

La chaudière et le stock de combustible doivent être situés aussi près que possible l'un de l'autre. La différence de niveau doit être d'au moins 70 cm entre l'extraction du silo et la chaufferie pour pouvoir disposer d'une hauteur de chute. Lorsque cela n'est pas possible, ou si le niveau du silo se situe même en dessous de celui de la chaufferie, il faudra recourir à des vis sans fin inclinées pour amener le combustible à la bonne hauteur de chute et l'introduire dans la chaudière.

Lorsque l'on a recours à des sous-produits de la transformation du bois, il faut prévoir suffisamment de place pour l'installation d'un sas à roue cellulaire avant la chute. Dans ce cas, la différence de niveau doit être de 80 à 90 cm.

La cheminée doit se trouver aussi près que possible du séparateur des poussières. Le risque de passer en dessous du point de condensation est plus grand dans le cas des chauffages au bois que dans celui des chauffages au mazout. Le point de condensation, lors de la combustion de plaquettes forestières vertes, est de 60°C, notablement au-dessus de celui des chauffages au mazout. C'est particulièrement lors de rénovations où l'on utilise les conduits de cheminée existants qu'il convient de veiller à ce point. Il faut examiner cet aspect avec le fournisseur de cheminée et le ramoneur, un tubage pouvant se révéler nécessaire.

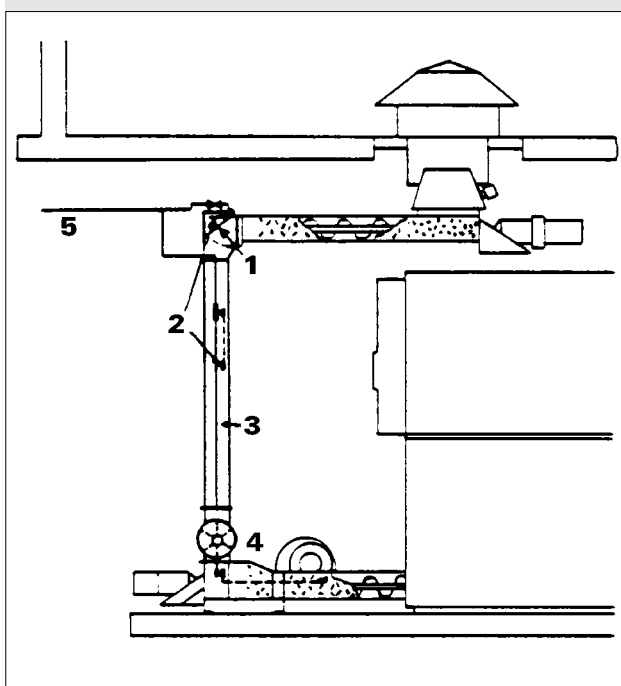
Emplacement des composants principaux



### Intégration du dispositif d'évacuation des cendres

Lors de la combustion du bois 1% au maximum de son poids ressort en cendres incombustibles. La quantité de cendres est plus élevée lors du recours aux écorces (pierres et sable). Les résidus sous forme de cendres doivent être enlevés de la chaudière et de l'échangeur de chaleur et placés dans des récipients appropriés. Les chauffages automatiques au bois de grande taille (à partir de 150 kW environ) peuvent être dotés de dispositifs automatiques d'évacuation des cendres, équipés le plus souvent de conteneurs à cendres d'une capacité de 600 l.

Chaîne de sécurité: l'exemple des sous-produits de la transformation du bois



- 1 Clapet de protection contre l'incendie
- 2 Sprinkler à déclenchement thermique
- 3 Tube de chute
- 4 Sas à roue cellulaire
- 5 Raccordement à l'eau d'extinction

Les points 1 et 4 tombent en cas d'utilisation de bois forestier à la teneur en eau supérieure à 20%.

### Dispositifs spéciaux de sécurité

A côté des dispositifs habituels de sécurité du réseau hydraulique (soupape de sécurité et dispositif d'expansion), il convient d'empêcher, dans le cas des chauffages automatiques au bois, la propagation d'un incendie et de prévenir les accidents résultant des gaz de fermentation. Les normes et les dispositions légales (CNA, AEAI) prescrivent différents niveaux de sécurité en fonction des assortiments de bois énergie.

## 6. Projet de détail

---

6.1	Déroulement et organisation du projet	109
	Centrale thermique et équipements périphériques	109
	Plusieurs partenaires contractuels	110
	Obligation de garantie	110
	Particularités dans le déroulement du projet	111

---

6.2	Dimensionnement et choix du chauffage	112
	Puissance nominale et rendement annuel	112
	Choix de la chaudière	113
	Conception des dispositifs d'alimentation	113
	Caractéristiques du transport des copeaux	114
	Nettoyage de la chaudière et évacuation des cendres	114
	Dénitrification des gaz de fumées	115

---

6.3	Disposition et choix du stockage du combustible	116
	Taille optimale du silo: considérable potentiel d'économies	116
	Alternative à un silo enterré	116
	Conteneur mobile de plaquettes	117
	Approvisionnement à partir d'une halle à plaquettes	117
	Emplacement d'un silo à copeaux	117

---

6.4	Conseils pour la conduite d'un projet de silo	118
	Dimensionnement des silos à plaquettes	118
	Conseils pour les silos à copeaux	119

---

6.5	Raccordement hydraulique	120
	Principes connus	120
	Emission de chaleur pendant le maintien du lit de braises	120
	Installations à plusieurs chaudières	121
	Accumulateur en vue de couvrir les phases de faible demande	121

---

6.6	Commande et régulation	122
	Adaptation de la puissance du chauffage à la demande de chaleur	122
	Combustion optimale sur toute la plage de puissance	122
	Technologies d'avenir en matière de régulation	123
	Armoire de commande	123

---

6.7	Dispositifs de sécurité pour l'installation, la chaufferie et le silo	124
	Aspects particuliers des chauffages au bois	124
	Comment éviter toute concentration dangereuse de gaz de fermentation	124
	Dispositifs de protection contre l'incendie	124
	Vases d'expansion	125

---

---

6.8	Conseils pour la conception de la chaufferie et du silo	126
	Amenée de l'air comburant	126
	Cheminée	127
	Mesure des émissions selon l'OPair	128
	Protection constructive contre l'incendie dans la chaufferie	128
	Prescriptions sur les silos	129

---



## 6. Projet détaillé

### 6.1 Déroulement et organisation du projet

Centrale thermique et équipements périphériques

Contrairement aux installations conventionnelles, le concepteur d'un chauffage automatique au bois doit se charger, en plus de ce qui relève de son domaine de spécialisation, de la conduite du projet englobant la périphérie, tout au moins de son organisation.

La chaîne d'approvisionnement de bois forestier impose des tâches supplémentaires de planification et de coordination :

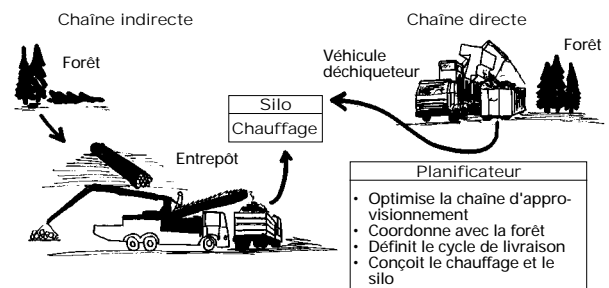
- réalisation des voies d'accès et des emplacements pour la manutention des plaquettes ;
- aide et collaboration lors de la conception des lieux de stockage intermédiaire de bois en grumes dans le cas d'une solution de déchiquetage sur les lieux de l'installation ;
- coordination entre le spécialiste de la statique, le maître d'œuvre et le fournisseur du système lors de la construction d'un silo ;
- supervision des plans de coffrage et d'agencement pour le silo et le local hydraulique.

Lorsqu'il s'agit d'entreprises de transformation du bois, les tâches annexes aux équipements périphériques peuvent être très étendues :

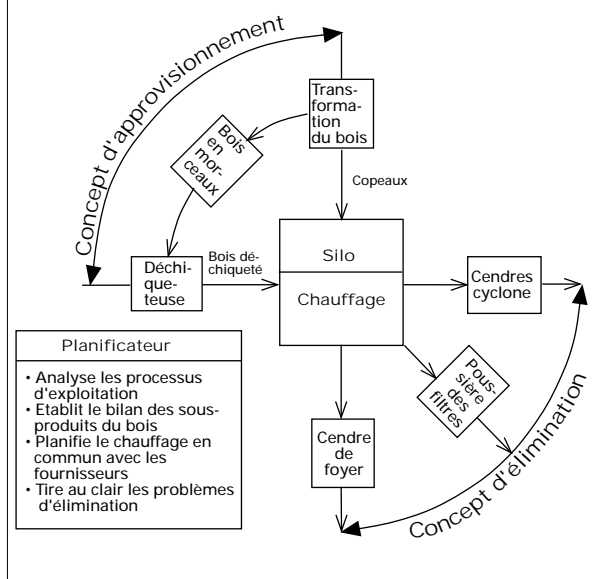
- intégration de l'aspiration de la poussière de ponçage et des copeaux au système d'alimentation du silo ;
- choix des broyeurs fixes appropriés pour les sous-produits de la transformation du bois et leur intégration dans le flux d'alimentation du silo ;
- définition des points de raccordement pour l'eau d'extinction aux différents dispositifs de sécurité ;
- définition des points de branchement électrique pour les dispositifs de convoyage, le broyeur et les équipements de sécurité ;
- supervision du projet de dimensionnement du silo par l'ingénieur civil et le fournisseur du système ;
- supervision des questions de logistique (emplacement du silo et du chauffage, technique d'alimentation, etc.) ;
- collaboration à l'élaboration d'un concept d'élimination des déchets de bois et des cendres posant problème.

#### Position du planificateur dans le mandat global

Chaîne d'approvisionnement en bois forestier: questions de logistique en cas d'approvisionnement par la forêt



Chaîne d'approvisionnement pour les sous-produits du bois: processus complexes dans l'entreprise de transformation du bois



L'ouvrage est le résultat d'un travail en commun

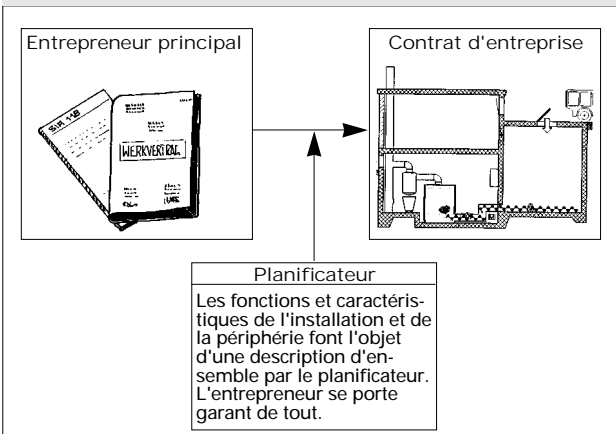
- Le fabricant du chauffage réalise le chauffage ainsi que les dispositifs d'alimentation et de transport.
- L'entrepreneur chauffagiste relie la chaudière au système hydraulique.
- L'entreprise de construction est responsable de la construction du silo.
- L'entreprise fournissant la cheminée raccorde les équipements de gaz de fumées et livre la cheminée.

Plusieurs partenaires contractuels

Ce sont en général plusieurs partenaires contractuels qui réalisent l'ensemble de l'ouvrage. Cela signifie pour le concepteur qu'il doit établir un contrat d'entreprise avec chaque sous-traitant sur la base d'un cahier des charges correspondant, après appel d'offres préalables.

La coordination technique et le respect des délais par les différents sous-traitants font également partie des tâches du concepteur.

Un entrepreneur principal - un contrat d'entreprise

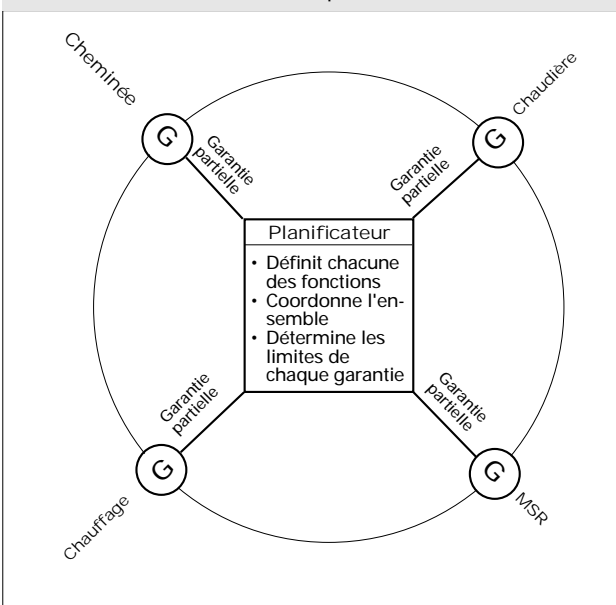


Obligation de garantie

Le fonctionnement et les caractéristiques d'une installation complète de chauffage automatique au bois ne sont pas garantis par une seule entreprise. Bien au contraire, chacune d'entre elles assume la garantie de sa seule part. Cela signifie que le concepteur doit, dès la phase d'élaboration d'un contrat d'entreprise, déterminer avec précision comment sera assumée l'obligation de garantie portant sur l'ensemble de l'installation.

Il est ici possible de faire jouer à l'entrepreneur en chauffage le rôle d'entrepreneur principal. Il livre l'ensemble de l'installation, sans le silo, mais avec la totalité de l'approvisionnement en combustible ainsi que tous les appareils de chauffage et de régulation. Les fournisseurs du chauffage et de la cheminée sont alors ses sous-traitants.

Plusieurs sous-traitants - plusieurs contrats



Les rapports juridiques sont ainsi clairement réglés, car le maître d'ouvrage n'a plus qu'un seul partenaire contractuel qui assume la garantie. La plupart du temps, le prix de l'installation renchérit notablement, du fait des prises de commission de l'entrepreneur principal. C'est pourquoi, lors de recours à un concepteur, le maître d'ouvrage préférera une solution avec plusieurs partenaires contractuels; il demandera à l'ingénieur spécialiste d'inscrire les garanties nécessaires dans les différents contrats.

Il en résulte pour le concepteur qu'il doit établir une description précise du fonctionnement de l'installation et des équipements périphériques. Le fonctionnement de l'ensemble doit être expliqué dans chaque contrat d'entreprise, avec les aspects particuliers à la partie concernée.

### Particularités dans le déroulement du projet

Il est nécessaire, lors de l'élaboration du projet de détail, de s'assurer suffisamment tôt le soutien d'un entrepreneur expérimenté en bâtiment. La collaboration d'un spécialiste de la statique de la construction est également indispensable dans la plupart des cas pour le dimensionnement du silo et pour l'établissement des plans de coffrage et d'agencement.

Le concepteur fait en sorte que l'indispensable échange d'informations et de documents ait bien lieu entre le constructeur du silo et le fournisseur du système; il garantit que les tâches soient clairement distribuées :

- qui s'occupe des éléments de commande pour l'approvisionnement et l'extraction du silo;
- qui fournit et s'occupe des profils d'ancrage pour les éléments hydrauliques et les entraînements à moteur;
- qui construit et monte le couvercle du silo, et quand;
- qui donne les indications nécessaires sur les charges statiques et dynamiques.

**Rendement annuel  $\eta_a$  des chauffages automatiques au bois**

Pour les détails du calcul du rendement annuel, voir le chapitre 2.8 et l'annexe A3.

$$\eta_a = \eta_c \frac{P - q_A / \alpha}{P - q_A}$$

Où:

$\alpha$    taux d'utilisation [-]  
 $\eta_c$    rendement de la chaudière  
 $q_A$    pertes en attente  
 $P$     niveau de charge

Valeurs cibles pour les bons chauffages automatiques au bois:

$\alpha$     > 0,60  
 $\eta_c$     > 0,85  
 $q_A$     < 0,02  
 $P$      0,50  
 $\eta_c$     0,75 ... 0,85

## 6.2 Dimensionnement et choix du chauffage

### Puissance nominale et rendement annuel

Le dimensionnement de la chaudière des chauffages automatiques au bois joue sur le rendement annuel un rôle plus important que dans le cas des chauffages au mazout. Les raisons en sont les suivantes:

- la température moyenne de l'eau dans la chaudière est plus élevée (plus de 70°C, pertes par rayonnement de 2% environ, de moins de 1% dans les chaudières à mazout);
- pertes en attente plus élevées du fait de l'enceinte de combustion réfractaire à haute température (pertes thermiques pendant le maintien du lit de braises).

Les pertes en attente s'accroissent spectaculairement si l'installation est surdimensionnée, car elle se trouvera alors souvent en mode de maintien du lit de braises.

Dans le cas d'une installation monovalente à une chaudière, la puissance nominale de cette dernière doit se situer aussi près que possible du besoin maximum de puissance thermique. C'est une exigence qui ne peut pas toujours être satisfaite dans le cas d'un réseau de chauffage à distance car le raccordement des usagers se fait souvent en plusieurs étapes. Il faut alors rechercher un mode acceptable d'adaptation au plan de raccordement des usagers en jouant sur les capacités de plusieurs chaudières. C'est dans des cas de ce genre qu'une installation monovalente à plusieurs chaudières ou une installation bivalente (en combinaison avec un chauffage au mazout par exemple) peuvent constituer des solutions très satisfaisantes.

La fourniture de l'eau chaude sanitaire en été ne doit pas se faire au moyen d'un chauffage au bois. Les consommateurs d'été doivent être gérés de façon autonome, même dans le cas d'un réseau de chauffage à distance.

### Choix de la chaudière

Les chauffages automatiques au bois modernes permettent aujourd'hui l'adaptation de leur puissance à la demande thermique du moment, sur une certaine plage de puissance. Celle-ci dépend du principe de chauffage retenu ainsi que de la teneur en eau du combustible.

Pour toute régulation de la puissance, il importe que les conditions de combustion s'adaptent à tous les niveaux de la demande de chaleur.

La largeur de la plage de régulation de la puissance et la qualité de la régulation de la combustion constituent des critères décisifs lors du choix du produit.

### Conception des dispositifs d'alimentation

Le concepteur n'intervient que faiblement sur le dimensionnement des dispositifs d'extraction et de convoyage. Le principe de transport dépend du combustible; la grandeur et les dimensions des dispositifs de convoyage sont déterminés par le fournisseur du chauffage qui se fonde sur la puissance de la chaudière et la dimension du silo.

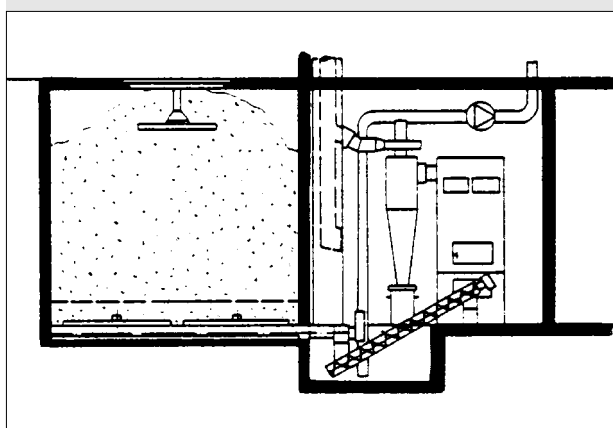
Par contre, il incombe au concepteur de décider la disposition du silo et de la chaudière. En plus de l'exigence de proximité du stockage du combustible et de la chaudière, les points suivants doivent être pris en considération :

- si l'assortiment est composé de bois vert, des bouches d'aération sont indispensables aux points bas en cas de convoyage incliné (accumulation des gaz de fermentation);
- dans le cas d'installations à plusieurs chaudières, chacune d'entre elles doit disposer de son propre système d'alimentation;
- l'accès à la chaudière, au séparateur des poussières et à la cheminée ne doit pas être gêné par les dispositifs de convoyage.

### Adaptation de la charge de divers chauffages

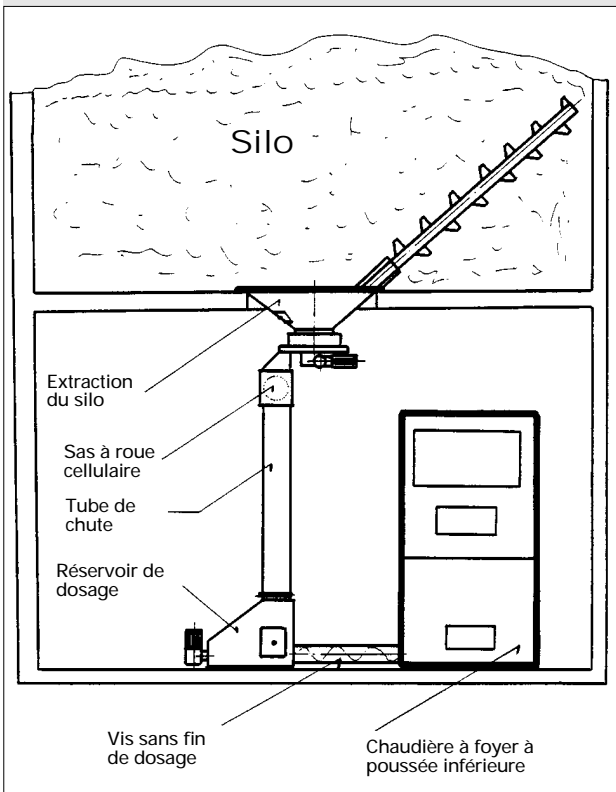
Dans les systèmes modernes de chauffage, l'adaptation de la puissance va généralement de 30% à 100%.

### Ventilation forcée en cas de puits d'extraction surbaissé



La fermentation du bois vert produit du CO<sub>2</sub> qui se rassemble dans les points les plus bas. Si aucune autre disposition n'est possible, il faut absolument inclure une ventilation mécanique forcée.

## Transport mécanique des copeaux



## Caractéristiques du transport des copeaux

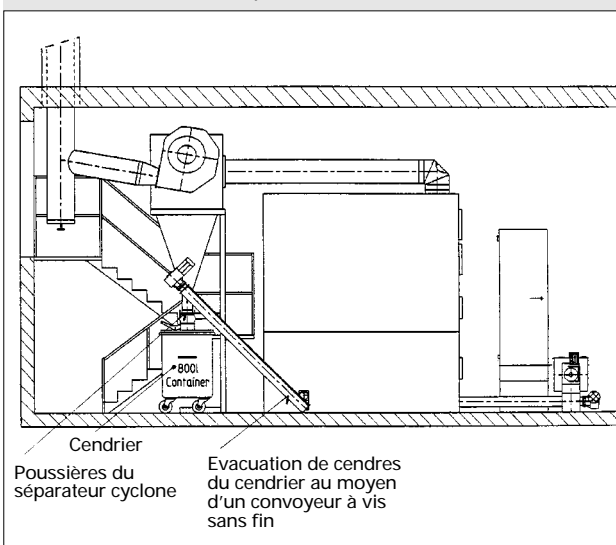
Le transport des copeaux est possible par des procédés pneumatiques ou mécaniques. Dans le cas des systèmes pneumatiques, des soufflantes assurent le transport. Des vis sans fin sont utilisées dans les systèmes mécaniques.

Si les conditions architecturales le permettent, par exemple en cas de transport sur de courtes distances, les systèmes de convoyage mécaniques sont à préférer aux systèmes pneumatiques.

Avantages des systèmes mécaniques de convoyage :

- ils sont moins sujets aux pannes ;
- ils requièrent moins d'énergie de fonctionnement ;
- ils sont moins chers.

## Evacuation mécanique des cendres



## Nettoyage de la chaudière et évacuation des cendres

Les cendres subsistant après la combustion se trouvent aux endroits suivants :

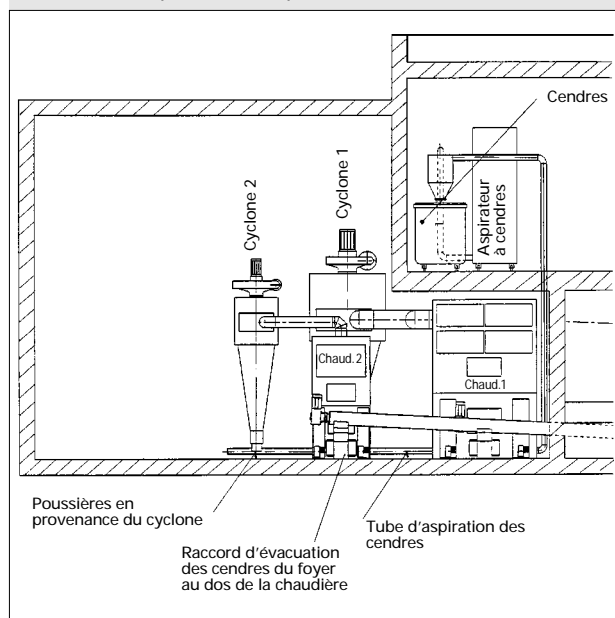
1. dans le foyer lui-même, sous la grille (cendres de grille) ;
2. dans l'enceinte de combustion proprement dite (cendres de grille) ;
3. dans les conduits de l'échangeur de chaleur de la chaudière (cendres volantes) ;
4. au point de chute des cendres dans le cyclone (cendres de cyclone).

Ces zones doivent être périodiquement nettoyées et décalaminées par le préposé au chauffage. Ce travail est exécuté à l'aide d'aspirateurs à séparateurs métalliques intégrés pour recevoir des particules de cendres encore incandescentes.

Dans les installations de grande taille (à partir de 150 kW de puissance nominale), on emploie de plus en plus fréquemment des dispositifs automatiques d'évacuation des cendres ; ceux-là réduisent notablement la quantité de travail nécessaire au nettoyage. A côté des dispositifs pneumatiques d'évacuation des cendres que l'on connaît depuis longtemps, des systèmes mécaniques s'imposent de plus en plus. Si l'espace disponible le permet et si la construction de la chaudière l'autorise, il convient de donner la préférence aux dispositifs mécaniques dont les avantages sont les suivants :

- ils ont une meilleure action de nettoyage ;
- ils sont moins sujets aux pannes ;
- ils coûtent moins cher.

#### Evacuation pneumatique des cendres



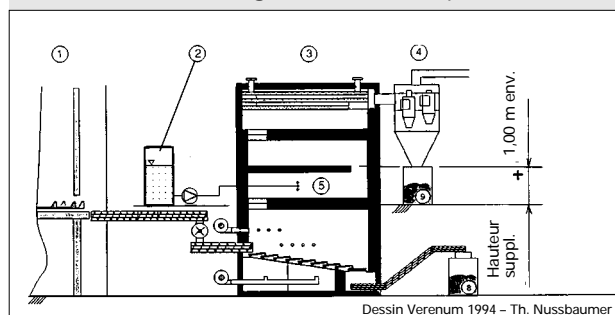
#### Dénitrification des gaz de fumées

Les procédés SNCR et SCR sont actuellement appliqués dans des installations pilotes où ils donnent des résultats très prometteurs dans l'optique d'une réduction des oxydes d'azote  $\text{NO}_x$ .

Dans le cas du procédé SNCR, une enceinte de dénitrification est montée entre la grille du foyer et le conduit de fumées de la chaudière. Une solution d'urée provenant d'un réservoir est pulvérisée dans cette chambre à l'aide d'un dispositif approprié. L'urée réagit avec les oxydes d'azote à des températures comprises entre  $850^\circ\text{C}$  et  $950^\circ\text{C}$ , ce qui entraîne une réduction des émissions de  $\text{NO}_x$  de près de 60% à 80%.

Le réacteur, la station de dosage de l'urée et le réservoir demandent passablement de place. Une installation de ce genre coûte, pour un chauffage de la classe de puissance dès 500 kW, de Fr. 80 000.- à Fr. 90 000.- environ. L'urée nécessaire se trouve sous forme de granulés en sacs de 50 kg. Ce produit est peu coûteux, de telle sorte que les frais d'exploitation sont à peine affectés par la consommation d'urée.

#### Dénitrification des gaz de fumées, procédé SNCR

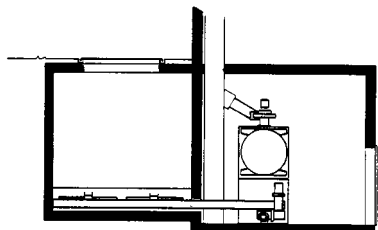


- ① Silo et dispositif d'extraction
- ② Réservoir pour l'agent réducteur (urée par exemple)
- ③ Chaudière
- ④ Séparateur cyclone
- ⑤ Enceinte de réduction SNCR avec dispositif de pulvérisation
- ⑧ Cendres du foyer
- ⑨ Cendres du cyclone

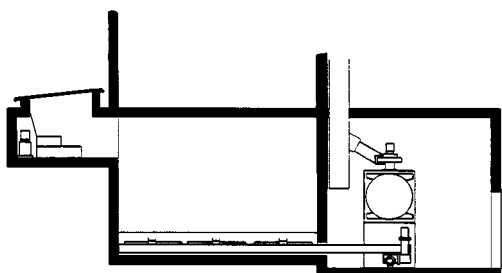
Ces mesures coûtent de Fr. 20.- à Fr. 30.- par kg de  $\text{NO}_x$  réduit ; elles sont plus chères que dans le cas de la réduction des  $\text{NO}_x$  par la technologie low  $\text{NO}_x$  utilisée dans le cas des chauffages au mazout ou au gaz.

## Disposition des silos à plaquettes

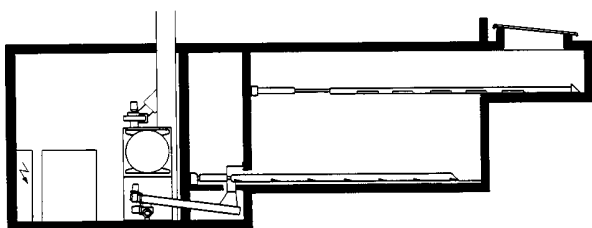
Silo en dehors du bâtiment



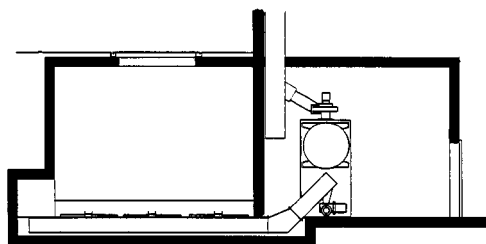
Silo sous le bâtiment



Silo à orifice de remplissage externe



Extraction du silo en dessous du niveau de la chaufferie



## 6.3 Disposition et choix du stockage du combustible

Taille optimale du silo : considérable  
potentiel d'économies

Dès la phase de l'étude préalable, il y a lieu de bien choisir l'emplacement du silo, sa taille et le mode d'approvisionnement en combustible. Dans le projet de détail, il s'agit d'affiner les données relatives au lieu de stockage, à la livraison et aux auxiliaires de remplissage. Les points suivants sont importants :

- la taille du silo doit suffire à une consommation moyenne de 10 jours ;
- le nombre annuel de remplissages dépend de la capacité des véhicules de livraison et des besoins annuels, et non de la capacité du silo ;
- il faut éviter tout stockage intermédiaire dans la chaîne d'approvisionnement.

Lors de la construction du silo également, on peut s'épargner des frais lors du choix des systèmes auxiliaires de remplissage et de répartition du combustible ainsi que dans les dispositifs d'aération.

## Alternative à un silo enterré

Certains fournisseurs de plaquettes disposent, en plus des bennes de 30 m<sup>3</sup> environ, de conteneurs pneumatiques à pompe d'une capacité de 28 m<sup>3</sup>. Ceux-ci permettent aussi bien le remplissage de halles à plaquettes que l'alimentation en cas d'agencement peu propice du silo. Un couvercle de silo carrossable ou un coûteux orifice de remplissage en dehors du bâtiment ne sont dès lors plus indispensables. Les solutions d'approvisionnement par véhicules à pompe sont aujourd'hui très répandus en Autriche. En cas de remplissage pneumatique, il faut toutefois s'assurer que l'air nécessaire à la propulsion des plaquettes puisse s'écouler en suffisance du silo. L'ouverture correspondante est à prévoir, si possible, près de l'orifice de remplissage. Les coûts supplémentaires d'approvisionnement pneumatique se montent à Fr. 4.-/m<sup>3</sup> PI environ. L'opération de remplissage dure près de 15 minutes.

S'il faut néanmoins procéder au remplissage à l'aide de véhicules à benne basculante, alors un répartiteur hydraulique de plaquettes s'avérera le plus souvent nécessaire, en plus de l'orifice de remplissage. On évitera si possible que le couvercle du silo ne soit carrossable, auquel cas il doit être muni d'une rigole pour l'écoulement des eaux pluviales.



### Conteneur mobile de plaquettes

A l'occasion d'assainissements, l'ajout d'un silo à plaquettes serait trop cher dans la plupart des cas, voire impossible pour des raisons architecturales. On peut alors envisager l'approvisionnement au moyen de conteneurs mobiles de plaquettes de 30 m<sup>3</sup> munis d'un extracteur de fond intégré. Un ou plusieurs conteneurs sont alors posés à convenance contre le bâtiment. La liaison est assurée par un convoyeur transversal fixe qui amène les plaquettes extraites à la chute dans le bâtiment. Il est important de prévoir, avant la vis de dosage, un récipient pour le stockage intermédiaire des plaquettes correspondant à la consommation de trois jours (approvisionnement en fin de semaine). Le groupe d'entraînement des convoyeurs à racloirs des conteneurs est également logé dans la chaufferie.

Le loyer d'un conteneur de 30 m<sup>3</sup> se monte à Fr. 6.-/jour environ. La location de conteneurs de ce genre est possible auprès d'un fournisseur de bois énergie, d'une entreprise forestière ou d'une commune.

### Approvisionnement à partir d'une halle à plaquettes

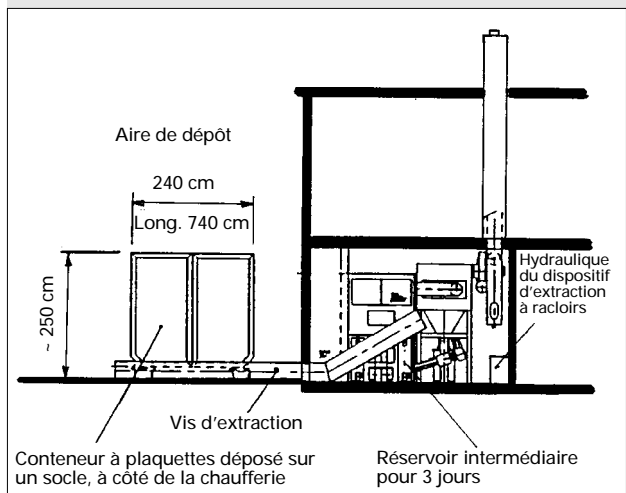
A la place d'un coûteux silo enterré, on peut concevoir des halles à plaquettes ouvertes, dans le cas d'installations de grande taille. Le chargement se pratique à l'aide d'un procédé pneumatique ou par l'intermédiaire de convoyeurs à bande. Le chargement pneumatique prévoit l'accouplement du conteneur à un tube répartiteur installé à demeure à l'intérieur de la halle.

Dans les grandes halles à plaquettes, le combustible est introduit au moyen d'une pompe stationnaire, à partir d'un puits de remplissage (dans ce cas, attention à la poussière dégagée par des plaquettes sèches). Dans les grandes installations, seule une partie de l'aire est munie de dispositifs d'extraction. Le déplacement des plaquettes dans la halle peut se faire au moyen d'une grue à cabine fixée au toit de la halle.

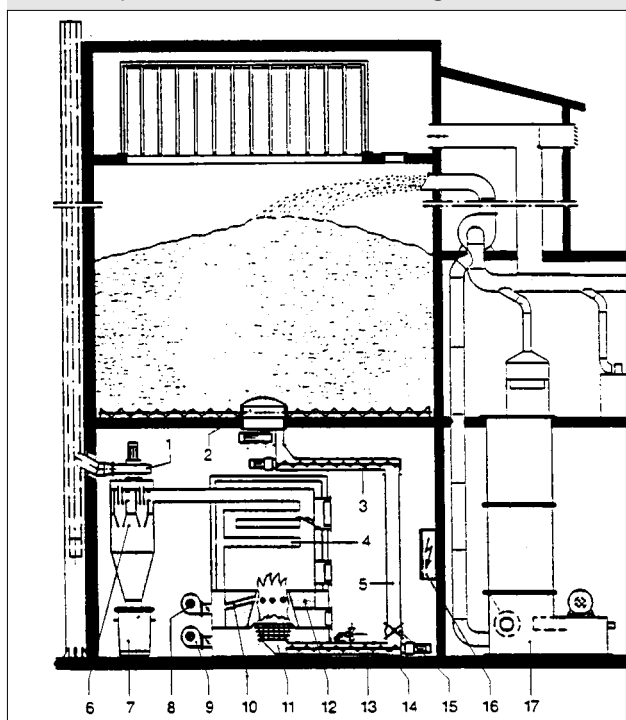
### Emplacement d'un silo à copeaux

Le remplissage d'un silo à copeaux est toujours combiné au système d'aspiration des copeaux de l'entreprise. On peut aussi connecter un déchiqueteur à l'installation d'aspiration. C'est pourquoi le silo à copeaux doit toujours être situé au-dessus de la chaufferie. Lors du choix de l'emplacement du silo, on veillera à écourter le trajet du combustible, de son extraction du silo à la chaudière.

### Conteneur à plaquettes à côté de la chaufferie

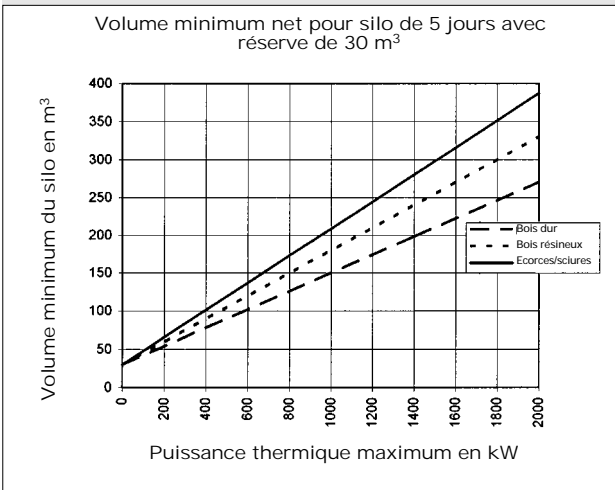


### Silo à copeaux, chaufferie et chargement du silo

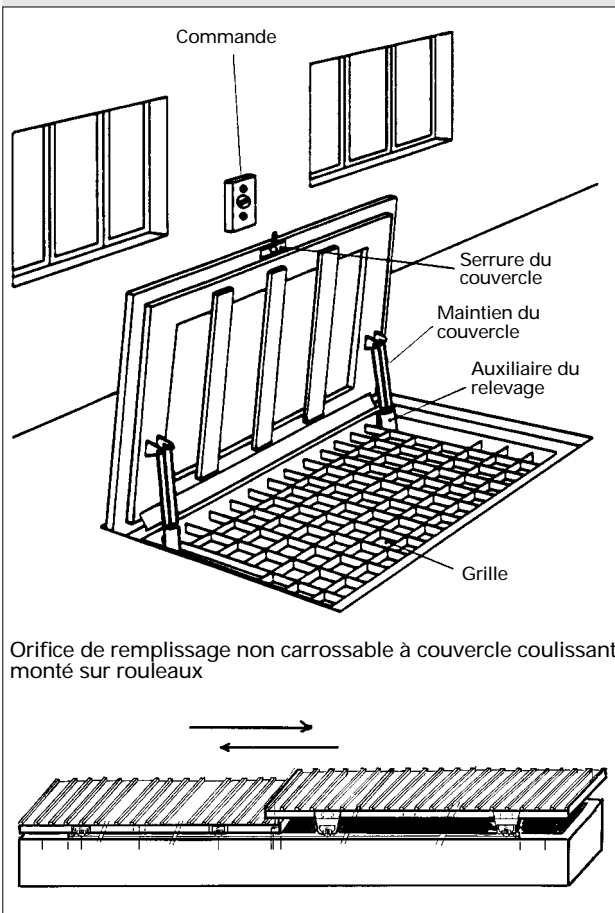


- |   |  |
|---|--|
| 1 Ventilateur pour les gaz de fumées              | 10 Tube pour l'air secondaire                                |
| 2 Dispositif d'extraction du silo, à vis centrale | 11 Cornue de combustion à grille en fonte                    |
| 3 Vis sans fin de dosage                          | 12 Revêtement réfractaire résistant aux températures élevées |
| 4 Chaudière à hautes performances                 | 13 Protection contre les retours de feu                      |
| 5 Canal de chute                                  | 14 Dispositif d'alimentation à poussée inférieure            |
| 6 Séparateur multicyclone                         | 15 Sas à roue cellulaire                                     |
| 7 Cendrier  | 16 Commande électrique                                       |
| 8 Ventilateur pour l'air secondaire               | 17 Broyeur   |
| 9 Ventilateur pour l'air primaire                 |  |

Valeurs indicatives pour la taille du silo  
 Taille du silo = 5 x besoin journalier maximum  
 + 30 m<sup>3</sup>



Réalisation de l'orifice de remplissage



## 6.4 Conseils pour la conduite d'un projet de silo

Dimensionnement des silos à plaquettes

### Extraction et qualité des plaquettes

Un extracteur de fond à poussoirs est recommandé pour les plaquettes forestières, les plaquettes de bois provenant des scieries et les écorces. L'extracteur de fond est insensible aux grands morceaux de chute et aux corps étrangers, telles les pierres. Il faut toutefois exiger du fournisseur de plaquettes un produit tamisé pour éviter tout blocage des vis sans fin placées en aval. Lorsque ce n'est pas possible, par exemple pour les écorces et les délignures, il y a lieu de recourir à des systèmes de transport à translation.

### Grandeur et géométrie du silo

La grandeur et la géométrie du silo dépendent des facteurs suivants :

- l'exigence de compression des coûts entraîne la réduction de la taille du silo et de sa capacité, par exemple pour une période de 5 jours + 30 m<sup>3</sup> de réserve pour assurer la continuité de l'approvisionnement ;
- la largeur maximum d'une unité de racloirs est de 2 m ; plusieurs unités à racloirs doivent être prévues pour des silos plus larges (attention au coût !);
- la demande de silos étroits et de faible encombrement ;
- l'exigence d'un taux de remplissage aussi élevé que possible (l'angle de talus des plaquettes est de 45°) ;
- le risque de tassement des plaquettes forestières : hauteur maximum 5 m.

### Couvercle du silo

Il faut préférer, pour des motifs de coûts, un couvercle de silo non carrossable. Parfois, l'argument du moindre risque de dommages occasionnés par les manœuvres des camions milite en faveur de la solution plus chère d'un couvercle carrossable. Ce point est à tirer au clair avec le fournisseur de bois avant d'entreprendre le projet de détail.

### Charge statique

La charge statique sur les parois dépend de la teneur en eau des plaquettes. On peut compter, pour les plaquettes de bois sec, avec une densité en vrac de 300 kg/m<sup>3</sup> PI ; celle-ci se monte à 500 kg/m<sup>3</sup>

PI dans le cas des plaquettes forestières de bois vert. Les parois du silo doivent être aussi lisses que possible.

#### *Portes de montage et de service*

Il faut aménager, dans les portes de montage et de service, des jalousies ou des lamelles obliques relevables dans le cadre de la porte afin qu'elle puisse être ouverte en tout temps.

#### Conseils pour les silos à copeaux

##### *Extraction et forme du silo*

Les plaquettes sèches et les copeaux dont la teneur en eau ne dépasse pas 20% sont stockés dans des silos à copeaux. Les vis sans fin centrales amenant le combustible au centre conviennent mieux aux silos circulaires ou carrés que les systèmes coniques ou pendulaires.

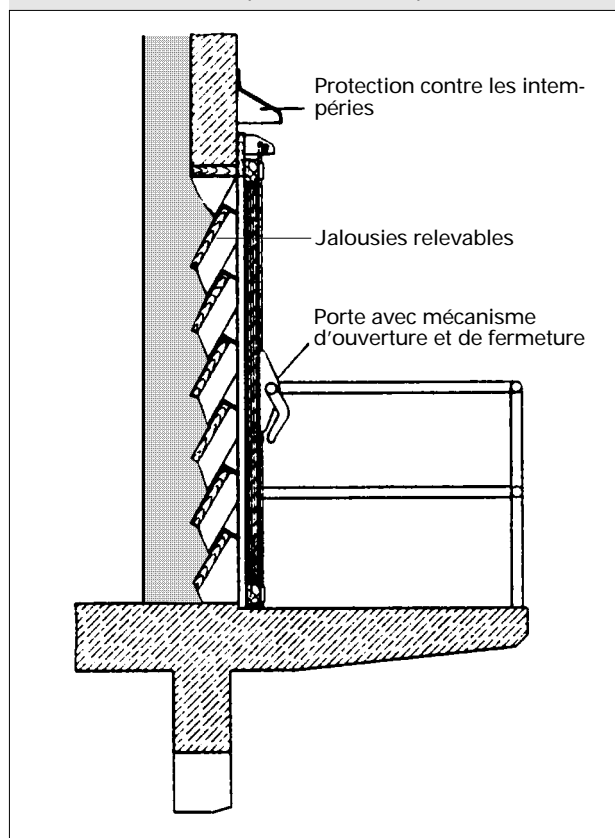
Il faut recourir à un système à racloirs dans le cas des silos rectangulaires (par ex. en cas de transformation).

##### *Taille du silo*

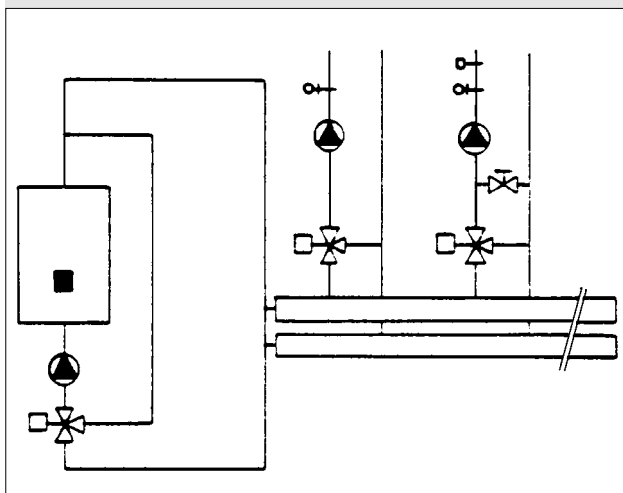
La taille du silo est fonction du bilan des besoins quotidiens de bois énergie. Un silo à copeaux joue à la fois le rôle de distributeur de combustible et de tampon chargé de stocker le flux de matériaux. Il appartient donc au concepteur d'estimer la quantité de sous-produits de la transformation du bois dans une période donnée et quelle en est la proportion qui peut être valorisée comme bois énergie. Le surplus de sous-produits sera livré à des tiers.

La règle 1875 de la CNA (silos à copeaux de bois) s'applique aux entreprises soumises à la CNA pour les silos dont les hauteurs de remplissage dépassent 3 m. En plus d'indications sur l'exploitation sans danger des silos à copeaux, cette directive contient de nombreuses prescriptions en matière de construction sur la disposition de portes latérales d'intervention, l'exécution des bouches de remplissage et l'équipement en systèmes auxiliaires d'accès pour l'inspection des silos vides.

Porte d'extraction pour silo à copeaux



Systèmes sans accumulateur à circuit mélangeur

*Exigences posées:*

- chute de pression aussi faible que possible dans le répartiteur (resp. collecteur);
- l'évacuation de la chaleur résiduelle lorsque l'installation est arrêtée doit être assurée; si la température de la chaudière devient excessive, les vannes des consommateurs doivent s'ouvrir;
- le débit de la pompe du circuit de chaudière (du côté primaire) doit être supérieur au total de tous les flux des consommateurs;
- les soupapes de mélange doivent fermer de façon étanche.

*Condition:*

- régulation de la puissance par l'alimentation en combustible.

*Application:*

- en principe pour tous les systèmes dépourvus d'accumulateur.

## 6.5 Raccordement hydraulique

### Principes connus

Les chauffages automatiques au bois se raccordent au réseau hydraulique selon les mêmes principes que pour les chauffages au mazout ou au gaz :

- séparation claire des zones d'influence des diverses pompes;
- découplage bien défini des circuits variables et des circuits constants;
- instauration d'une hiérarchie de commande dans la partie hydraulique du circuit régulateur;
- présence d'éléments de protection et de sécurité pour l'installation et ses composants.

*Nécessité du maintien de la température de retour*

Afin d'assurer une bonne combustion, la température de l'eau de la chaudière doit se situer entre 70°C et 80°C. La température minimum de retour à l'entrée de la chaudière ne doit pas être inférieure à 60°C afin de ne pas passer en dessous du point de condensation des gaz de fumées.

*Flux constant au travers de la chaudière*

Une autre conséquence des caractéristiques de combustion des chaudières à bois est l'exigence de maintenir un flux traversant constant. Tout chauffage automatique au bois a une limite inférieure de puissance fournie. Si l'on passe en dessous de ce seuil, la chaudière se met en mode de maintien du lit de braises. Dans cet état, elle continue à fournir une certaine quantité de chaleur qui doit être absorbée par le réseau.

### Emission de chaleur pendant le maintien du lit de braises

Si le chauffage continue à produire, au seuil inférieur de fourniture de puissance, plus de chaleur que le réseau n'en absorbe (comme c'est le plus souvent le cas à la fin de la saison de chauffage), il passe en mode de maintien du lit de braises. Cet état demande assez de combustible pour maintenir un lit de braises capable de faire redémarrer la combustion. Le chauffage fournit dans ce cas environ 5% de sa puissance nominale. Si cette puissance résiduelle ne peut pas être absorbée par le réseau, la température de la chaudière devient excessive et la combustion est arrêtée. Il faudra alors procéder à un nouvel allumage. C'est pour l'éviter que les

vannes d'amenée aux consommateurs ne doivent pas se fermer complètement en mode de maintien du lit de braises.

### Installations à plusieurs chaudières

La répartition de la puissance sur plusieurs chaudières est tout indiquée dans le cas de puissances importantes (à partir de 1 MW environ).

La limite inférieure de régulation de la puissance des chauffages automatiques au bois se situe entre 20% et 30% selon leur type. Il en résulte qu'une chaudière unique se trouve souvent en mode de maintien du lit de braises pendant l'entre-saison. Des problèmes peuvent alors survenir quand on a recours à des assortiments de bois vert: extinction du lit de braises malgré le mode de maintien et perturbation du fonctionnement du chauffage. La chaudière doit être rallumée après chaque fin de semaine, les accumulateurs d'eau chaude et les radiateurs sont froids.

La combinaison avec une chaudière à mazout est recommandée dans le cas d'installations de grande taille, pour couvrir les périodes de faible ou de très haute demande de chaleur.

### Accumulateur en vue de couvrir les phases de faible demande

Si la répartition sur plusieurs chaudières ne peut entrer en considération (solution trop coûteuse, installation trop petite), il est possible d'améliorer le comportement de l'installation en période de faible demande en raccordant un accumulateur. La fourniture de chaleur est ainsi assurée, même en mode de maintien du lit de braises, jusqu'à ce que l'accumulateur de chaleur atteigne sa bonne température. Si le lit de braises s'éteint alors que l'accumulateur est chaud, il n'y aura alors pas d'interruption immédiate du chauffage.

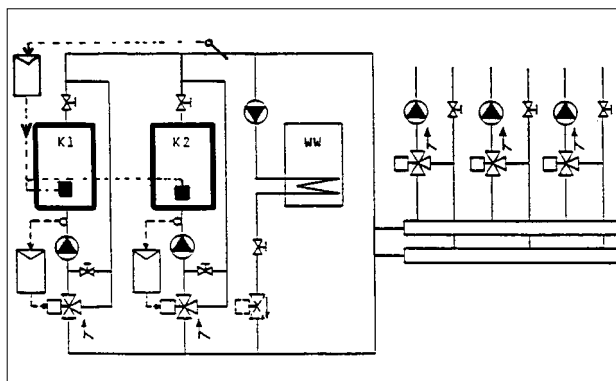
Tout accumulateur entraîne des pertes thermiques supplémentaires. Les pertes en attente de la production de chaleur augmentent en conséquence et le rendement annuel baisse. C'est pour cette raison qu'il ne faut recourir à un accumulateur que dans des cas bien fondés.

### Installations monovalentes à plusieurs chaudières

Dans les grandes installations (à partir de 1000 kW environ), il y a lieu de recourir à deux ou plusieurs chaudières afin de mieux répartir la charge. Lorsque la demande de puissance est importante, les deux chaudières travaillent en parallèle; une seule chaudière fonctionne lorsque la charge est faible.

La température de départ est le paramètre de commande qui donne le signal d'enclenchement ou de déclenchement de la deuxième chaudière. L'allumage peut se faire manuellement (par le préposé au chauffage) ou automatiquement à l'aide de soufflantes à air chaud. L'allumage automatique est plus coûteux et entraîne une consommation importante d'électricité.

Comme dans toute régulation, il faut tenir compte du fait que la température de départ baisse lorsque la demande de puissance augmente, respectivement que la température augmente lorsque la demande diminue. Ce qui détermine la plage de variation de la température de départ, c'est l'écart entre les points de commutation de la commande ainsi que la bande  $p$  de la régulation de la puissance du chauffage automatique.



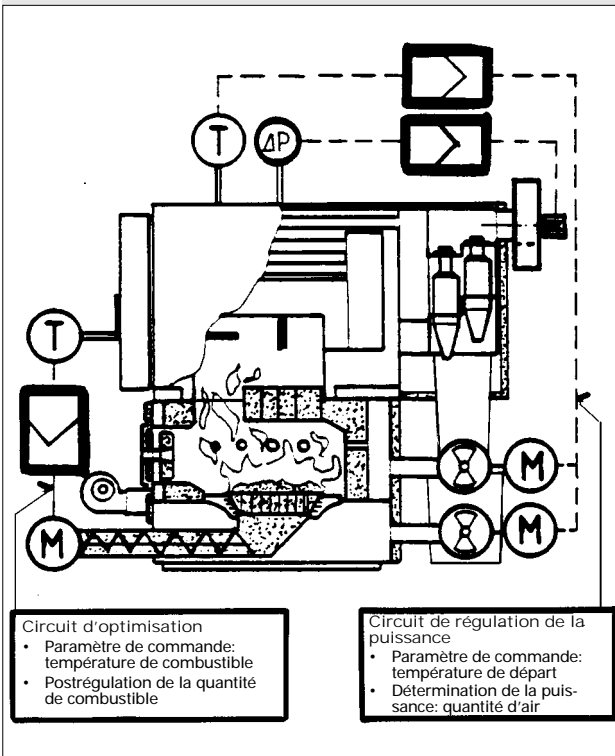
#### Avantages:

- grande sécurité d'exploitation;
- meilleure répartition de la charge;
- rendement annuel élevé;
- émissions réduites.

#### Inconvénients:

- plus coûteux qu'une installation à une seule chaudière;
- encombrement important.

Aperçu des fonctions de commande et de réglage  
Exemple de la régulation de la puissance  
d'un foyer à poussée inférieure



Messages relatifs à l'exploitation :

- mode d'allumage;
- exploitation normale à combustion automatique;
- mode de révision (évacuation des cendres).

Messages de dérangement :

- température des gaz de fumées trop basse;
- température de la chaudière trop élevée;
- protection des moteurs du dispositif d'alimentation;
- niveau d'huile de l'hydraulique;
- déclenchement de la protection contre les retours du feu.

## 6.6 Commande et régulation

Adaptation de la puissance du chauffage à la demande de chaleur

La puissance d'un chauffage automatique au bois peut s'adapter à la demande instantanée de chaleur en modifiant le dosage de l'alimentation en combustible. Dans le cas des foyers à poussée inférieure, cela se fait soit par une variation échelonnée ou en continu de la vitesse de rotation de la vis de dosage, soit par l'adaptation du rapport des intervalles entre les enclenchements. Dans le cas des foyers à grille mobile, s'y ajoute une adaptation des mouvements de la grille. La valeur de consigne est la température de l'eau de la chaudière qui oscille de 6°C dans la plage de régulation. Il en résulte qu'une demande de chaleur élevée abaisse la température de l'eau de la chaudière, alors qu'une demande faible va l'élever.

Combustion optimale sur toute la plage de puissance

Il y a lieu de vérifier, lors du choix de l'installation, que les fonctions de régulation et de commande du chauffage (aujourd'hui le plus souvent assurées par une commande programmable à mémoire) exécutent effectivement les tâches demandées. Dans la commande programmable à mémoire on doit pouvoir clairement distinguer les fonctions suivantes :

1. Fonctions d'exploitation  
Mode d'allumage, de fonctionnement normal et de révision
2. Fonctions de commande et de régulation  
Extraction du silo, dispositif de dosage du combustible, dispositifs de convoyage transversal (pour les vis sans fin: commutateur manuel avant/arrière, si possible)
3. Fonctions de sécurité  
Thermostat de sécurité de la chaudière, extinction des retours de flamme, surveillance de l'huile hydraulique, retransmission des signaux, entrée pour un interrupteur externe de secours.

## Technologies d'avenir en matière de régulation

Un chauffage automatique au bois doit être doté d'une régulation de la combustion afin d'assurer un fonctionnement à faible niveau d'émissions et à rendement élevé. On a généralement recours à une régulation asservie à la température de combustion ou à une sonde  $\lambda$ .

La température ou l'excédent d'air ne fournissent toutefois qu'une indication indirecte de la qualité de la combustion. De nouveaux procédés de régulation utilisent donc des sondes sensibles à la qualité de la combustion. C'est notamment le cas de la régulation  $CO/\lambda$  qui fait actuellement l'objet d'essais dans une installation pilote. Les expériences réalisées à ce jour indiquent une substantielle réduction des émissions de CO. De plus, le rendement de combustion de la chaudière est amélioré à charge partielle.

## Armoire de commande

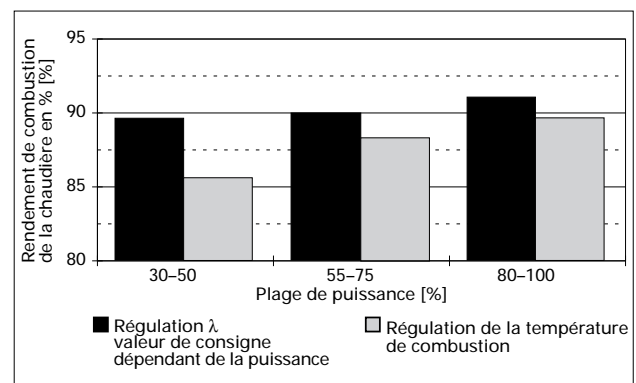
Le fournisseur d'un chauffage livre l'armoire de commande munie de tous les appareils de commande et de régulation nécessaires à l'exploitation et à la surveillance du chauffage.

Le concepteur doit s'assurer que d'autres appareils de régulation et de commande y trouvent leur place et puissent s'intégrer au schéma d'ensemble :

- régulation de la mise en marche de la chaudière et régulation d'autres chaudières dans le cas d'une installation à plusieurs chaudières ;
- séquenceur d'enclenchement des chaudières dans les installations à plusieurs chaudières ;
- mesure de la puissance et compteur de chaleur ;
- signalisations externes (exploitation et dérangements) ;
- retransmission des signaux d'exploitation et de dérangement (équipements de recherche de personnes, tableau principal, système de commande).

## Rendement de combustion de la chaudière en fonction des plages de puissance

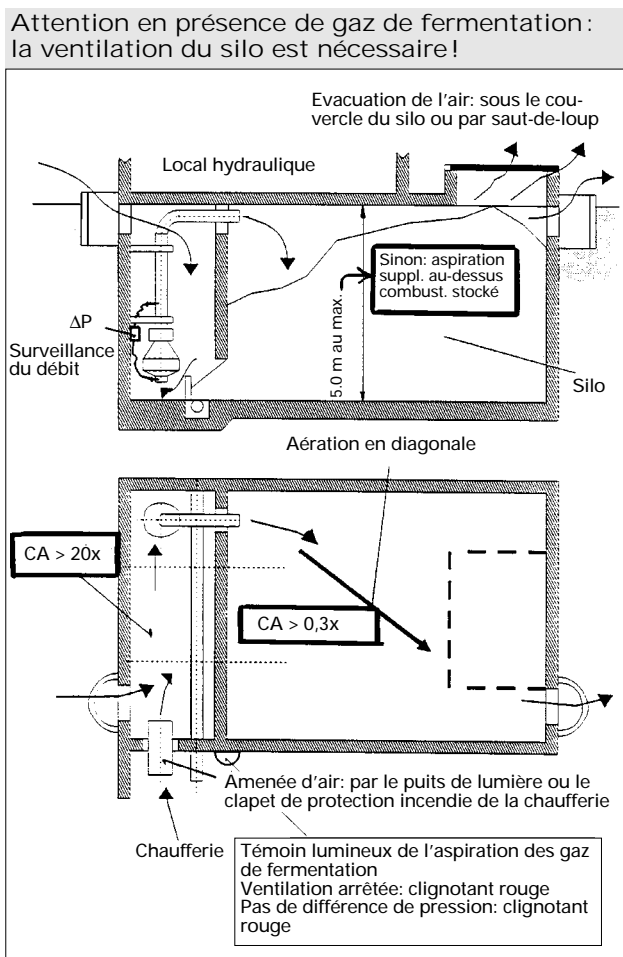
Valeur moyenne calculée sur plusieurs semaines d'exploitation pratique dans le cas d'un chauffage au bois de 1 MW



Comparaison entre la régulation par la température de combustion et la régulation  $\lambda$  avec valeur de consigne dépendant de la puissance

Les appareils de régulation des consommateurs ne trouvent généralement pas place dans l'armoire de commande de la centrale thermique et doivent être logés séparément ailleurs.

L'établissement de schémas d'ensemble dépasse généralement les compétences du fournisseur du chauffage. Il n'existe souvent qu'une documentation standard de sa commande programmable à mémoire qui est adaptée au cas d'espèce. Il est donc recommandé au concepteur de faire établir le schéma d'ensemble par les spécialistes de la régulation qui intégreront alors la commande programmable à mémoire dans le schéma d'ensemble de manière appropriée.



Ne pénétrer dans le local hydraulique que lorsque la ventilation est enclenchée !

Le témoin lumineux doit être rouge quand la ventilation est arrêtée, vert quand elle est en marche.

#### Dimensionnement du dispositif de ventilation

Débit dans le silo:  $\dot{V} = V \times CA$  ( $m^3/h$ )

V: contenu du silo en  $m^3$

CA: renouvellement d'air dans le silo, 0,3 x/h au minimum  
renouvellement d'air dans le local hydraulique, 20x/h au minimum

## 6.7 Dispositifs de sécurité pour l'installation, la chaufferie et le silo

Aspects particuliers des chauffages au bois

En plus des dispositifs de sécurité appartenant à toute installation de chauffage, et qui ont pour mission:

- de prévenir toute hausse inadmissible de la pression dans le réseau hydraulique;
- d'empêcher la propagation d'un incendie de la chaufferie dans les locaux avoisinants (en particulier au lieu de stockage du combustible);
- d'empêcher les concentrations dangereuses de gaz dans la chaufferie (gaz de fumées et combustible).

Les chauffages automatiques au bois requièrent des mesures de sécurité complémentaires pour:

- empêcher les concentrations dangereuses de gaz de fermentation dans le silo;
- éviter toute propagation d'un incendie, en particulier de la chaufferie vers le local de stockage du combustible;
- contenir le développement du feu dans les silos contenant des matériaux secs et facilement inflammables (copeaux).

Comment éviter toute concentration dangereuse de gaz de fermentation

Des gaz lourds de fermentation résultant du stockage de plaquettes de bois vert peuvent se répandre aussi bien dans le silo que dans la chaufferie. Ces deux locaux doivent donc être protégés par des dispositifs appropriés d'aération. Le système d'aération sera par exemple:

#### Aération combinée de la chaufferie et du silo

L'air extérieur pénètre dans la chaufferie par une jalousie à l'abri des intempéries. Une partie de l'air, aspirée par les soufflantes du foyer, sert à la combustion. Le reste s'écoule par le clapet de protection incendie dans le local hydraulique; il est ensuite amené dans le silo à plaquettes au moyen d'un dispositif mécanique.

Avantage: l'air est préchauffé dans la chaufferie et contribue au séchage des plaquettes.



Lors du choix de l'emplacement de la bouche d'évacuation de l'air, il faut tenir compte du fait que les gaz de fermentation ont une odeur désagréable. Il est recommandé d'évacuer l'air du silo sur le toit, au moyen d'une installation d'aspiration appropriée.

Dispositifs de protection contre l'incendie

#### *Sas à roue cellulaire*

Le sas à roue cellulaire se compose d'une roue à ailettes multiples montée dans un carter métallique. Il est normalement placé dans le puits de chute de l'alimentation en combustible. Il est entraîné par un moteur électrique accouplé aux moteurs de transport du combustible. A l'arrêt, les ailettes bloquent le passage du combustible et empêchent une éventuelle remontée du feu.

Dans les silos à copeaux sous pression, le sas à roue cellulaire sépare le silo sous pression du système de transport qui n'est pas sous pression.

#### *Protection contre les retours de feu*

Un déclencheur thermique provoque, en cas de remontée du feu, l'aspersion d'eau dans le canal à combustible pour éviter toute propagation du feu en arrière, en direction du réservoir à combustible ou du silo. La soupape de l'eau d'extinction et le déclencheur thermique sont livrés par le fournisseur du chauffage. Le raccordement sanitaire doit être prévu par le concepteur selon les indications données par le fournisseur du chauffage.

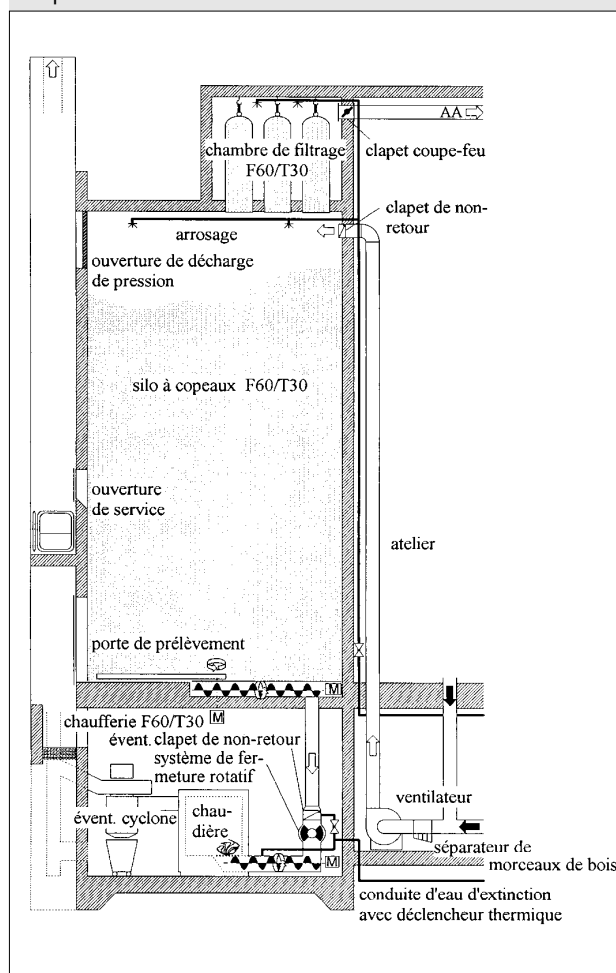
#### *Clapets de protection incendie*

Les clapets de protection incendie sont montés dans le puits de chute de l'amenée du combustible. Ils se composent d'une pièce tubulaire dotée de clapets de fermeture actionnés mécaniquement. En cas de dépassement d'un seuil réglable de température, un thermostat déclenche le processus de fermeture et bloque l'arrivée du combustible.

Vases d'expansion

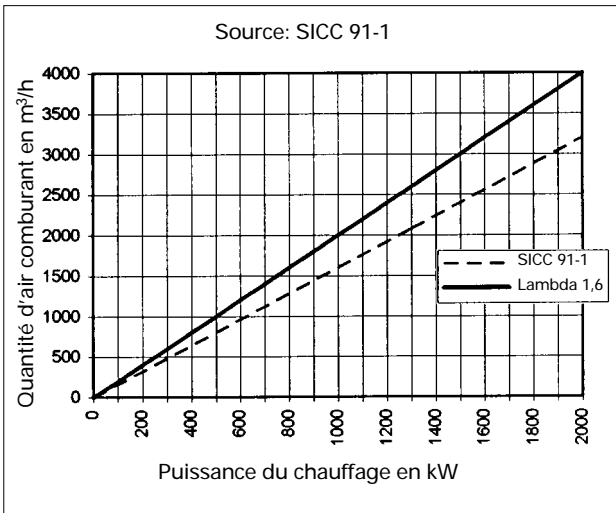
Les chauffages automatiques au bois sont à régulation rapide. C'est pourquoi ils n'ont pas besoin d'un vase d'expansion ouvert; ils peuvent être conçus comme des systèmes fermés. La capacité de régulation minimum du système de chauffage doit être garantie par le fournisseur par le biais d'un test EMPA (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et institut de recherches).

Sécurité contre le retour de feu, clapet de protection incendie et sas à roue cellulaire



### Quantité nécessaire d'air comburant

Quantité d'air comburant pour les chauffages au bois, en fonction de la puissance du chauffage



Remarque: la courbe d'après SICCC 91-1 donne des quantités d'air comburant trop faibles. Avec les coefficients d'excédent d'air actuellement appliqués de 1,6 à 2,0, on obtient des quantités d'air comburant plus élevées (courbe supérieure).

## 6.8 Conseils pour la conception de la chaufferie et du silo

### Amenée de l'air comburant

L'air comburant est prélevé directement à l'extérieur. Son amenée doit être conçue selon la directive 91-1 de la SICCC (Aération et ventilation des chaufferies). Il faut néanmoins tenir compte du fait que les dispositifs de chauffage et de transport provoquent plus de bruit que les chauffages à mazout ou à gaz. La bouche d'aspiration de l'air destiné à la chaufferie sera donc munie d'une isolation phonique (grille de protection contre les intempéries à isolation phonique ou, mieux encore, application du principe du snorkel à amortisseur phonique dans le canal).

## Cheminée

### *Dimensionnement*

Le dimensionnement de la cheminée se fait conformément à la norme SIA 384/4, diagramme 4. Le fournisseur de la cheminée applique toutefois souvent la norme DIN 4705 à la détermination de sa section, ce qui entraîne une diminution du diamètre, et donc des coûts. Le concepteur doit toutefois assurer le dimensionnement correct de la cheminée par le fournisseur en tenant compte des paramètres précis suivants :

- température des gaz de fumée et pression à l'entrée de la cheminée ;
- hauteur de la cheminée et température requise à son extrémité ;
- humidité du combustible.

Le dimensionnement correct de la cheminée doit être ensuite confirmé après consultation du fournisseur du chauffage.

### *Construction de la cheminée*

Le point de condensation du bois vert se situe vers 60°C, c'est-à-dire que le phénomène de condensation intervient à des températures plus élevées que lors de l'emploi du mazout. Ce sont généralement les cheminées bien isolées en acier inoxydable qui satisfont au mieux à ces conditions.

En cas de rénovation, il faut faire preuve de la plus grande prudence si l'on fait recours aux cheminées existantes. Souvent, la seule solution possible consiste à chemiser le conduit existant (tubage de la cheminée) au moyen d'un conduit inoxydable isolé. Le concepteur doit veiller à ce que l'isolation soit posée dans les règles de l'art ; il est recommandé de faire appel à un fournisseur de cheminée ayant l'expérience des chauffages au bois.

### Dimensionnement de la cheminée pour les chaudières munies de ventilateurs des gaz de fumées

Le dimensionnement doit être discuté avec le fabricant. Les facteurs suivants le déterminent :

- résistance de frottement de la conduite et de la cheminée ;
- résistances partielles provoquées par les courbures et les changements de section (voir la norme SIA 384/4) ;
- vitesse minimum des gaz de fumées à l'extrémité de la cheminée : 6 m/s ;
- flux volumique des gaz de fumées (dépendant du pouvoir calorifique du combustible, de l'excédent d'air et de la température des gaz de fumées) ;
- courbe caractéristique des ventilateurs utilisés.

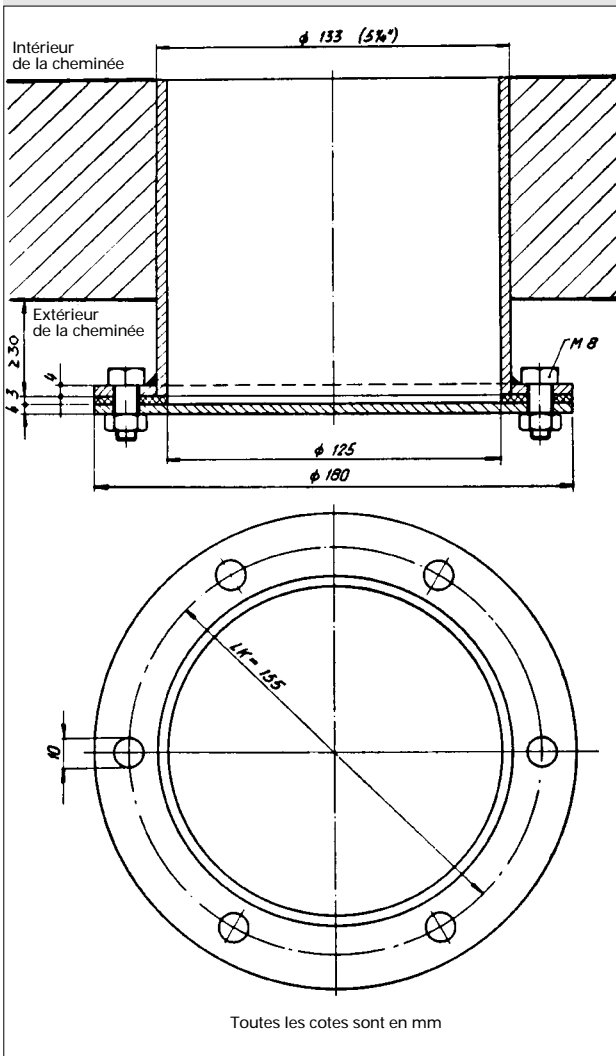
Hauteur de la cheminée au-dessus du toit :

Les principes sont contenus dans la directive sur la hauteur minimum des cheminées de l'OFEFP du 15 décembre 1989 modifiée le 25 novembre 1993 (chiffre 32). Le tableau suivant s'applique :

Puissance du chauffage	Hauteur au-dessus du niveau des immissions
de 71 à 150 kW	1 m
de 151 à 250 kW	2 m
de 251 à 500 kW	3 m
de 501 à 1000 kW	4 m
de 1001 à 2000 kW	5 m
plus de 2000 kW	6 m

Il faut tenir compte de la directive AEAI sur les installations thermiques (1993, chap. 3.1.3) pour les toits plats praticables.

### Manchon normalisé EMPA pour la mesure des émissions



### Mesure des émissions selon l'OPair

La mesure des émissions pour les installations soumises à réception (chauffages au bois à partir de 70 kW) se fait en introduisant dans la cheminée un manchon normalisé par l'EMPA. Une zone de calme de cinq diamètres de cheminée doit être ménagée avant le manchon, de trois diamètres après ce dernier.

### Protection constructive contre l'incendie dans la chaufferie

#### *Chaufferie dans le bâtiment*

La chaufferie et le stockage du combustible doivent être placés dans des locaux F 60/T 30. Les portes donnant sur les autres locaux doivent s'ouvrir dans le sens d'une évacuation.

#### *Chaufferie au 2<sup>e</sup> sous-sol*

Les installations de chauffage de plus de 600 kW doivent disposer d'un accès direct à l'air libre.

#### *Chaufferie en dehors du bâtiment*

Une exécution en matériaux non combustibles suffit pour les centrales thermiques dans des locaux séparés, d'un seul étage et seuls ou séparés des autres constructions F 60.

## Prescriptions sur les silos

Les prescriptions relatives aux silos sont exposées en détail dans l'annexe ; en voici les points les plus importants :

- aucune conduite de cheminée, d'eau chaude, d'eau surchauffée ou de vapeur ne doit passer par le silo à combustible, ni par les locaux de filtrage ;
- les filtres à poussières doivent être placés dans un local F 60 séparé ;
- les bouches de retour ou d'amenée d'air dans le silo ou le local de filtrage doivent être dotés de clapets de protection incendie à fermeture automatique en cas d'incendie ;
- les silos à copeaux et les enceintes de filtrage doivent être munis de dispositifs stationnaires d'extinction (sprinklers ou pulvérisateurs) ; font exception les silos à copeaux en acier ; les mesures adéquates doivent être discutées avec les services du feu locaux ;
- des clapets de protection incendie doivent être montés à l'extrémité des conduites de transport pneumatique.

## Prescriptions pour les silos à combustible

### *Protection contre l'incendie*

Les silos à combustible doivent être réalisés de telle sorte qu'ils soient protégés contre l'incendie. En plus des prescriptions de l'AEAI (chiffres 2.3.2, 4.3.1, 4.3.2 et 4.3.3), il faut aussi tenir compte des dispositions cantonales en matière de protection incendie.

### *Prévention des accidents*

En plus des prescriptions de l'AEAI, la directive CNA 66050 sur les silos à plaquettes vertes s'applique également ainsi que la formule 1875 sur les silos à copeaux de bois. Les dispositions contenues dans ces documents visent la prévention des accidents. Elles doivent être respectées, même pour des entreprises qui ne sont pas soumises à la CNA !

La CNA a également émis des directives en matière de prévention des accidents causés par les dispositifs de transport du combustible. La formule 1545 décrit ainsi l'utilisation et la protection pour les dispositifs de convoyage inclinés. En voici quelques aspects particuliers dont il y a lieu de tenir compte :

- couverture et fermeture des vis sans fin de transport ;
- exécution d'accès et de passages au-dessus des dispositifs de transport.

## 7. Exécution du projet

---

7.1	Points critiques de la réalisation	133
	Pose des éléments incorporés dans le silo	133
	Raccordement de l'équipement des gaz de fumées à la cheminée	133
<hr/>		
7.2	Préparation à la mise en service	134
	Premier allumage de la chaudière	134
	Premier remplissage du silo	134
	Transmission de chaleur assurée	134
<hr/>		
7.3	Préparation de la réception de l'installation	135
	Réglage du chauffage	135
	Mesure des émissions par les autorités compétentes	135
<hr/>		
7.4	Instruction et documentation pour l'exploitant de l'installation	136
	Essai d'exploitation	136
	Réception	137

---

## 7. Exécution du projet

### 7.1 Points critiques de la réalisation

#### Pose des éléments incorporés dans le silo

Il faut, dès le début de la phase de construction, poser les profils d'ancrage et les rails de guidage destinés au dispositif d'extraction du silo. C'est généralement le staticien qui établit les plans de coffrage et d'armature nécessaires à la construction du silo et qui y intègre les éléments statiques du système d'extraction. Le concepteur se charge de la coordination des travaux de l'entrepreneur et du fournisseur du chauffage, après avoir vérifié les plans dressés par le staticien.

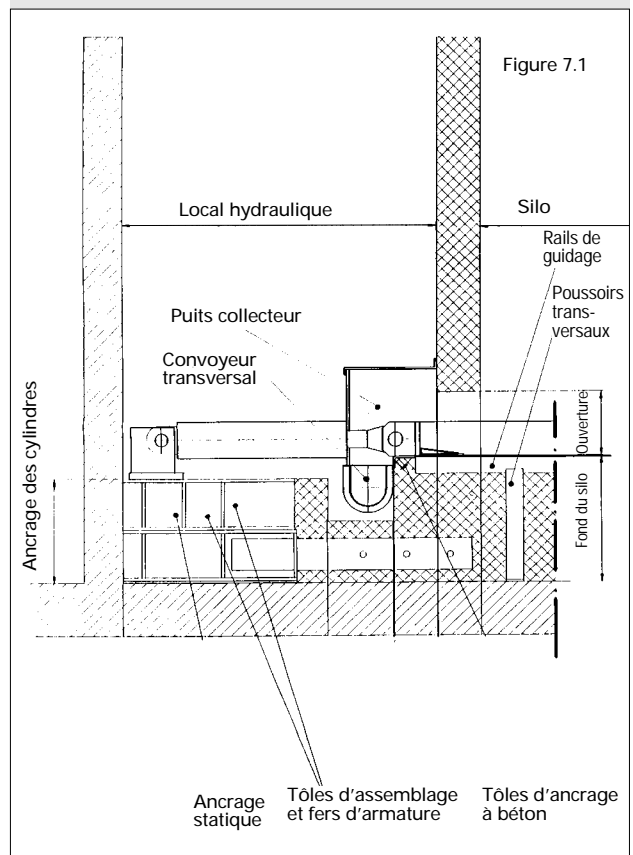
Les éléments incorporés de l'extraction du silo sont posés par le fournisseur du chauffage. C'est lui qui détermine le moment du montage avec l'entrepreneur. Dès cette phase critique de la réalisation, le concepteur doit assurer une collaboration efficace sur place entre l'entrepreneur et le fournisseur du chauffage.

#### Raccordement de l'équipement des gaz de fumées à la cheminée

Une autre articulation critique est constituée par le raccordement du chauffage à la cheminée. Celle-ci doit être posée avant le montage de la chaudière et du chauffage. Le fournisseur du chauffage raccorde le séparateur de poussières à la cheminée au moyen de conduits de fumées correctement isolés, après avoir procédé au montage de la chaudière. L'emplacement et la responsabilité de la livraison du manchon de mesure EMPA doivent avoir été déterminés dans le projet détaillé. Le concepteur vérifie sur le chantier que l'installation et la livraison sont correctes :

- il contrôle l'étanchéité des raccords de conduits ; les raccords sont souvent insuffisamment étanches ; il en résulte des traces de suie noires après seulement quelques heures d'exploitation ;
- il contrôle si le niveau de la bouche de la cheminée est conforme aux spécifications ;
- il vérifie que la livraison est complète : bac de récupération de la suie et vanne d'obturation inoxydable au pied de la cheminée, accessoires de nettoyage et dispositif d'amenée d'air auxiliaire.

Pose des éléments statiques du dispositif d'extraction du silo



#### Définition des réglages préalables importants

1. Commutation de la chaudière: marche/arrêt
2. Durée de fonctionnement du maintien de la combustion
3. Durée de fonctionnement de la vis de dosage
4. Durée de fonctionnement du dispositif d'extraction
5. Réglage de la temporisation des sondes
6. Réglage du thermostat des gaz de fumées
7. Valeur de consigne pour la dépression dans la chaudière
8. Valeur de consigne pour la température de combustion
9. Valeur de consigne pour la température de départ

#### Liste de contrôle avant la mise en service

- Le système de chauffage et le vase d'expansion sont-ils remplis (système de distribution de la chaleur prêt à fonctionner)?
- Le raccordement des conduites est-il correct?
- La pompe de la chaudière est-elle en bon état de fonctionnement?
- Le dispositif de maintien de la température de retour est-il prêt à fonctionner?
- Les sondes sont-elles placées aux bons endroits?
- Le thermostat de sécurité est-il bien réglé?
- La soupape de sécurité est-elle montée?
- Les raccordements sanitaires, protection contre les retours de feu, système de sécurité de fonctionnement sont-ils installés et prêts au service?
- Les branchements électriques, y compris la chaîne de sécurité, ont-ils été contrôlés?
- La cheminée et le raccord de cheminée sont-ils en ordre?
- Le tirage, resp. la dépression dans la chaudière, est-il suffisant?
- Le bon fonctionnement du système de convoyage a-t-il été vérifié?

## 7.2 Préparation à la mise en service

### Premier allumage de la chaudière

Il faut veiller, notamment lorsque le combustible provient de la forêt, que l'on dispose de suffisamment de plaquettes sèches pour le premier allumage. Etant donné que l'isolation réfractaire de la chaudière n'est pas encore complètement sèche et que l'ensemble de l'installation d'évacuation des gaz de fumées et de la cheminée est encore froid, l'utilisation de plaquettes vertes risquerait de poser des problèmes lors du premier allumage: le thermostat des gaz de fumées arrête la chaudière avec le message «température des gaz de fumées trop basse».

### Premier remplissage du silo

La première fois, le silo doit être rempli au tiers de sa capacité au maximum. De cette façon, si des problèmes surviennent avec le dispositif d'extraction, il ne sera pas nécessaire de vider à la pelle tout le contenu du silo.

Pour éviter toute formation de ponts de plaquettes, il faut laisser suffisamment sécher le béton du silo avant le premier remplissage de ce dernier. Un délai de séchage de deux semaines constitue ici le minimum indispensable. Le fournisseur du chauffage doit vérifier, avant le remplissage, le bon fonctionnement et l'exécution correcte du système d'extraction, ainsi que la qualité de la surface du fond du silo. Il donne ensuite au concepteur le feu vert pour le premier remplissage. Le silo doit être nettoyé au préalable.

### Transmission de chaleur assurée

Pour les chauffages au bois, il faut garantir pendant la mise en service une transmission suffisante de la chaleur produite aux groupes consommateurs. Le spécialiste de la mise en service des dispositifs périphériques de réglage et l'électricien doivent être présents lors de la mise en service.

La durée prévue pour cette opération doit être suffisante. Il faut prévoir, selon la taille de l'installation, d'une demi-journée à une journée entière. A l'issue de la mise en service, le concepteur doit s'assurer que l'exploitant de l'installation a été complètement instruit pour la phase d'essai qui vient, par le fournisseur du chauffage. Il y a lieu de fournir dans ce but une version provisoire des instructions d'exploitation.



### 7.3 Préparation de la réception de l'installation

#### Réglage du chauffage

Le fournisseur du chauffage doit procéder à l'optimisation des réglages du chauffage à l'aide d'instruments appropriés de mesure des émissions. La qualité de l'assortiment de bois énergie exerce ici une influence prépondérante sur le processus de combustion et sur les émissions qui en résultent. La dépendance de la valeur CO de l'excédent d'air doit donc être mesurée par le fournisseur pour chaque installation; ce dernier doit ensuite procéder au réglage approprié. Cela se fait, sur les dispositifs de régulation modernes, en réglant les valeurs de consigne pour l'air primaire et pour l'air secondaire sur la commande programmable à mémoire.

Certaines mesures d'optimisation peuvent aussi être prises par l'exploitant de l'installation, notamment l'optimisation du rapport des périodes de fonctionnement et de pause du dispositif de dosage pour un meilleur comportement du maintien du lit de braises. Ceci dépend du pouvoir calorifique et de l'humidité du combustible.

Dans tous les cas, ces mesures d'optimisation doivent être discutées avec le fournisseur du chauffage et le procès-verbal doit en être dressé dans les règles.

#### Mesure des émissions par les autorités compétentes

Les chauffages au bois à partir de 70 kW nécessitent une autorisation officielle des autorités avant la réception de l'installation. Cette autorisation dépend du succès des mesures de réception.

Si, à l'issue de la phase d'essai, le chauffage est réglé de façon optimale et que l'on dispose des mesures des gaz de fumées faites par le fournisseur du chauffage, l'installation peut être annoncée pour les mesures OPair par les autorités. Ce sont elles qui fixent le moment des mesures de réception qu'elles exécuteront elles-mêmes ou qu'elles confieront à un institut de mesure neutre.

Les mesures nécessaires des émissions se font selon les prescriptions de l'OPair; elles dépendent de la puissance du chauffage et de l'assortiment de bois. Des mesures de contrôle doivent normalement être faites tous les deux ans, après les mesures de réception.

#### Evaluation d'ensemble par l'exploitant

La qualité de la combustion ne peut pas être suffisamment évaluée si l'on ne dispose pas d'instruments de mesure appropriés. Cependant, l'exploitant d'un chauffage automatique au bois doit être en mesure de détecter les défauts grossiers du processus de combustion:

- constatation de températures de combustion trop élevées par lecture comparative de la valeur effective et de la valeur de consigne à l'écran;
- formation de fumée à la bouche de la cheminée;
- constatation de températures de gaz de fumées trop basses (le plus souvent: annonce de dérangement « Température trop basse des gaz de fumées »);
- résidus de goudrons dans le bac de récupération des suies de la cheminée, ou aux joints du conduit de cheminée;
- comparaison de l'image de la flamme avec des illustrations de flammes sous réglage optimal.

#### Appréciation visuelle de la flamme:

- de longues flammes en nuées indiquent un excédent d'air insuffisant;
- des flammes courtes et vives révèlent un excédent d'air trop important;
- de nombreuses pointes de flammes, plutôt qu'une flamme fermée, sont le signe d'un excédent d'air trop important;
- une flamme jaune clair est le signe de températures de combustion trop élevées.

L'appréciation visuelle ne permet de détecter que les défauts grossiers. On ne peut pas apprécier visuellement si la qualité de la combustion est bonne.

#### Mesures effectuées par l'autorité

Les mesures suivantes sont effectuées (dans la plage de puissances de chauffage de 70 kW à 5 MW):

*Jusqu'à une puissance de chauffage de 1 MW:*

1. Concentration de CO dans les gaz de fumées.
2. Teneur en poussières des gaz de fumées.

Lors des mesures de contrôle, on peut renoncer à la mesure des poussières si la limite de CO est respectée.

*En plus, pour les puissances de chauffage de 1 MW à 5 MW:*

1. Concentration de NO<sub>x</sub> dans les gaz de fumées.
2. Teneur en hydrocarbures des gaz de fumées.

Les coûts des mesures se situent entre Fr. 800.- et Fr. 1500.- selon la taille du chauffage. Il appartient au propriétaire de l'installation de les payer.

#### Points d'instruction essentiels pendant la phase d'essais

##### Modes de fonctionnement de la chaudière :

- allumage de la chaudière en mode d'allumage ;
- passage au mode d'exploitation normale, causes possibles de dérangements ;
- comment éviter des températures trop basses des gaz de fumées ;
- exploitation pendant les opérations de nettoyage ;
- quand la chaudière doit-elle être arrêtée et comment déclencher les consommateurs de chaleur ?

##### Utilisation des dispositifs de convoyage :

- prévention des accidents, prescriptions de sécurité ;
- fonctionnement et causes possibles de dérangements.

##### Stock de combustible :

- chargement, intervalles de chargement et procédure de remplissage ;
- prévention des accidents dus aux gaz de fermentation ;
- prévention des accidents causés par les dispositifs de transport et de convoyage.

##### Comportement en cas de dérangement

- concept de signalisation des dérangements et d'alarme ;
- quels sont les dérangements auxquels on peut remédier soi-même ?
- qui doit être averti, et quand ?

## 7.4 Instruction et documentation pour l'exploitant de l'installation

### Essai d'exploitation

La phase d'essai d'exploitation suit immédiatement la mise en service. Pendant ce temps, les réglages du chauffage et de l'installation dans son ensemble seront optimisés et l'exploitant pourra se familiariser avec son système de chauffage au bois. Il est très important que l'exploitant bénéficie pendant ce temps du soutien du fournisseur du chauffage et du concepteur. Ce soutien comprend une instruction préalable de l'exploitant immédiatement après la mise en service réussie. Cette instruction doit se faire à l'aide du manuel d'exploitation. Le plus souvent, celui-ci n'existe pas encore dans sa version définitive (absence du schéma de révision, concept de maintenance encore au stade du projet, etc.). Il suffit toutefois amplement de disposer d'un projet de manuel pour l'instruction ; la manipulation correcte des fonctions de commande, les conditions de sécurité à respecter et le comportement en cas de dérangement constituent les éléments essentiels de cette instruction.

La condition pour le démarrage sans encombres de l'exploitation du système de chauffage est la désignation d'un préposé ayant bénéficié d'une instruction appropriée.

Il arrive souvent que l'exploitant de l'installation ne bénéficie pas de suffisamment de soutien au cours de cette phase critique et qu'il se comporte de manière erronée avec le nouveau système, ce qui donne naissance à des préjugés infondés sur le chauffage au bois.

## Réception

C'est au plus tard au moment de la réception que la documentation définitive de l'installation sera remise. Les modifications apportées au réglage pendant la phase d'essai doivent être relevées et la documentation sera mise à jour en conséquence. Les instructions d'exploitation et de révision ne sont souvent délivrées qu'après la réception dans le cas des installations conventionnelles. On oublie alors que c'est à ce moment que la responsabilité de la réception finale passe au maître d'ouvrage. Cela provoque parfois des problèmes d'ordre juridique si le maître d'ouvrage peut prouver qu'il a été insuffisamment préparé à ses responsabilités, et tel est le cas si des instructions d'exploitation claires n'ont pas été données !

La chaîne de sécurité est plus complexe dans le cas des installations de chauffage automatique au bois que dans celui des installations conventionnelles. La prévention des accidents, dans l'enceinte du silo ou autour des dispositifs d'extraction par exemple, doit être traitée avec un soin tout particulier dans les instructions d'exploitation.

### Informations complémentaires à inclure dans le mode d'emploi

#### Comportement en cas de dérangement :

- concept de signalisation des dérangements et d'alarme ;
- comportement en cas de dérangement et liste des personnes à avertir ;
- tableau en guise de guide pour la signalisation de dérangement.

#### Dispositifs de sécurité :

- équipements techniques de sécurité ;
- prescriptions en matière de sécurité ;
- prévention des accidents dus aux gaz de fermentation ;
- prévention des accidents causés par les dispositifs de convoyage.

#### Exploitation de l'installation de chauffage :

- contrôles avant la mise en service ;
- positions des commutateurs et leurs effets ;
- modes de chauffage, modes de fonctionnement de révision.

#### Plan d'entretien :

- plan de nettoyage et d'évacuation des cendres ;
- délimitation des travaux de révision effectués par des tiers.

## 8. Exploitation

---

8.1	Utilisation et exploitation	141
	Contrôles	141
	Mise en service	141
	Exploitation d'un chauffage automatique au bois	141
	Maintenance de l'installation	141
	Comportement en cas de dérangements	142

---

8.2	Réception	143
	Objectif	143
	Responsabilités et intervenants	143
	Déroulement	143
	Documents et moyens auxiliaires nécessaires	143
	Interprétation et décisions	143
	Procès-verbal de contrôle	144
	Début de l'exploitation par le maître de l'ouvrage	144
	Conséquences	144

---

8.3	Contrat de service	145
-----	--------------------	-----

---

## 8. Exploitation

### 8.1 Utilisation et exploitation

#### Contrôles

Les fonctions suivantes doivent être vérifiées avant la mise en service de la chaudière :

1. Aération du silo
2. Qualité et quantité en stock de l'assortiment de bois énergie
3. Dispositifs de protection contre l'incendie
4. Fonctions de sécurité (arrêt d'urgence)
5. Installation de chauffage et vase d'expansion remplis
6. Organes de sécurité
7. Pompe de circulation de la chaudière et sens de rotation
8. Ouverture de toutes les vannes de fermeture de la chaudière et de l'installation
9. Fermeture de tous les manchons non utilisés de la chaudière munis d'obturateurs ou de flasques
10. Etanchéité, remplissage et purge du réseau de chauffage à distance

#### Mise en service

Pour la mise en marche du chauffage automatique au bois, les prescriptions figurant dans le manuel du fournisseur doivent être respectées.

#### Exploitation d'un chauffage automatique au bois

Les conditions préalables essentielles pour le fonctionnement irréprochable d'un chauffage automatique au bois sont les suivantes :

1. N'employer que des assortiments de bois qui conviennent au chauffage concerné et pour lequel ce dernier aura été réglé.
2. La qualité du combustible doit être constante et celui-ci doit contenir aussi peu de corps étrangers que possible.
3. La maintenance de l'installation doit être régulière et effectuée selon les indications du fournisseur (éventuellement : contrat de service).

#### Maintenance de l'installation

Les travaux de maintenance les plus importants pour un chauffage automatique au bois sont les suivants :

- évacuation des cendres ;
- nettoyage de la surface de l'échangeur de chaleur et du foyer ;
- service périodique par le fournisseur de la chaudière.

#### *Evacuation des cendres*

Selon le bois utilisé, de 0,5 % à 1 % du poids du combustible doit être éliminé sous forme de cendres. Cette proportion est plus élevée dans le cas des écorces (jusqu'à 2 % ou 3 %). A titre indicatif, ce sont de 50 à 100 kg de cendres qu'il faut évacuer par saison de chauffage par 100 m<sup>2</sup> de surface de plancher (surface énergétique de référence).

Dans le cas de grandes installations on a recours à un dispositif d'évacuation automatique des cendres. C'est le fournisseur de la chaudière qui propose les équipements auxiliaires nécessaires.

#### *Nettoyage de la surface de l'échangeur de chaleur et du foyer*

Si la surface de l'échangeur de chaleur est encrassée, le transfert de la chaleur à l'eau de chauffage est entravé. Il en résulte des températures plus élevées des gaz de fumées, et donc des pertes accrues dans ceux-ci.

Le nettoyage de la chaudière est décrit dans la documentation d'exploitation remise par le fournisseur de la chaudière. Elle indique à quelle fréquence doit intervenir le nettoyage. L'intervalle de nettoyage dépend du combustible et du mode de fonctionnement de l'installation. Il est généralement de deux à trois semaines. Un bon indicateur de l'état de l'installation est la température des gaz de fumées qui doit donc être régulièrement surveillée.

Il faut compter en moyenne de 1 à 2 heures de travail par semaine pour le nettoyage d'un chauffage à évacuation automatique des cendres et d'une puissance de 500 à 1000 kW. Le contrôle quotidien régulier de l'installation est indispensable car il est impossible d'exclure des dérangements causés par les variations de la qualité du combustible.

### Travaux d'entretien

Un service doit être fait régulièrement pour toutes les installations.

Dans le cas des petits chauffages automatiques, la plupart des travaux d'entretien peuvent être effectués par le préposé qui s'occupe de l'installation, à condition que des indications suffisamment précises figurent dans le mode d'emploi remis par le fournisseur. La régulation du chauffage (point d'exploitation optimale) et le contrôle du bon fonctionnement seront effectués par le fournisseur, au moins tous les deux ou trois ans.

Pour les grands chauffages automatiques, l'installation doit faire l'objet d'une vérification annuelle. Un contrat de service assurera la continuité de ce travail. Pendant l'été, il y a lieu de contrôler et d'entretenir le système de convoyage. Pendant la période de chauffage, l'installation doit être contrôlée et réglée en cas de besoin. C'est ainsi que l'on réduira les dérangements au minimum possible.

### Comportement en cas de dérangements

Le comportement en cas de dérangement est décrit dans le mode d'emploi remis par le fournisseur. Compréhension des dérangements et connaissances sur la manière d'y remédier permettent d'exclure d'avance certaines difficultés.

#### Exemples tirés de la pratique:

##### *Température excessive de la chaudière pendant la nuit*

On n'a pas tenu compte de la chaleur résiduelle du lit de braises lors de la réduction ou de l'arrêt de la chaudière.

Remèdes:

- moins de combustible pour le maintien du lit de braises;
- régler la consommation de chaleur, charger l'accumulateur de chaleur, le cas échéant.

##### *Le ventilateur des gaz de fumées tourne trop vite*

La vitesse de rotation du ventilateur des gaz de fumées est au maximum et ne peut pas être réduite.

Remèdes:

- le conduit des gaz de fumées est défectueux (pénétration d'air) et il faut revoir son étanchéité;

- la chaudière est encrassée (forte perte de pression, vitesse élevée des gaz de fumées) et doit être nettoyée.

##### *La puissance fournie par la chaudière est insuffisante*

Remède:

- le réglage hydraulique du système est mauvais;
- la pompe de circulation de la chaudière n'est pas correctement dimensionnée.

##### *Emissions élevées*

La cause en est une mauvaise combustion causée par un entretien insuffisant ou par du combustible inapproprié.

Remèdes:

- nettoyage de la chaudière;
- contrôle de l'assortiment de combustible;
- nouveau réglage de la régulation de la combustion.

##### *Formation de scories et déformation de la maçonnerie réfractaire*

Des scories provenant de cendres de bois peuvent se former si ces dernières sont chauffées à plus de 900°C. La déformation de la maçonnerie réfractaire est la conséquence de contraintes thermiques excessives. Ceci peut se produire dans le cas d'un foyer à voûte conçu pour des plaquettes de bois vert mais alimenté en sous-produits de bois sec. Le combustible et le système de chauffage doivent être adaptés l'un à l'autre.

Remèdes:

- éviter toute température excessive;
- évaluer avec soin l'assortiment de combustible;
- adapter le rapport air primaire/air secondaire.

## 8.2 Réception

### Objectif

La mise en service s'est conclue à satisfaction et l'entrepreneur désire maintenant remettre l'installation au maître d'ouvrage. Cette remise par l'entrepreneur, ou réception par le maître d'ouvrage, permet de contrôler la concordance entre le cahier des charges et l'ouvrage livré ainsi que le respect des règles de l'art.

### Responsabilités et intervenants

Les travaux préalables de mise en service sont essentiellement du ressort de l'entrepreneur; ils doivent être terminés au moment de la réception. Les contrôles en commun sont toutefois conduits par la direction du chantier.

Les intervenants aux contrôles en commun sont :

- la direction du chantier (ingénieur consultant), l'architecte, le conseiller technique (le cas échéant);
- l'entrepreneur et, si nécessaire, le sous-traitant;
- le personnel d'exploitation.

Selon l'importance de l'ouvrage, il peut y avoir plus d'un entrepreneur qui participe à la réception, de telle sorte qu'il faut une réception séparée pour chaque composant et pour chaque groupe d'appareils.

Les contrôles et la réception en commun doivent se faire dans le délai d'un mois à compter de la notification de la fin des travaux (après la réussite de la mise en service). L'objectif des contrôles en commun est de rédiger un procès-verbal signé par tous les intervenants (norme SIA 118, art. 158) ayant force probante pour tous les intéressés.

### Déroulement

L'énumération qui suit contient les points particulièrement importants pour un chauffage automatique au bois :

1. Contrôle de la livraison (type, contrôle de la puissance, dimensions)
2. Contrôle de l'exécution (qualité des matériaux, respect des contraintes dimensionnelles)
3. Contrôle de sécurité (protection contre le retour de feu, comportement en cas de surcharge)

4. Contrôle des fonctions de commande (délimitation de la livraison)
5. Contrôle du comportement dynamique (ancrage du dispositif d'alimentation, hydraulique).

Documents et moyens auxiliaires nécessaires

- Contrat
- Directives du législateur (normes pour les gaz de fumées)
- Instruments de mesure
- Attestation de la puissance

### Interprétation et décisions

Les contrôles en commun permettent souvent de détecter de petits défauts et des travaux partiels non encore complètement terminés. Ces constatations peuvent aboutir à trois décisions différentes :

1. L'installation peut être acceptée.
2. L'installation peut être acceptée avec réserves (petits défauts).
3. L'installation ne peut pas être acceptée (défauts majeurs).

La réception de l'installation est différée si les contrôles en commun révèlent un ou plusieurs défauts d'importance. Le maître d'ouvrage, resp. la direction du chantier, doit impartir à l'entrepreneur un délai convenable pour remédier aux défauts constatés.

Après les travaux de mise en état de l'entrepreneur et une nouvelle notification de fin des travaux, une nouvelle procédure de réception est engagée. Dans ce but, le procès-verbal de la première procédure doit contenir la liste des contrôles déjà effectués; il n'est pas nécessaire de les répéter.

La différence entre les petits défauts et les défauts d'importance est déterminée par la pratique. Un défaut est ainsi réputé majeur s'il donne au maître d'ouvrage des raisons de le faire réparer aussi vite que possible. En font partie les défauts qui empêchent l'exploitation ou la mise en service de l'installation, qui pourraient provoquer des dommages, qui mettent en danger la vie ou la santé des personnes ou des biens du maître d'ouvrage ou de tiers. Les défauts de nature esthétique ne sont pas considérés comme substantiels. Dans tous les cas,

il faut tenir compte des répercussions d'un défaut sur l'ensemble de l'installation pour pouvoir l'apprécier à sa juste valeur.

Certaines mesures de performances ne peuvent pas être effectuées pendant les contrôles en commun, à savoir : le degré d'utilisation annuelle, le comportement en cas de conditions climatiques extrêmes, les mesures du bruit dans des immeubles normalement occupés, etc. Ces réserves doivent également faire l'objet d'une définition précise et être constatées dans le procès-verbal de contrôle.

#### Procès-verbal de contrôle

La norme SIA 118, art. 158, al. 3, recommande aux parties prenantes d'établir dans tous les cas un procès-verbal de contrôle, et de le signer. C'est le meilleur moyen d'attester des réserves qui auraient été formulées. Le procès-verbal doit comprendre les points suivants (exemple) :

- liste des documents d'exploitation remis ;
- liste des documents manquants et délais de remise ;
- liste des réserves pour les défauts et aspects relevés, avec indication du délai imparti pour y remédier ;
- contrat de garantie ;
- contrats de service et d'exploitation ;
- date, nom et signature légalement valable de l'entrepreneur, du maître d'ouvrage et de la direction du chantier.

#### Début de l'exploitation par le maître de l'ouvrage

A l'issue de la réception, l'objet réalisé par l'entrepreneur doit être remis au maître d'ouvrage. Cet acte porte le nom de réception ou de remise. L'ouvrage est ainsi terminé : l'entrepreneur a remis sa notification de fin des travaux et les contrôles en commun n'ont constaté aucun défaut substantiel. Tel est le déroulement dans le cas idéal.

#### Conséquences

- Remise de la responsabilité de surveillance.  
A compter de l'instant de la remise, il appartient au maître d'ouvrage de prendre toutes les

mesures nécessaires à la protection de la vie et de la santé des personnes, de leurs biens et de leur propriété. Ces obligations incombent à l'entrepreneur jusqu'à la remise de l'objet (norme SIA 118, art. 103).

- Transmission des risques.  
L'entrepreneur n'assume plus aucun risque en cas d'accidents provoquant des dommages ou la perte de l'objet.
- Les délais de garantie et de prescription commencent à courir (norme SIA 118, art. 172, al. 2 et art. 180 al. 1).
- L'entrepreneur doit communiquer, dans un délai de deux mois, le décompte final (norme SIA 118, art. 154).



### 8.3 Contrat de service

Un ou plusieurs contrats de service peuvent être nécessaires, selon la taille et la complexité de l'installation, et selon le nombre des entrepreneurs principaux.

Les partenaires contractuels possibles sont les suivants :

- le fournisseur de la chaudière et de ses dispositifs de commande ;
- le fournisseur de l'ensemble du silo (remplissage et extraction du silo) ;
- le fournisseur des dispositifs de traitement des gaz de fumées ;
- le fournisseur des installations sanitaires ;
- le fournisseur de la commande électrique du système de commande.

Selon les circonstances, il convient de conclure un contrat de service avec tous les fournisseurs mentionnés ci-dessus. Les prestations comprises doivent être toutefois identiques ou semblables pour chacun d'entre eux.

*Le contrat de service doit régler les points suivants :*

- objet du contrat ;
- délimitation de la livraison et des prestations clairement décrites (garanties également possibles !);
- description des exclusions et exceptions ;
- indication des taux horaires, allocations et frais ;
- coûts résultant du contrat ;
- dénonciation du contrat ;
- prolongation du contrat ;
- adresse de contact et organisation des demandes de prestations en cas d'urgence ;
- obligations de l'exploitant ;
- droits de l'entrepreneur ;
- lieu, date et signature du maître d'ouvrage et de l'entrepreneur.

Il est recommandé de conclure un contrat pouvant être renouvelé et éventuellement adapté chaque année.

## 9. Annexes

---

A1	Exemples	147
	Exemple 1: Bois de forêt 150 kW, bivalence, réseau de chaleur	148
	Exemple 2: Restes de bois de menuiserie, 450 kW, monovalence	152
	Exemple 3: Bois de forêt et restes de transformation, 150 kW, monovalence, 1 chaudière avec accumulateur, échangeur supplémentaire	156
	Exemple 4: Bois de forêt et restes de transformation, 6,6 MW, monovalence, plusieurs chaudières, réseau de chaleur, condensation des gaz de fumées	160
	Exemple 5: Bois de forêt, 1,4 MW, monovalence, plusieurs chaudières, réseau de chaleur	164
	Exemple 6: Bois de forêt, 800 kW, bivalence, plusieurs chaudières, réseau de chaleur	168

---

A2	Limites fixées par l'OPair pour les bois de chauffage	172
----	---	-----

---

A3	Calcul du rendement annuel $\eta_a$	173
----	-------------------------------------	-----

---

A4	Calcul du débit massique d'oxyde d'azote	175
----	--	-----

---

A5	Modèles à copier	177
	Formules de description d'installation	177
	Nomogramme pour le calcul du rendement technique de combustion de la chaudière	179

---

A6	Appel d'offres FSIB	180
----	---------------------	-----

---

A7	Bibliographie	190
----	---------------	-----

---

A8	Prescriptions et ordonnances	191
----	------------------------------	-----

---

A9	Adresses importantes	192
----	----------------------	-----

---

### A1 Exemples

Les pages suivantes contiennent la description de six exemples d'installations réalisées.

Les caractéristiques les plus importantes sont rassemblées dans un descriptif d'installation établi pour chacun de ces exemples, complété par différents documents tels que plans d'ensemble, photographies, etc.

Exemple 1: Bois de forêt, 150 kW, bivalence, réseau de chaleur  
Fiche signalétique

**Objet**

Emplacement: Juchhof, Zürich Altitude au-dessus du niveau de la mer: 396 m

But:  Chauffage des locaux  Eau chaude sanitaire  Chaleur industrielle *+ exploit agricole*

Usagers:  Ecole  Habitation individ.  Habitation plurifamiliale

Indices énergétiques:  MJ/m<sup>2</sup>/a  Surface de référence SRE ..... m<sup>2</sup>

Besoins en puissance thermique: Extension initiale: 150 kW Extension finale: ..... kW

Besoins en énergie thermique: Extension initiale: 230 MWh/a Extension finale: ..... MWh/a

Production de chaleur: Chaudière à bois 1: 130 kW Chaudière à bois 2: ..... kW Chaudière à bois 3: ..... kW

Chaudière à mazout: 26 kW Chaudière à gaz: ..... kW

Réseau de chauffage à distance: Puissance: 156 kW Longueur du tracé: 280 m

**Combustible**

Approvisionnement:  Achat de bois énergie

Propre fourniture (scierie par. ex.), désignation exacte: Forêt propre

Combinaison d'achat et d'approvisionnement propre: ..... % d'approvisionnement propre

Plaquettes forestières  Sous-produits de transformation  .....

100 % directement de la forêt au silo ..... % scierie

..... % indirectement (stock interméd.) ..... % menuiserie

..... % mixte (direct et indirect) ..... % charpenterie

..... % fabrication de panneaux de particules

Assortiment:  Bois feuillus Teneur en eau:  10 - 25 %

Bois résineux et feuillus tendres  25 - 40 %

Écorces  40 - 50 %

Sous-produits du bois  50 - 60 %

> 60 %

Facturation  par m<sup>3</sup> PI Prix: 13 Fr./m<sup>3</sup> PI Pour combustible: ..... à x = ..... %

par kWh ..... Fr./kWh *seulement déchetage*

par t<sub>atro</sub> ..... Fr./t<sub>atro</sub>

**Chaudière**

Type de chaudière:  Foyer à poussée inférieure  Foyer à grille mobile  .....

Régulation:  Puissance  à un niveau 100%  Combustion  Régulation de la température

sur plusieurs niveaux  Régulation lambda

(p. ex. 100/80/60%)  Régulation CO/lambda

en continu (p. ex. 100%-30%)  Autre: .....

autre: .....

Epuration des gaz de fumée:  Cyclone  Electrofiltre  Filtre textile

Filtre  SCR  SNCR

DENOX

**Silo**

Volume brut: 80 m<sup>3</sup> Volume net: 50 m<sup>3</sup>

Système de chargement:  Convoyeur  Répartiteur silo  Pompe  Autre: .....

Système d'extraction:  Raclor de fond  Extracteur central  Autres: .....

Autonomie:  < 1 semaine  1 - 2 semaines  2 - 4 semaines

(pendant la saison la plus froide)  4 - 8 semaines  > 8 semaines

Rotation du volume net du silo: ..... nombre de rotations du volume net par an

**Données d'exploitation**

Heures de pleine puissance: Au bois: 2.000 h/a Au mazout: ..... h/a

Consommation annuelle: Bois 250 m<sup>3</sup> PI/an  t<sub>atro</sub>/a  230 MWh/a à η<sub>a</sub> = 85 %

Mazout  l/a  t/a

Consommation d'électricité pour le fonctionnement du chauffage au bois: ..... kWh/a

Chaleur utile: 195 MWh/a

Investissements	Investissement	Durée	Annuité	Amortissement	Entretien & Réparations	Coûts de E & R
Construction chaufferie:	20 000 Fr.	30 an	6.5 %	1 300 Fr/a	1 %	300 Fr/a
Construction silo (y c. accès):	35 300 Fr.	30 an	6.5 %	2 295 Fr/a	1 %	370 Fr/a
Extracteur de silo:	26 000 Fr.	15 an	9.6 %	2 500 Fr/a	3 %	790 Fr/a
Construction citerne:	- Fr.	15 an	- %	- Fr/a	- %	- Fr/a
Instal. sanitaires et électriques:	29 000 Fr.	15 an	9.6 %	2 800 Fr/a	3 %	870 Fr/a
Chaudière, y c. raccordement au collecteur:	26 000 Fr.	15 an	9.6 %	2 200 Fr/a	3 %	2 300 Fr/a
Cheminée:	5 000 Fr.	15 an	9.6 %	482 Fr/a	1 %	10 Fr/a
Déchetiseur:	- Fr.	- an	- %	- Fr/a	- %	- Fr/a
Réseau de chaleur:	110 000 Fr.	30 an	6.5 %	7 150 Fr/a	1 %	1 100 Fr/a
Honoraires de planification:	20 000 Fr.	15 an	9.6 %	2 800 Fr/a	- %	- Fr/a
Subventions: <input type="checkbox"/> Confédération	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
<input type="checkbox"/> Canton	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
<input type="checkbox"/> .....	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a

Coûts annuels (sans renchérissement)			
Amortissements (Cf. investissements)			Total ..... 33 400 Fr/a
Coûts du combustible:	Bois	3 300 Fr/a	
	Electricité	..... Fr/a	
	Mazout	..... Fr/a	Total ..... 3 300 Fr/a
Coûts entretien et réparations	Personnel, service	6 250 Fr/a	
	Ramoneur, mesures	300 Fr/a	Total ..... 6 500 Fr/a
Frais divers	Administration	..... Fr/a	
	Assurances, impôts	..... Fr/a	Total ..... - Fr/a
Coûts annuels totaux			..... 45 200 Fr/a

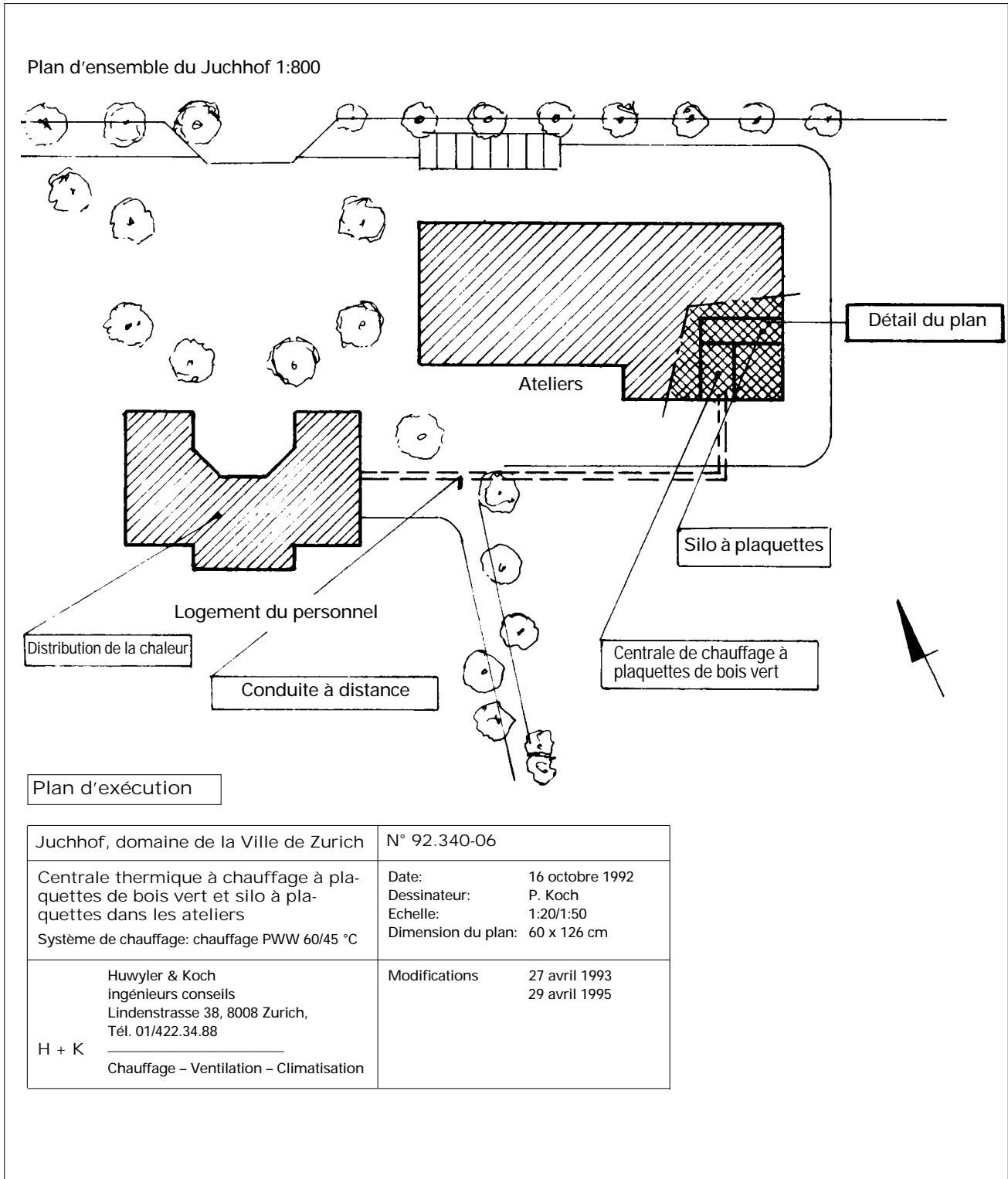
Caractéristiques principales (résumé)			
Chaleur utile:	1 900 MWh/a	Prix de l'énergie: sans réseau	17.1 ct/kWh
Heures de marche pleines:	2 000 h/a	Prix de l'énergie: avec réseau	22.7 ct/kWh
Coût de l'installation:	2 200 Fr./kW		
Coût du réseau:	400 Fr./m'		

Mode de facturation du réseau		propres bâtiments
Prix de l'énergie:	..... ct/kWh	Taxe de raccordement forfaitaire ..... Fr./kW
Taxe de base:	..... Fr./kW par an	

Autres documents	
<input type="checkbox"/> Schéma de la chaudière	Données sur: <input type="checkbox"/> Etudes préliminaires
<input type="checkbox"/> Disposition de la chaufferie/locaux	<input type="checkbox"/> Avant-projet
<input type="checkbox"/> Schéma du réseau	<input type="checkbox"/> Projet
<input type="checkbox"/> Contrôle OPair	<input type="checkbox"/> Exécution, direction technique des travaux
	<input type="checkbox"/> Mise en service et réception

**Particularités**

- L'exploitant possède de la forêt et ne paye que les frais de déchetage
- Transformation → plus chère qu'une construction neuve
- Réseau de chaleur pour propres bâtiments → pas de vente de chaleur.

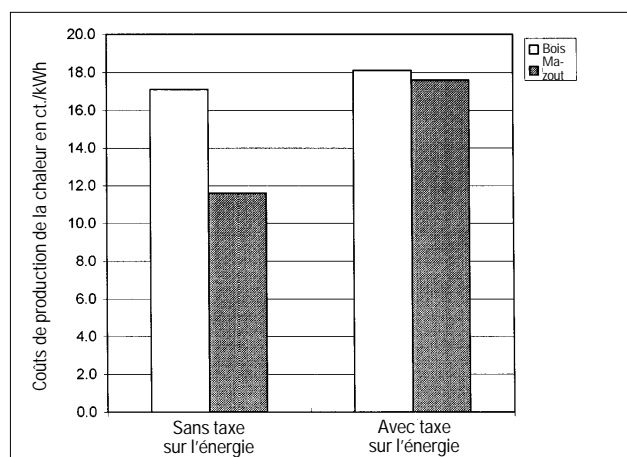


Comparaison avec la variante à mazout  
Investissements I, sans le réseau de chauffage à distance

Composante d'installation	Variante mazout Mazout Lownox	Variante chauffage automatique à plaquettes	Annuité	Coûts du capital	
				Mazout	Plaquettes
Cheminée	Fr. 5'000.00	Fr. 5'000.00	9,63%	Fr. 481.50	Fr. 481.50
Production de chaleur	Fr. 25'000.00	Fr. 81'000.00	9,63%	Fr. 2'407.50	Fr. 7'800.30
Branchement hydraulique	Fr. 20'000.00	Fr. 16'000.00	9,63%	Fr. 1'926.00	Fr. 1'540.80
Equipements d'expansion et de sécurité	Fr. 5'000.00	Fr. 10'000.00	9,63%	Fr. 481.50	Fr. 963.00
Raccordement à la conduite à distance	Fr. 15'000.00	Fr. 15'000.00	6,50%	Fr. 975.00	Fr. 975.00
Démontages	Fr. 5'000.00	Fr. 5'000.00	9,63%	Fr. 481.50	Fr. 481.50
Silo à plaquettes		Fr. 35'300.00	6,50%	Fr. 2'294.50	
Citerne à mazout	Fr. 20'000.00		6,50%	Fr. 1'300.00	Fr. 1'300.00
Construction chaufferie	Fr. 25'000.00	Fr. 20'000.00	6,50%	Fr. 1'625.00	Fr. 1'300.00
Electricité	Fr. 10'000.00	Fr. 27'000.00	9,63%	Fr. 963.00	Fr. 2'600.10
Sanitaire		Fr. 2'000.00	9,63%	Fr. 0.00	Fr. 192.60
Ingénieur spécialiste	Fr. 40'000.00	Fr. 50'000.00	9,63%	Fr. 3'852.00	Fr. 4'815.00
Aides financières OFEN		Fr. -16'000.00	9,63%	Fr. 0.00	Fr. -1'540.00
<b>Total investissements</b>	<b>Fr. 170'000.00</b>	<b>Fr. 250'300.00</b>		<b>Fr. 14'493.00</b>	<b>Fr. 21'903.50</b>
<b>Coûts du capital C</b>	<b>Fr. 14'493.00</b>	<b>Fr. 21'903.50</b>			

Coûts d'entretien et de maintenance

Composante d'installation	Variante mazout Mazout Lownox	Variante chauffage automatique à plaquettes	En % de l'investissement	Entretien et maintenance	
				Mazout	Plaquettes
Cheminée	Fr. 5'000.00	Fr. 5'000.00	1,00%	Fr. 50.00	Fr. 50.50
Production de chaleur	Fr. 25'000.00	Fr. 81'000.00	3,00%	Fr. 750.00	Fr. 2'430.30
Branchement hydraulique	Fr. 20'000.00	Fr. 16'000.00	1,00%	Fr. 200.00	Fr. 160.00
Equipements d'expansion et de sécurité	Fr. 5'000.00	Fr. 10'000.00	3,00%	Fr. 150.50	Fr. 300.00
Raccordement à la conduite à distance	Fr. 15'000.00	Fr. 15'000.00	1,00%	Fr. 150.00	Fr. 150.00
Démontages	Fr. 5'000.00	Fr. 5'000.00			
Silo à plaquettes		Fr. 35'300.00	1,00%		Fr. 353.00
Citerne à mazout	Fr. 20'000.00		1,00%	Fr. 200.00	
Construction chaufferie	Fr. 25'000.00	Fr. 20'000.00	1,00%	Fr. 250.00	Fr. 200.00
Electricité	Fr. 10'000.00	Fr. 27'000.00	3,00%	Fr. 300.00	Fr. 810.00
Sanitaire		Fr. 2'000.00	3,00%		Fr. 60.00
Ingénieur spécialiste	Fr. 40'000.00	Fr. 50'000.00			
Aides financières OFEN		Fr. -16'000.00			
<b>Total investissements</b>	<b>Fr. 170'000.00</b>	<b>Fr. 250'300.00</b>		<b>Fr. 2'050.00</b>	<b>Fr. 4'513.00</b>
<b>Maintenance + A21</b>	<b>Fr. 2'050.00</b>	<b>Fr. 4'513.00</b>			



Coûts de production de la chaleur avec et sans prise en compte des taxes sur l'énergie - Exemple du Juchhof

Exemple 2: Restes de bois de menuiserie, 450 kW, monovalence  
Fiche signalétique

<b>Objet</b>		
Emplacement:	Pratteln BL	Altitude au-dessus du niveau de la mer: 278 m
But:	<input checked="" type="checkbox"/> Chauffage des locaux	<input checked="" type="checkbox"/> Eau chaude sanitaire <input checked="" type="checkbox"/> Chaleur industrielle
Usagers:	.... Ecole	.... Habitation individ. .... Habitation plurifamiliale
	Indice énergétique: .....	MJ/m <sup>2</sup> /a ..... Surface de référence SRE .....m <sup>2</sup>
Besoins en puissance thermique:	Extension initiale: 450 kW	Extension finale: .....kW
Besoins en énergie thermique:	Extension initiale: 80 MWh/a	Extension finale: .....MWh/a
Production de chaleur:	Chaudière à bois 1: 450 kW	Chaudière à bois 2: .....kW Chaudière à bois 3: .....kW
	Chaudière à mazout: .....kW	Chaudière à gaz: .....kW
Réseau de chauffage à distance:	Puissance: 450 kW	Longueur du tracé:.....m

<b>Combustible</b>		
Approvisionnement:	<input type="checkbox"/> Achat de bois énergie	
	<input checked="" type="checkbox"/> Propre fourniture (scierie par. ex.), désignation exacte: copeaux plaquettes	
	<input type="checkbox"/> Combinaison d'achat et d'approvisionnement propre: .....% d'approvisionnement propre	
	<input type="checkbox"/> Plaquettes forestières	<input checked="" type="checkbox"/> Sous-produits de transformation <input type="checkbox"/> .....
	.... % directement de la forêt au silo	.... % scierie
	.... % indirectement (stock interméd.)	100 % menuiserie
	.... % mixte (direct et indirect)	.... % charpenterie
		.... % fabrication de panneaux de particules
Assortiment:	<input type="checkbox"/> Bois feuillus	Teneur en eau: <input type="checkbox"/> 10 - 25 %
	<input type="checkbox"/> Bois résineux et feuillus tendres	<input type="checkbox"/> 25 - 40 %
	<input type="checkbox"/> Écorces	<input type="checkbox"/> 40 - 50 %
	<input checked="" type="checkbox"/> Sous-produits du bois	<input type="checkbox"/> 50 - 60 %
		<input type="checkbox"/> > 60 %
Facturation	<input type="checkbox"/> par m <sup>3</sup> Pl	Prix: ..... Fr./m <sup>3</sup> Pl
	<input type="checkbox"/> par kWh	..... Fr./kWh
	<input type="checkbox"/> par t <sub>atro</sub>	..... Fr./t <sub>atro</sub>
		Pour combustible: ..... à x = .....%

<b>Chaudière</b>		
Type de chaudière:	<input checked="" type="checkbox"/> Foyer à poussée inférieure	<input type="checkbox"/> Foyer à grille mobile <input type="checkbox"/> .....
Régulation	<input checked="" type="checkbox"/> Puissance <input type="checkbox"/> à un niveau 100%	<input checked="" type="checkbox"/> Combustion <input checked="" type="checkbox"/> Régulation de la température
	<input type="checkbox"/> sur plusieurs niveaux (p. ex. 100/80/60%)	<input type="checkbox"/> Régulation lambda
	<input checked="" type="checkbox"/> en continu (p. ex. 100%-30%)	<input type="checkbox"/> Régulation CO/lambda
	<input type="checkbox"/> autre: .....	<input type="checkbox"/> Autre: .....
Epuration des gaz de fumée:	<input type="checkbox"/> Cyclone	<input type="checkbox"/> Electrofiltre
	<input type="checkbox"/> Filtre	<input type="checkbox"/> SCR
	<input type="checkbox"/> DENOX	<input type="checkbox"/> Filtre textile
		<input type="checkbox"/> SNCR

<b>Silo</b>		
Volume brut:	180 m <sup>3</sup>	Volume net: 150 m <sup>3</sup>
Système de chargement:	<input type="checkbox"/> Convoyeur	<input type="checkbox"/> Répartiteur silo <input type="checkbox"/> Pompe
Système d'extraction:	<input type="checkbox"/> Racloir de fond	<input type="checkbox"/> Extracteur central <input checked="" type="checkbox"/> Autres: vis pendulaire
Autonomie: (pendant la saison la plus froide)	<input type="checkbox"/> < 1 semaine	<input type="checkbox"/> 1 - 2 semaines <input type="checkbox"/> 2 - 4 semaines
	<input type="checkbox"/> 4 - 8 semaines	<input type="checkbox"/> > 8 semaines
Rotation du volume net du silo: ~3	+ entrepôt pour bois en morceaux	
	nombre de rotations du volume net par an	

<b>Données d'exploitation</b>		
Heures de pleine puissance:	Au bois: 1920 h/a	Au mazout:..... h/a
Consommation annuelle:	Bois <input checked="" type="checkbox"/> 450 m <sup>3</sup> Pl/an	<input type="checkbox"/> ..... t <sub>atro</sub> /a <input checked="" type="checkbox"/> 80 MWh/a à η <sub>a</sub> = 85 %
	Mazout <input type="checkbox"/> ..... l/a	<input type="checkbox"/> ..... t/a
	Consommation d'électricité pour le fonctionnement du chauffage au bois: 10.000 kWh/a	
Chaleur utile:	720 MWh/a	

Investissements	Investissement	Durée	Annuité	Amortissement	Entretien & Réparations	Coûts de E & R
Construction chaufferie:	Fr. ....	..... an	..... %	Fr./a	..... %	Fr./a
Construction silo (y c. accès):	Fr. ....	..... an	..... %	Fr./a	..... %	Fr./a
Extracteur de silo:	Fr. ....	..... an	..... %	Fr./a	..... %	Fr./a
Construction citerne: Filtrés	78'000 Fr.	15 an	9,63 %	7'150 Fr./a	3 %	2'340 Fr./a
Instal. sanitaires et électriques:	14'000 Fr.	15 an	9,63 %	1'350 Fr./a	1,5 %	310 Fr./a
Chaudière, y c. raccordement au collecteur:	171'000 Fr.	15 an	9,63 %	16'420 Fr./a	2,5 %	4'280 Fr./a
Cheminée:	10'000 Fr.	15 an	9,63 %	950 Fr./a	3,5 %	310 Fr./a
Déchetiseur:	Fr. ....	..... an	..... %	Fr./a	..... %	Fr./a
Réseau de chaleur:	Fr. ....	..... an	..... %	Fr./a	..... %	Fr./a
Honoraires de planification:	8'300 Fr.	15 an	9,63 %	820 Fr./a	..... %	..... Fr./a
Subventions: <input type="checkbox"/> Confédération	Fr. ....	..... an	..... %	Fr./a	..... %	..... Fr./a
<input checked="" type="checkbox"/> Canton	31'000 Fr.	15 an	9,63 %	3'130 Fr./a	..... %	..... Fr./a
<input type="checkbox"/> .....	Fr. ....	..... an	..... %	Fr./a	..... %	..... Fr./a

Coûts annuels (sans renchérissement)		Total
Amortissements (Cf. investissements)		23'980 Fr./a
Coûts du combustible:		
Bois	..... Fr./a	
Electricité	1'700 Fr./a	
Mazout	..... Fr./a	
Total		1'700 Fr./a
Coûts entretien et réparations		
Personnel, service	..... Fr./a	
Ramoneur, mesures	..... Fr./a	
Total		7'180 Fr./a
Frais divers		
Administration	7'180 Fr./a	
Assurances, impôts	..... Fr./a	
Total		32'860 Fr./a
Coûts annuels totaux		

Caractéristiques principales (résumé)		
Chaleur utile:	720 MWh/a	Prix de l'énergie: sans réseau 46 ct/kWh
Heures de marche pleines:	1'900 h/a	Prix de l'énergie: avec réseau ..... ct/kWh
Coût de l'installation:	330 Fr./kW	
Coût du réseau:	..... Fr./m'	

Mode de facturation du réseau	
Prix de l'énergie:	..... ct/kWh
Taxe de base:	..... Fr./kW par an
Taxe de raccordement forfaitaire	..... Fr./kW

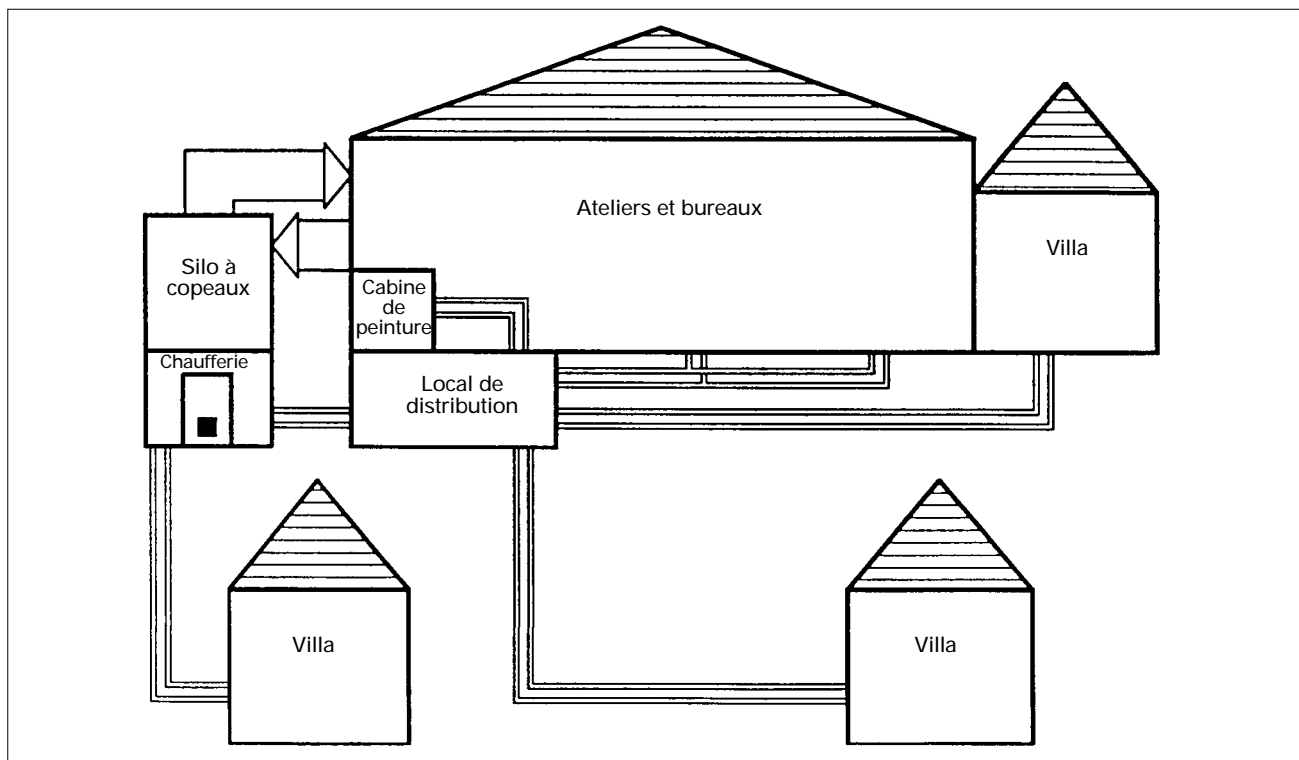
Autres documents	
<input type="checkbox"/> Schéma de la chaudière	Données sur: <input type="checkbox"/> Etudes préliminaires
<input type="checkbox"/> Disposition de la chaufferie/locaux	<input type="checkbox"/> Avant-projet
<input type="checkbox"/> Schéma du réseau	<input type="checkbox"/> Projet
<input type="checkbox"/> Contrôle OPAir	<input type="checkbox"/> Exécution, direction technique des travaux
	<input type="checkbox"/> Mise en service et réception

**Particularités**

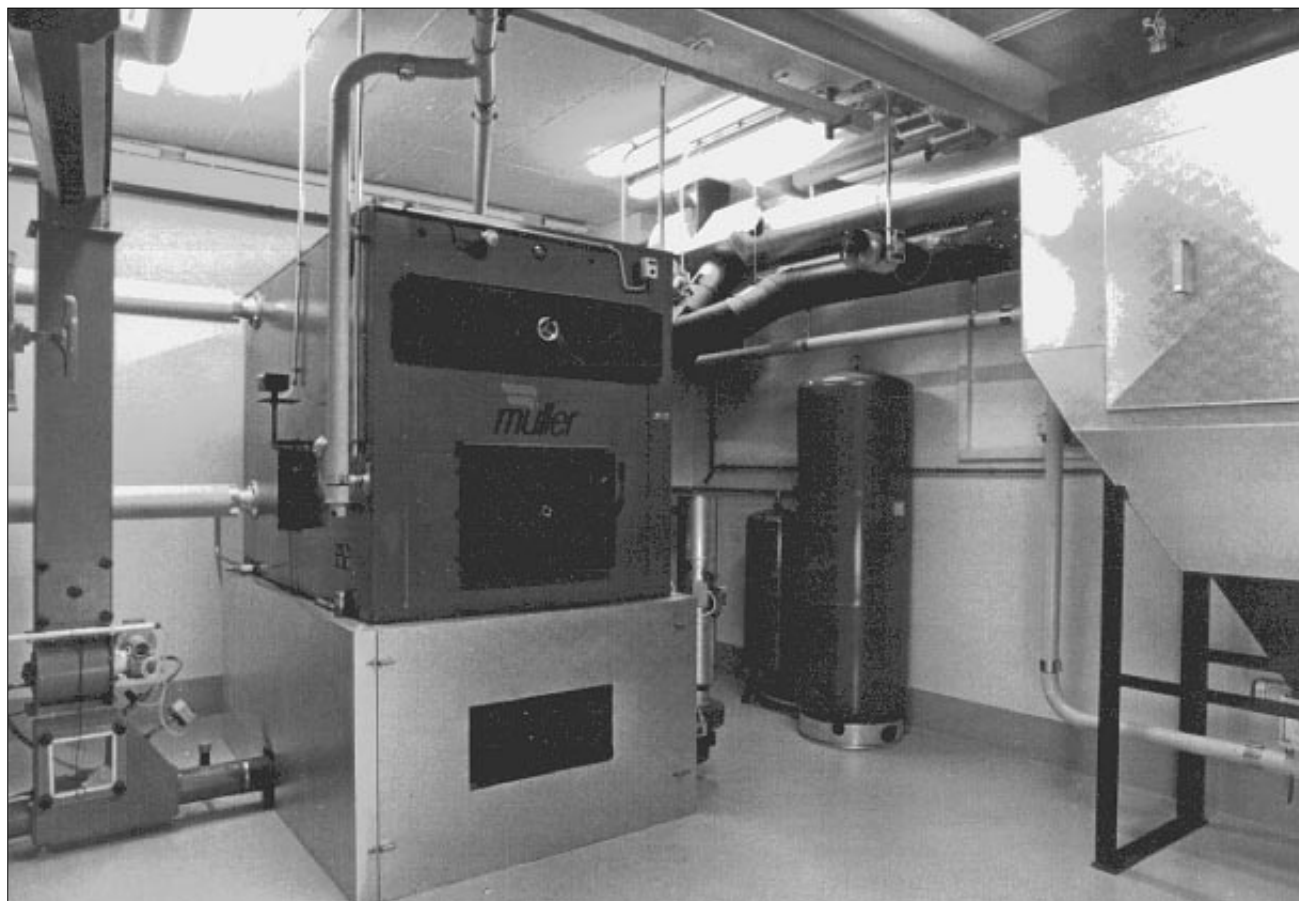
- la chaudière a été remplacée par une nouvelle.
- le silo, le déchetiseur, la distribution de chaleur sont existants
- le fabricant de la chaudière a dû monter un filtre pour respecter les normes OPAir.



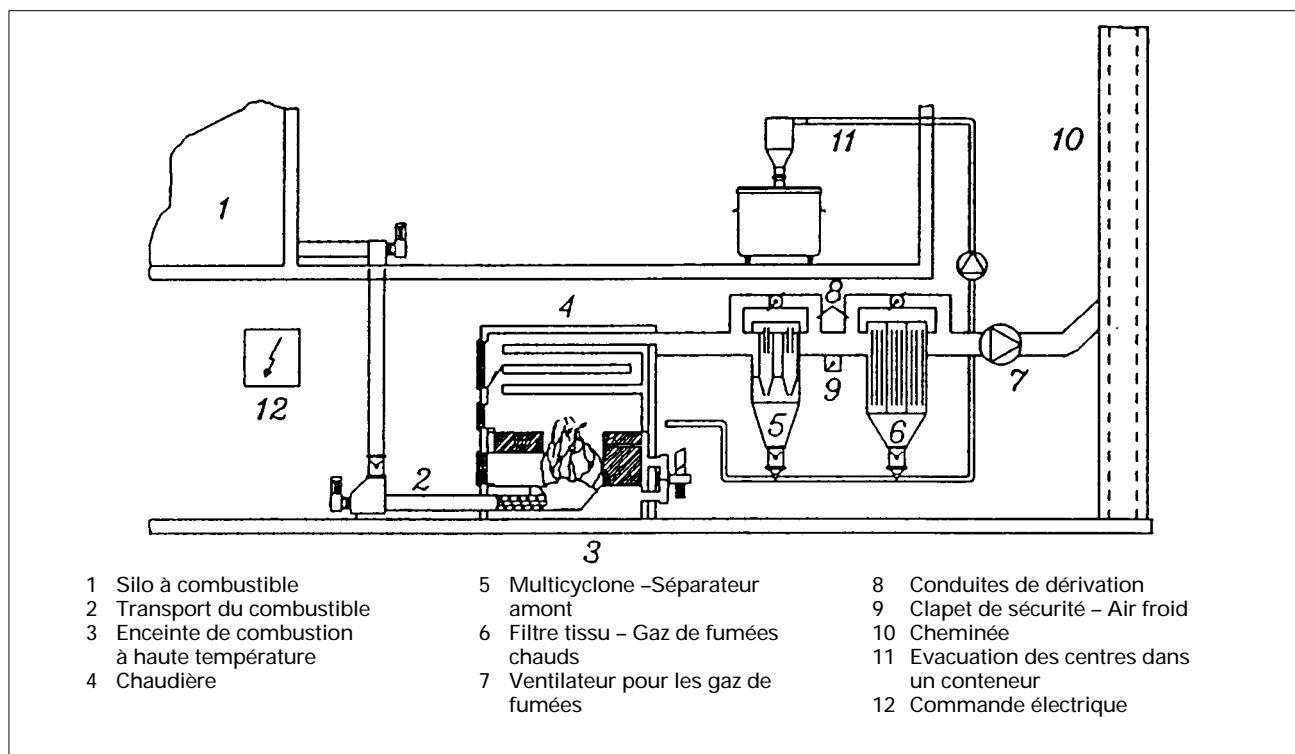
Vue d'ensemble du réseau de chauffage à distance - Menuiserie et villas



Chaufferie de la menuiserie



## Vue d'ensemble du chauffage automatique au bois



## Mesures des gaz de fumées avant et après le filtre tissu

PENTOMAG S.A. Hauenstrasse 63 A 4002 Bâle Tél.: 061 / 272 93 90 Fax: 061 / 272 93 94		RAPPORT DE MESURE des EMISSIONS relevant de la protection de l'air		PENTOMAG S.A. Im Rifibrunden Unterschottikon 8352 Rätterschen Tél.: 052 / 361 504 Fax: 052 / 361 504			
EXPLOITANT DE L'INSTALLATION: <i>Schneider S.A. - 4133 Pratteln</i>							
RÉSULTATS DE MESURE: Les mesures que nous avons effectuées ont donné les résultats suivants:							
		Particules solides (mg/m <sup>3</sup> )	Température des gaz de fumées (°C)	Teneur en CO <sub>2</sub> % vol.	Teneur en C O (mg/m <sup>3</sup> )	Teneur en NO <sub>x</sub> (expr. NO <sub>2</sub> ) (mg/m <sup>3</sup> )	Vitesse des gaz de fumées (m/s)
<b>APRÈS CYCLONE ET FILTRE TISSU</b> (manchon de mesure N° 10)							
- A 100% de la puissance de la chaudière	Mesure N° 1	< 10	124+/-6	15,4+/-0,2	523+/-52	219+/-22	8,9+/-2
	Mesure N° 2	< 10	130+/-7	15,2+/-0,2	288+/-29	294+/-29	8,9+/-2
	<b>Valeur moyenne</b>	< 10	<b>127+/-7</b>	<b>15,3+/-0,2</b>	<b>406+/-41</b>	<b>257+/-26</b>	<b>8,9+/-2</b>
- A 60% de la puissance de la chaudière	Mesure N° 3	< 10	118+/-6	15,5+/-0,2	240+/-24	267+/-27	5,7+/-1
	Mesure N° 4	< 10	110+/-6	15,8+/-0,2	353+/-35	277+/-28	5,7+/-1
	<b>Valeur moyenne</b>	< 10	<b>114+/-6</b>	<b>15,7+/-0,2</b>	<b>297+/-30</b>	<b>272+/-27</b>	<b>5,7+/-1</b>
- A 30% de la puissance de la chaudière	Mesure N° 5	< 10	98+/-5	16,6+/-0,2	173+/-17	294+/-29	4,2+/-0,9
	Mesure N° 6	< 10	90+/-5	16,7+/-0,2	335+/-34	277+/-28	4,2+/-0,9
	<b>Valeur moyenne</b>	< 10	<b>94+/-5</b>	<b>16,7+/-0,2</b>	<b>254+/-25</b>	<b>286+/-29</b>	<b>4,2+/-0,9</b>
<b>APRÈS CYCLONE (SANS FILTRE TISSU)</b> (manchon de mesure N° 9 à l'issue de la cheminée)							
- A 100% de la puissance de la chaudière	Mesure N° 9	114+/-18	124+/-6	15,2+/-0,2	210+/-21	333+/-33	5,1+/-1
	Mesure N° 10	118+/-20	130+/-7	15,3+/-0,2	149+/-15	347+/-35	5,2+/-1
	<b>Valeur moyenne</b>	<b>116+/-20</b>	<b>127+/-7</b>	<b>15,3+/-0,2</b>	<b>180+/-18</b>	<b>340+/-34</b>	<b>5,2+/-1</b>
REMARQUES: .....							
Date:	14.4.93	Responsable des mesures:		p.o. U Trüb			

Exemple 3: Bois de forêt et restes de transformation, 150 kW, monovalence, 1 chaudière avec accumulateur, échangeur supplémentaire

Fiche signalétique

**Objet**

Emplacement: Grünigen, ZH Altitude au-dessus du niveau de la mer: 492 m

But:  Chauffage des locaux  Eau chaude sanitaire  Chaleur industrielle

Usagers:  Ecole  Habitation individ.  Habitation plurifamiliale

Indice énergétique: ..... MJ/m<sup>2</sup>/a Surface de référence SRE .....m<sup>2</sup>

Besoins en puissance thermique: Extension initiale: 130 kW Extension finale: .....kW

Besoins en énergie thermique: Extension initiale: 350 MWh/a Extension finale: .....MWh/a

Production de chaleur: Chaudière à bois 1: 130 kW Chaudière à bois 2: .....kW Chaudière à bois 3: .....kW

Chaudière à mazout: .....kW Chaudière à gaz: .....kW

Réseau de chauffage à distance: Puissance: 130 kW Longueur du tracé: 210 m

**Combustible**

Approvisionnement:  Achat de bois énergie  Propre fourniture (scierie par. ex.), désignation exacte: .....  Combinaison d'achat et d'approvisionnement propre: .....% d'approvisionnement propre

Plaquettes forestières  Sous-produits de transformation  .....   
75 % directement de la forêt au silo 25 % scierie   
 ..... % indirectement (stock interméd.) ..... % menuiserie   
 ..... % mixte (direct et indirect) ..... % charpenterie   
 ..... % fabrication de panneaux de particules

Assortiment:  Bois feuillus Teneur en eau:  10 - 25 %   
 Bois résineux et feuillus tendres  25 - 40 %   
 Écorces  40 - 50 %   
 Sous-produits du bois  50 - 60 %   
 > 60 %

Facturation  par m<sup>3</sup> PI Prix: 45 Fr./m<sup>3</sup> PI Pour combustible: ..... à x = .....%   
 par kWh ..... Fr./kWh 2 ans après la mise en service   
 par t<sub>atro</sub> ..... Fr./t<sub>atro</sub>

**Chaudière**

Type de chaudière:  Foyer à poussée inférieure  Foyer à grille mobile  .....

Régulation  Puissance  à un niveau 100%  Combustion  Régulation de la température   
 sur plusieurs niveaux  Régulation lambda   
 (p. ex. 100/80/60%)  Régulation CO/lambda   
 en continu (p. ex. 100%-30%)  Autre: .....   
 autre: .....

Epurateur des gaz de fumée:  Cyclone  Electrofiltre  Filtre textile   
 Filtre  SCR  SNCR   
 DENOX

**Silo**

Volume brut: 111 m<sup>3</sup> Volume net: 95 m<sup>3</sup>

Système de chargement:  Convoyeur  Répartiteur silo  Pompe  Autre: .....

Système d'extraction:  Raclor de fond  Extracteur central  Autres: .....

Autonomie:  < 1 semaine  1 - 2 semaines  2 - 4 semaines   
 (pendant la saison la plus froide)  4 - 8 semaines  > 8 semaines

Rotation du volume net du silo: 4 nombre de rotations du volume net par an

**Données d'exploitation**

Heures de pleine puissance: Au bois: 1700 h/a Au mazout: ..... h/a

Consommation annuelle: Bois  330 m<sup>3</sup> PI/a  ..... t<sub>atro</sub>/a  350 MWh/a à η<sub>a</sub> = 85 %   
 Mazout  ..... l/a  ..... t/a

Consommation d'électricité pour le fonctionnement du chauffage au bois: 3000 kWh/a

Chaleur utile: 295 MWh/a

Investissements	Investissement	Durée	Annuité	Amortissement	Entretien & Réparations	Coûts de E & R
Construction chaufferie:	16'000 Fr.	20 an	8.34 %	5'450 Fr/a	1 %	860 Fr/a
Construction silo (y c. accès):	58'000 Fr.	20 an	8.77 %	5'080 Fr/a	2 %	1'160 Fr/a
Extracteur de silo:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
Construction citerne:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
Instal. sanitaires et électriques:	27'000 Fr.	25 an	8.82 %	2'110 Fr/a	1.5 %	410 Fr/a
Chaudière, y c. raccordement au collecteur:	136'000 Fr.	20 an	8.77 %	11'900 Fr/a	2.5 %	3'410 Fr/a
Cheminée:	9'000 Fr.	15 an	10.30 %	930 Fr/a	3.5 %	330 Fr/a
Déchiqueteur:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
Réseau de chaleur:	25'500 Fr.	12 an	11.93 %	1'190 Fr/a	1.5 %	380 Fr/a
Honoraires de planification:	165'000 Fr.	25 an	8.82 %	12'900 Fr/a	..... %	..... Fr/a
Subventions:						
<input checked="" type="checkbox"/> Confédération	80'000 Fr.	20 an	8.72 %	4'300 Fr/a		
<input checked="" type="checkbox"/> Canton	76'000 Fr.	20 an	8.72 %	6'680 Fr/a		
<input type="checkbox"/> .....	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a		

Coûts annuels (sans renchérissement)					
Amortissements (Cf. investissements)				Total 28'550 Fr/a	
Coûts du combustible:	Bois	16'650 Fr/a			
	Electricité	540 Fr/a			
	Mazout	..... Fr/a			
			Total	17'190 Fr/a	
Coûts entretien et réparations	Personnel, service	..... Fr/a	}	Total	6'540 Fr/a
	Ramoneur, mesures	..... Fr/a			
Frais divers	Administration	6'540 Fr/a	}	Total	..... Fr/a
	Assurances, impôts	..... Fr/a			
Coûts annuels totaux				52'280 Fr/a	

Caractéristiques principales (résumé)			
Chaleur utile:	295 MWh/a	Prix de l'énergie: sans réseau	17 ct/kWh
Heures de marche pleines:	1'700 h/a	Prix de l'énergie: avec réseau	..... ct/kWh
Coût de l'installation:	..... Fr./kW		
Coût du réseau:	..... Fr./m'		

Mode de facturation du réseau	
Prix de l'énergie:	..... ct/kWh
Taxe de base:	..... Fr./kW par an
Taxe de raccordement forfaitaire ..... Fr./kW	

Autres documents	
<input type="checkbox"/> Schéma de la chaudière	Données sur: <input type="checkbox"/> Etudes préliminaires
<input type="checkbox"/> Disposition de la chaufferie/locaux	<input type="checkbox"/> Avant-projet
<input type="checkbox"/> Schéma du réseau	<input type="checkbox"/> Projet
<input type="checkbox"/> Contrôle OPair	<input type="checkbox"/> Exécution, direction technique des travaux
	<input type="checkbox"/> Mise en service et réception

**Particularités**

- installation à bois manuelle, allumage automatique, échangeur de chaleur supplémentaire dans les gaz de fumée, accumulateur avec ballon ECS
- en été le ballon est chargé par une pompe à chaleur air/eau.

Vue d'ensemble du réseau de chauffage à distance des écoles

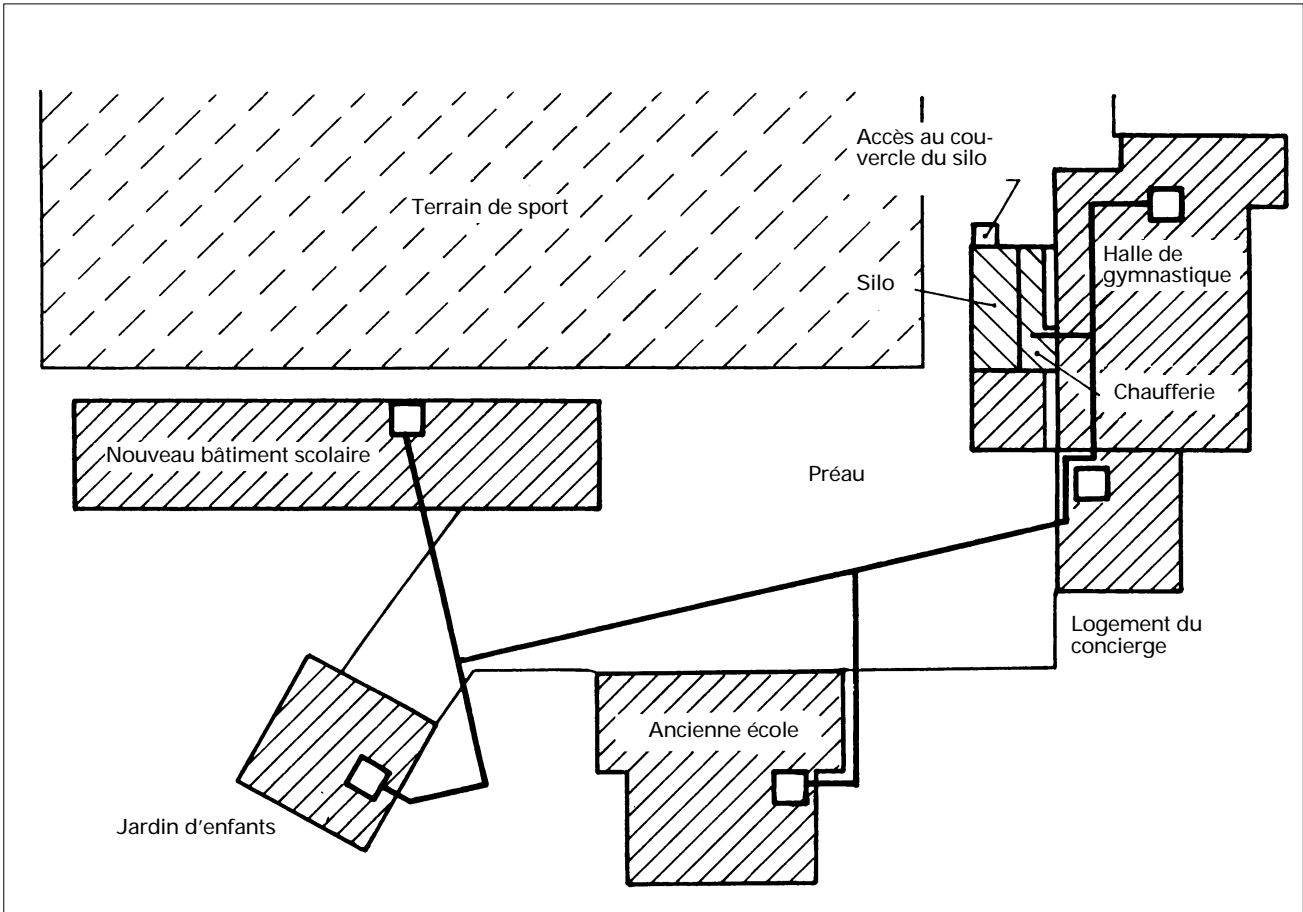
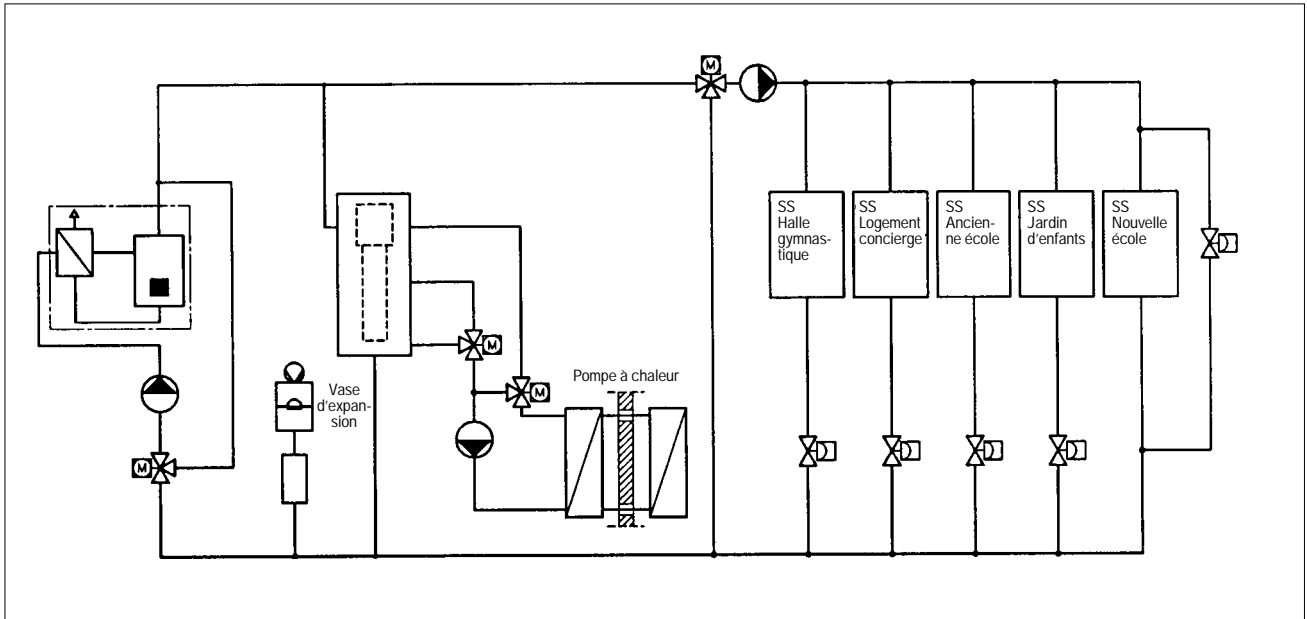


Schéma hydraulique



Exemple 4: Bois de forêt et restes de transformation, 6,6 MW, monovalence, plusieurs chaudières, réseau de chaleur, condensation des gaz de fumée

Fiche signalétique

**Objet**

Emplacement: Appelbaum a A Altitude au-dessus du niveau de la mer: 493 m

But:  Chauffage des locaux  Eau chaude sanitaire  Chaleur industrielle

Usagers:  Ecole  Habitation individ.  Habitation plurifamiliale

Indice énergétique: ..... MJ/m<sup>2</sup>/a ..... Surface de référence SRE ..... m<sup>2</sup>

Besoins en puissance thermique: Extension initiale: 6.600 kW Extension finale: ..... kW

Besoins en énergie thermique: Extension initiale: 16.000 MWh/a Extension finale: ..... MWh/a

Production de chaleur: Chaudière à bois 1: 2.400 kW Chaudière à bois 2: 2.400 kW Chaudière à bois 3: 1.200 kW

Chaudière à mazout: ..... kW Chaudière à gaz: ..... kW

Réseau de chauffage à distance: Puissance: 6.600 kW Longueur du tracé: 4.900 m

**Combustible**

Approvisionnement:  Achat de bois énergie  Propre fourniture (scierie par. ex.), désignation exacte: .....  Combinaison d'achat et d'approvisionnement propre: .....% d'approvisionnement propre

Plaquettes forestières  Sous-produits de transformation  .....   
 ..... % directement de la forêt au silo 33 % scierie   
 ..... % indirectement (stock interméd.) ..... % menuiserie   
 ..... % mixte (direct et indirect) ..... % charpenterie   
 ..... % fabrication de panneaux de particules

Assortiment:  Bois feuillus Teneur en eau:  10 – 25 %   
 Bois résineux et feuillus tendres  25 – 40 %   
 Écorces  40 – 50 %   
 Sous-produits du bois  50 – 60 %   
 > 60 %

Facturation  par m<sup>3</sup> PI Prix: 35 Fr./m<sup>3</sup> PI Pour combustible: ..... à x = .....%   
 par kWh ..... Fr./kWh   
 par t<sub>atro</sub> ..... Fr./t<sub>atro</sub>

**Chaudière**

Type de chaudière:  Foyer à poussée inférieure  Foyer à grille mobile  .....

Régulation  Puissance  à un niveau 100%  Combustion  Régulation de la température   
 sur plusieurs niveaux  Régulation lambda   
 (p. ex. 100/80/60%)  Régulation CO/lambda   
 en continu (p. ex. 100%-30%)  Autre: .....   
 autre: .....

Epurateur des gaz de fumée:  Cyclone  Electrofiltre  Filtre textile   
 Filtre  SCR  SNCR   
 DENOX

**Silo**

Volume brut: 1.300 m<sup>3</sup> Volume net: 980 m<sup>3</sup>

Système de chargement:  Convoyeur  Répartiteur silo  Pompe  Autre: .....

Système d'extraction:  Raclor de fond  Extracteur central  Autres: .....

Autonomie:  < 1 semaine  1 – 2 semaines  2 – 4 semaines   
 (pendant la saison la plus froide)  4 – 8 semaines  > 8 semaines

Rotation du volume net du silo: 16 nombre de rotations du volume net par an

**Données d'exploitation**

Heures de pleine puissance: Au bois: 2.200 h/a Au mazout: ..... h/a

Consommation annuelle: Bois  16.000 m<sup>3</sup> PI/an  ..... t<sub>atro</sub>/a  16.000 MWh/a à η<sub>a</sub> = 90 %   
 Mazout  ..... l/a  ..... t/a

Consommation d'électricité pour le fonctionnement du chauffage au bois: 150.000 kWh/a

Chaleur utile: 14.500 MWh/a

Investissements	Investissement	Durée	Annuité	Amortissement	Entretien & Réparations	Coûts de E & R
Construction chaufferie:	1'370'000 Fr.	50 an	5.48 %	75'072 Fr/a	1.0 %	18'100 Fr/a
Construction silo (y c. accès):	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
Extracteur de silo:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
Construction citerne:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr/a	..... %	..... Fr/a
Instal. sanitaires et électriques:	170'000 Fr.	25 an	7.10 %	8'570 Fr/a	1.5 %	1'800 Fr/a
Chaudière, y c. raccordement au collecteur:	1'300'000 Fr.	23 an	7.48 %	97'260 Fr/a	3.0 %	39'500 Fr/a
Cheminée:	730'000 Fr.	20 an	7.96 %	58'110 Fr/a	2.8 %	20'150 Fr/a
Déchiqueteur:	480'000 Fr.	25 an	7.10 %	31'920 Fr/a	1.0 %	4'800 Fr/a
Réseau de chaleur:	4'060'000 Fr.	27 an	6.94 %	291'720 Fr/a	0.94 %	38'100 Fr/a
Honoraires de planification:	1'770'000 Fr.	25 an	7.10 %	90'110 Fr/a		
Subventions:						
<input checked="" type="checkbox"/> Confédération	1'070'000 Fr.	25 an	7.10 %	76'680 Fr/a		
<input type="checkbox"/> Canton	150'000 Fr.	25 an	7.10 %	16'610 Fr/a		
<input type="checkbox"/> Raccordement	2'270'000 Fr.	27 an	7.10 %	167'920 Fr/a		

Mesures : projet P+D.

Coûts annuels (sans renchérissement)			
Amortissements (Cf. investissements)			Total 381'560 Fr/a
Coûts du combustible:	Bois	360'000 Fr/a	
	Electricité	27'000 Fr/a	
	Mazout	..... Fr/a	Total 587'020 Fr/a
Coûts entretien et réparations	Personnel, service	116'370 Fr/a	
	Ramoneur, mesures	15'000 Fr/a	Total 131'370 Fr/a
Frais divers	Administration	..... Fr/a	
	Assurances, impôts	..... Fr/a	Total ..... Fr/a
Coûts annuels totaux			1'105'710 Fr/a

Caractéristiques principales (résumé)			
Chaleur utile:	14'500 MWh/a	Prix de l'énergie: sans réseau	5.7 ct/kWh
Heures de marche pleines:	7'200 h/a	Prix de l'énergie: avec réseau	7.6 ct/kWh
Coût de l'installation:	1'410 Fr./kW		
Coût du réseau:	230 Fr./m'		

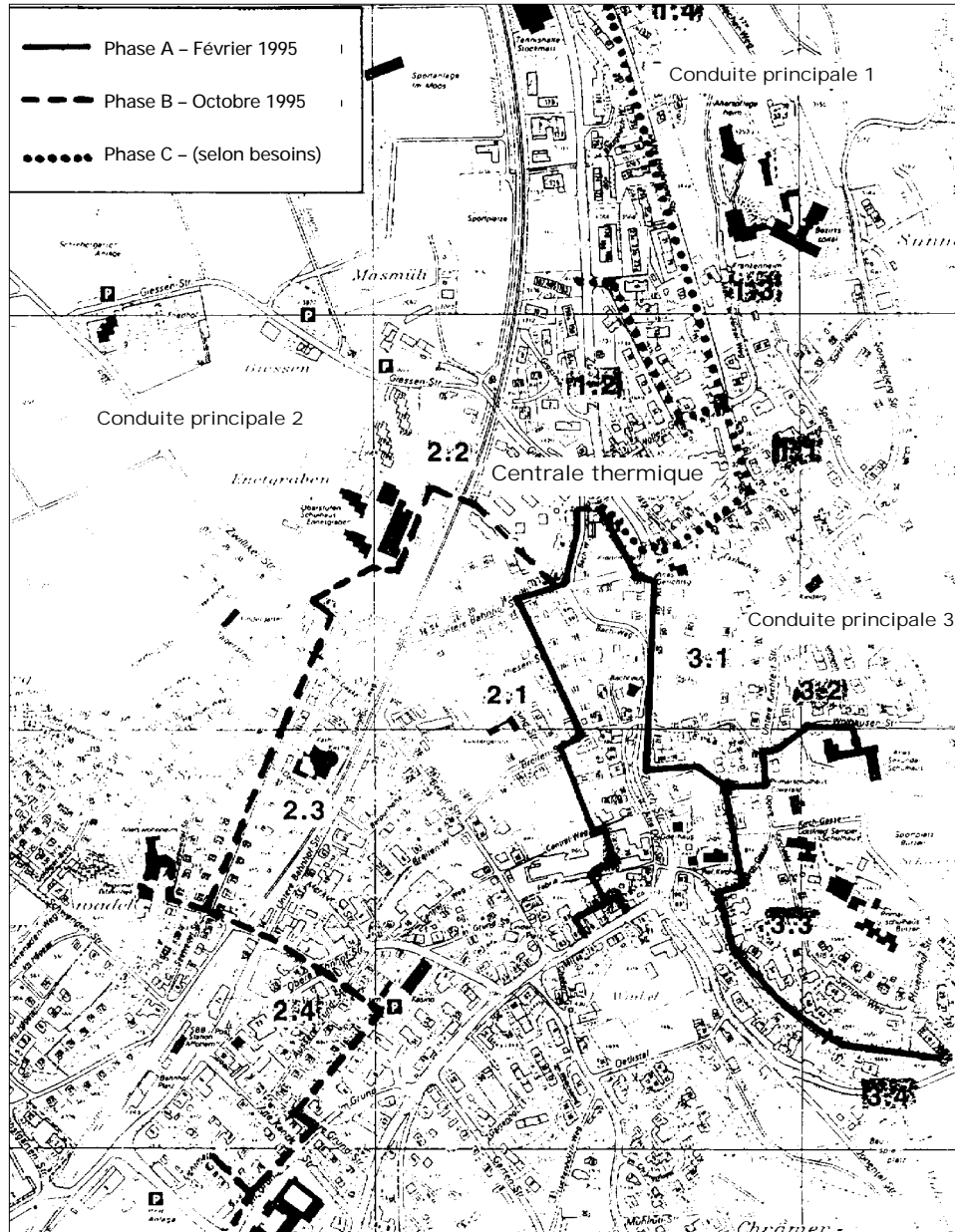
Mode de facturation du réseau	
Prix de l'énergie:	6.3 ct/kWh
Taxe de base:	30 Fr./kW par an
	Taxe de raccordement forfaitaire 350 Fr./kW

Autres documents	
<input type="checkbox"/> Schéma de la chaudière	Données sur: <input type="checkbox"/> Etudes préliminaires
<input type="checkbox"/> Disposition de la chaufferie/locaux	<input type="checkbox"/> Avant-projet
<input type="checkbox"/> Schéma du réseau	<input type="checkbox"/> Projet
<input type="checkbox"/> Contrôle OPair	<input type="checkbox"/> Exécution, direction technique des travaux
	<input type="checkbox"/> Mise en service et réception

Particularités
- installation avec condensation des gaz de fumée
- 2 ans après la mise en service le décompte se fera sur la base du compteur de chaleur.



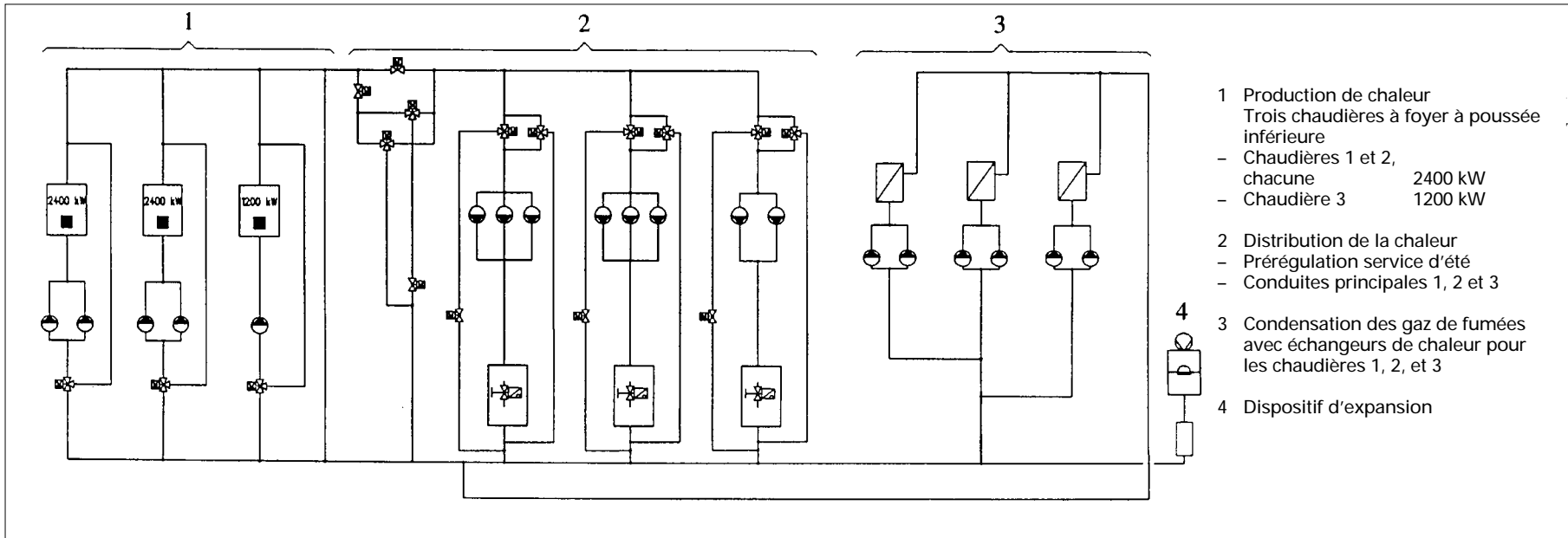
## chauffage à distance d'Affoltern a.A



*Pose des conduites dans la fouille*



*Isolation subséquente des joints soudés sur le chantier*



*Amenée des éléments de la chaudière dans la chaufferie à l'aide d'une grue sur pneus*



*Foyer à poussée inférieure dans la centrale thermique (montage)*

Exemple 5: Bois de forêt, 1,4 MW, monovalence, plusieurs chaudières, réseau de chaleur  
Fiche signalétique

**Objet**

Emplacement: Linthal Altitude au-dessus du niveau de la mer: 650 m

But:  Chauffage des locaux  Eau chaude sanitaire  Chaleur industrielle

Usagers: + salle gym  Ecole  Habitation individ.  Habitation plurifamiliale

+ EMS Indice énergétique: ..... MJ/m<sup>2</sup>/a ..... Surface de référence SRE ..... m<sup>2</sup>

Besoins en puissance thermique: Extension initiale: 995 kW Extension finale: 1'400 kW

Besoins en énergie thermique: Extension initiale: ..... MWh/a Extension finale: ..... MWh/a

Production de chaleur: Chaudière à bois 1: 1'000 kW Chaudière à bois 2: 400 kW Chaudière à bois 3: ..... kW

Chaudière à mazout: ..... kW Chaudière à gaz: ..... kW

Réseau de chauffage à distance: Puissance: ..... kW Longueur du tracé: ..... m

**Combustible**

Approvisionnement:  Achat de bois énergie  Propre fourniture (scierie par. ex.), désignation exacte: .....  Combinaison d'achat et d'approvisionnement propre: ..... % d'approvisionnement propre

Plaquettes forestières  Sous-produits de transformation  ..... % directement de la forêt au silo ..... % scierie  
 ..... % indirectement (stock interméd.) ..... % menuiserie  
 ..... % mixte (direct et indirect) ..... % charpenterie  
 ..... % fabrication de panneaux de particules

Assortiment:  Bois feuillus Teneur en eau:  10 - 25 %  
 Bois résineux et feuillus tendres  25 - 40 %  
 Écorces  40 - 50 %  
 Sous-produits du bois  50 - 60 %  
 > 60 %

Facturation  par m<sup>3</sup> PI Prix: ..... Fr./m<sup>3</sup> PI Pour combustible: ..... à x = ..... %  
 par kWh 0.11 Fr./kWh  
 par t<sub>atro</sub> ..... Fr./t<sub>atro</sub>

**Chaudière**

Type de chaudière:  Foyer à poussée inférieure  Foyer à grille mobile  .....

Régulation  Puissance  à un niveau 100%  Combustion  Régulation de la température  
 sur plusieurs niveaux (p. ex. 100/80/60%)  Régulation lambda  
 en continu (p. ex. 100%-30%)  Régulation CO/lambda  
 autre: .....  Autre: .....

Epuration des gaz de fumée:  Cyclone  Electrofiltre  Filtre textile  
 Filtre  SCR  SNCR  
 DENOX

**Silo**

Volume brut: 2'560 m<sup>3</sup> Volume net: 2'000 m<sup>3</sup>

Système de chargement:  Convoyeur  Répartiteur silo  Pompe  Autre: grue

Système d'extraction:  Raclor de fond  Extracteur central  Autres: grue

Autonomie:  < 1 semaine  1 - 2 semaines  2 - 4 semaines  
 (pendant la saison la plus froide)  4 - 8 semaines  > 8 semaines

Rotation du volume net du silo: 1-2 nombre de rotations du volume net par an

**Données d'exploitation**

Heures de pleine puissance: Au bois: ..... h/a Au mazout: ..... h/a

Consommation annuelle: Bois  2'500 m<sup>3</sup> PI/an  ..... t<sub>atro</sub>/a  ..... MWh/a à η<sub>a</sub> = ..... %  
 Mazout  ..... l/a  ..... t/a

Consommation d'électricité pour le fonctionnement du chauffage au bois: ..... KWh/a

Chaleur utile: ..... MWh/a

Investissements	Investissement	Durée	Annuité	Amortissement	Entretien & Réparations	Coûts de E & R
Construction chaufferie:	275'093 Fr.	60 an	5.28 %	14'581 Fr./a	0.75 %	897 Fr./a
Construction silo (y c. accès):	345'009 Fr.	60 an	5.28 %	18'217 Fr./a	0.75 %	862 Fr./a
Extracteur de silo:	77'500 Fr.	20 an	8.02 %	6'215 Fr./a	2. - %	1'516 Fr./a
Construction citerne:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Instal. sanitaires et électriques:	77'705 Fr.	12 an	11.28 %	8'769 Fr./a	2.5 %	1'930 Fr./a
Chaudière, y c. raccordement au collecteur:	234'004 Fr.	15 an	9.63 %	27'574 Fr./a	1. - %	2'340 Fr./a
Cheminée:	22'449 Fr.	20 an	8.02 %	1'837 Fr./a	..... %	..... Fr./a
Déchetiseur:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Réseau de chaleur:	409'265 Fr.	30 an	6.51 %	26'643 Fr./a	1. - %	4'092 Fr./a
Honoraires de planification:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Subventions: <input checked="" type="checkbox"/> Confédération	125'600 Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
<input type="checkbox"/> Canton	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
<input type="checkbox"/> .....	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a

Coûts annuels (sans renchérissement)			Total
Amortissements (Cf. investissements)			99'676 Fr./a
Coûts du combustible:	Bois	100'000 Fr./a	
	Electricité	..... Fr./a	
	Mazout	..... Fr./a	
	Total		100'000 Fr./a
Coûts entretien et réparations	Personnel, service	4'000 Fr./a	
	Ramoneur, mesures	1'000 Fr./a	
	Total		5'000 Fr./a
Frais divers	Administration	1'000 Fr./a	
	Assurances, impôts	2'000 Fr./a	
	Total		3'000 Fr./a
Coûts annuels totaux			..... Fr./a

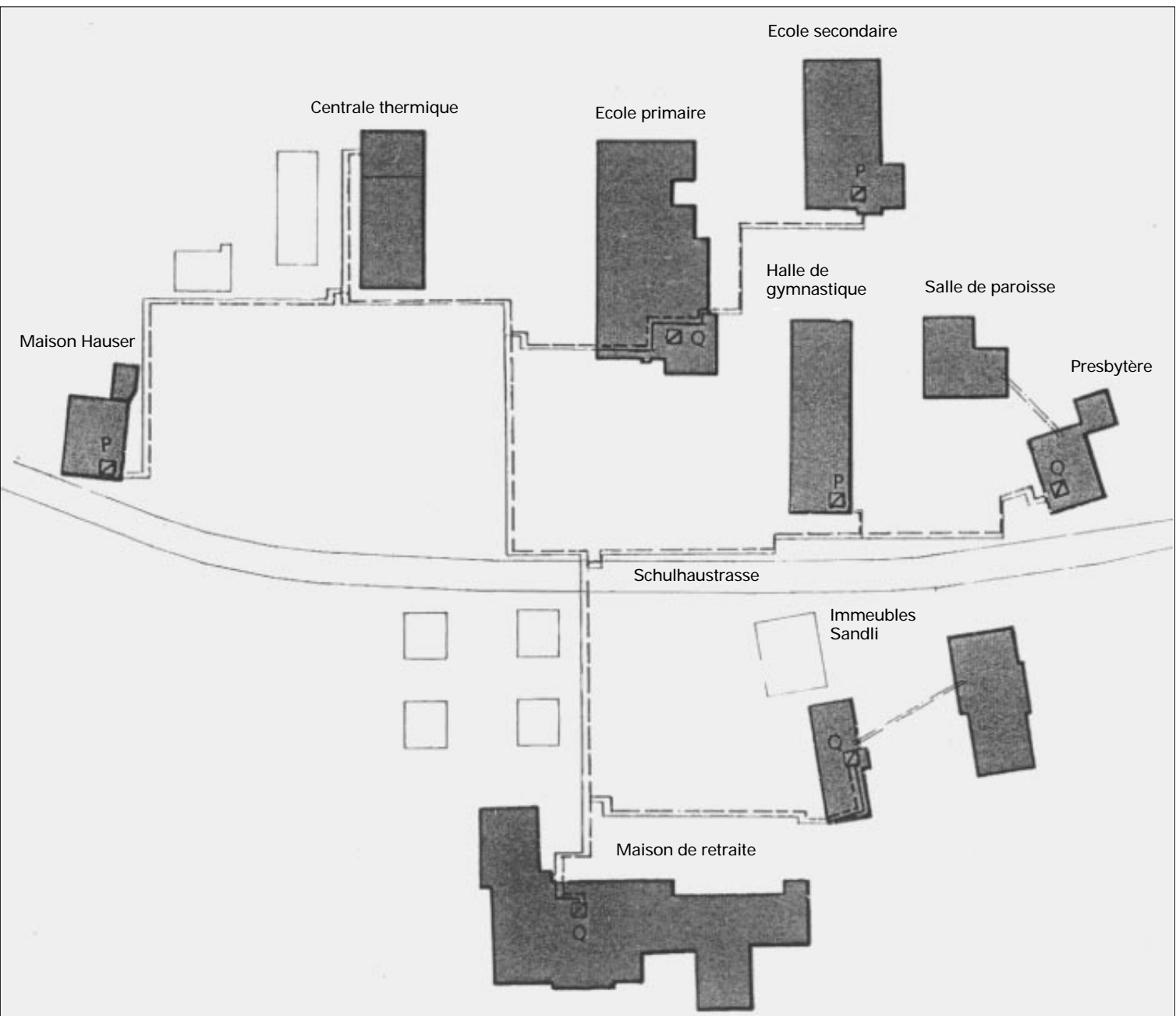
Caractéristiques principales (résumé)			
Chaleur utile:	..... MWh/a	Prix de l'énergie: sans réseau	..... ct/kWh
Heures de marche pleines:	..... h/a	Prix de l'énergie: avec réseau	..... ct/kWh
Coût de l'installation:	1'218 Fr./kW		
Coût du réseau:	889 Fr./m'		

Mode de facturation du réseau	
Prix de l'énergie:	11.5 ct/kWh
Taxe de base:	..... Fr./kW par an
Taxe de raccordement forfaitaire	..... Fr./kW

Autres documents	
<input type="checkbox"/> Schéma de la chaudière	Données sur: <input type="checkbox"/> Etudes préliminaires
<input type="checkbox"/> Disposition de la chaufferie/locaux	<input type="checkbox"/> Avant-projet
<input type="checkbox"/> Schéma du réseau	<input type="checkbox"/> Projet
<input type="checkbox"/> Contrôle OPair	<input type="checkbox"/> Exécution, direction technique des travaux
	<input type="checkbox"/> Mise en service et réception

Particularités
- Investissement Confédération Fr. 349'000.-
- Mesure OPair : 1.2.1995

Vue d'ensemble du réseau de chauffage à distance





Exemple 6: Bois de forêt, 800 kW, bivalence, plusieurs chaudières, réseau de chaleur  
Fiche signalétique

**Objet**

Emplacement: Neplentz, 24 Altitude au-dessus du niveau de la mer: .....m

But:  Chauffage des locaux  Eau chaude sanitaire  Chaleur industrielle  piscine

Usagers: ..... Ecole ..... Habitation individ. ..... Habitation plurifamiliale

Indice énergétique: ..... MJ/m<sup>2</sup>/a ..... Surface de référence SRE .....m<sup>2</sup>

Besoins en puissance thermique: Extension initiale: 800 kW Extension finale: 800 kW

Besoins en énergie thermique: Extension initiale: 1'500 MWh/a Extension finale: 2'000 MWh/a

Production de chaleur: Chaudière à bois 1: 400 kW Chaudière à bois 2: 400 kW Chaudière à bois 3: .....kW

Chaudière à mazout: 312 kW Chaudière à gaz: 312 kW .....kW

Réseau de chauffage à distance: Puissance: 500 kW Longueur du tracé: 600 m

**Combustible**

Approvisionnement:  Achat de bois énergie  
 Propre fourniture (scierie par. ex.), désignation exacte: .....  
 Combinaison d'achat et d'approvisionnement propre: .....% d'approvisionnement propre

Plaquettes forestières  Sous-produits de transformation  .....  
100 % directement de la forêt au silo ..... % scierie  
 ..... % indirectement (stock interméd.) ..... % menuiserie  
 ..... % mixte (direct et indirect) ..... % charpenterie  
 ..... % fabrication de panneaux de particules

Assortiment:  Bois feuillus Teneur en eau:  10 - 25 %  
 Bois résineux et feuillus tendres  25 - 40 %  
 Écorces  40 - 50 %  
 Sous-produits du bois  50 - 60 %  
 > 60 %

Facturation  par m<sup>3</sup> Pl Prix: ..... Fr./m<sup>3</sup> Pl Pour combustible: ..... à x = .....%  
 par kWh 0,0437 Fr./kWh  
 par t<sub>atro</sub> ..... Fr./t<sub>atro</sub>

**Chaudière**

Type de chaudière:  Foyer à poussée inférieure  Foyer à grille mobile  .....

Régulation:  Puissance  à un niveau 100%  Combustion  Régulation de la température  
 sur plusieurs niveaux (p. ex. 100/80/60%)  Régulation lambda  
 en continu (p. ex. 100%-30%)  Régulation CO/lambda  
 autre: .....  Autre: .....

Epuration des gaz de fumée:  Cyclone  Electrofiltre  Filtre textile  
 Filtre  SCR  SNCR  
 DENOX

**Silo**

Volume brut: 380 m<sup>3</sup> Volume net: 310 m<sup>3</sup>

Système de chargement:  Convoyeur  Répartiteur silo  Pompe  Autre: .....

Système d'extraction:  Raclor de fond  Extracteur central  Autres: .....

Autonomie:  < 1 semaine  1 - 2 semaines  2 - 4 semaines  
 4 - 8 semaines  > 8 semaines

Rotation du volume net du silo: 7-8 nombre de rotations du volume net par an

**Données d'exploitation**

Heures de pleine puissance: Au bois: ..... h/a Au mazout: ..... h/a

Consommation annuelle: Bois 3'100 m<sup>3</sup> Pl/an  ..... t<sub>atro</sub>/a 1'570 MWh/a à η<sub>a</sub> = 89 %  
 Mazout 30'000 l/a  ..... t/a

Consommation d'électricité pour le fonctionnement du chauffage au bois: 10'000 kWh/a

Chaleur utile: ~1'300 MWh/a

Investissements	Investissement	Durée	Annuité	Amortissement	Entretien & Réparations	Coûts de E & R
Construction chaufferie:	100'000 Fr.	50 an	5.91 %	5'910 Fr/a	%	Fr./a
Construction silo (y c. accès):	250'000 Fr.	50 an	5.81 %	14'750 Fr/a	%	Fr./a
Extracteur de silo:	10'000 Fr.	25 an	7.45 %	5'960 Fr/a	%	Fr./a
Construction citerne:	exist. Fr.				%	Fr./a
Instal. sanitaires et électriques:	40'000 Fr.	70 an	8.37 %	3'350 Fr/a	%	Fr./a
Chaudière, y c. raccordement au collecteur:	750'000 Fr.	25 an	7.45 %	11'180 Fr/a	%	Fr./a
Cheminée:	18'000 Fr.	25 an	7.45 %	1'340 Fr/a	%	Fr./a
Déchetiseur:	Fr.	an	%	1 Fr/a	%	Fr./a
Réseau de chaleur:	322'000 Fr.	30 an	6.87 %	18'460 Fr/a	%	Fr./a
Honoraires de planification:	110'000 Fr.	25 an	7.45 %	8'960 Fr/a	%	Fr./a
Subventions:						
<input checked="" type="checkbox"/> Confédération	110'000 Fr.	25 an	7.45 %	8'960 Fr/a		
<input type="checkbox"/> Canton	Fr.	an	%	Fr/a		
<input type="checkbox"/> .....	Fr.	an	%	Fr/a		

Coûts annuels (sans renchérissement)			Total
Amortissements (Cf. investissements)		57'400 Fr/a	91'170 Fr/a
Coûts du combustible:	Bois	2'100 Fr/a	67'000 Fr/a
	Electricité	7'500 Fr/a	
	Mazout	12'000 Fr/a	
Coûts entretien et réparations	Personnel, service	3'000 Fr/a	15'000 Fr/a
	Ramoneur, mesures	1'500 Fr/a	
Frais divers	Administration	1'500 Fr/a	3'000 Fr/a
	Assurances, impôts	1'500 Fr/a	
Coûts annuels totaux			176'170 Fr/a

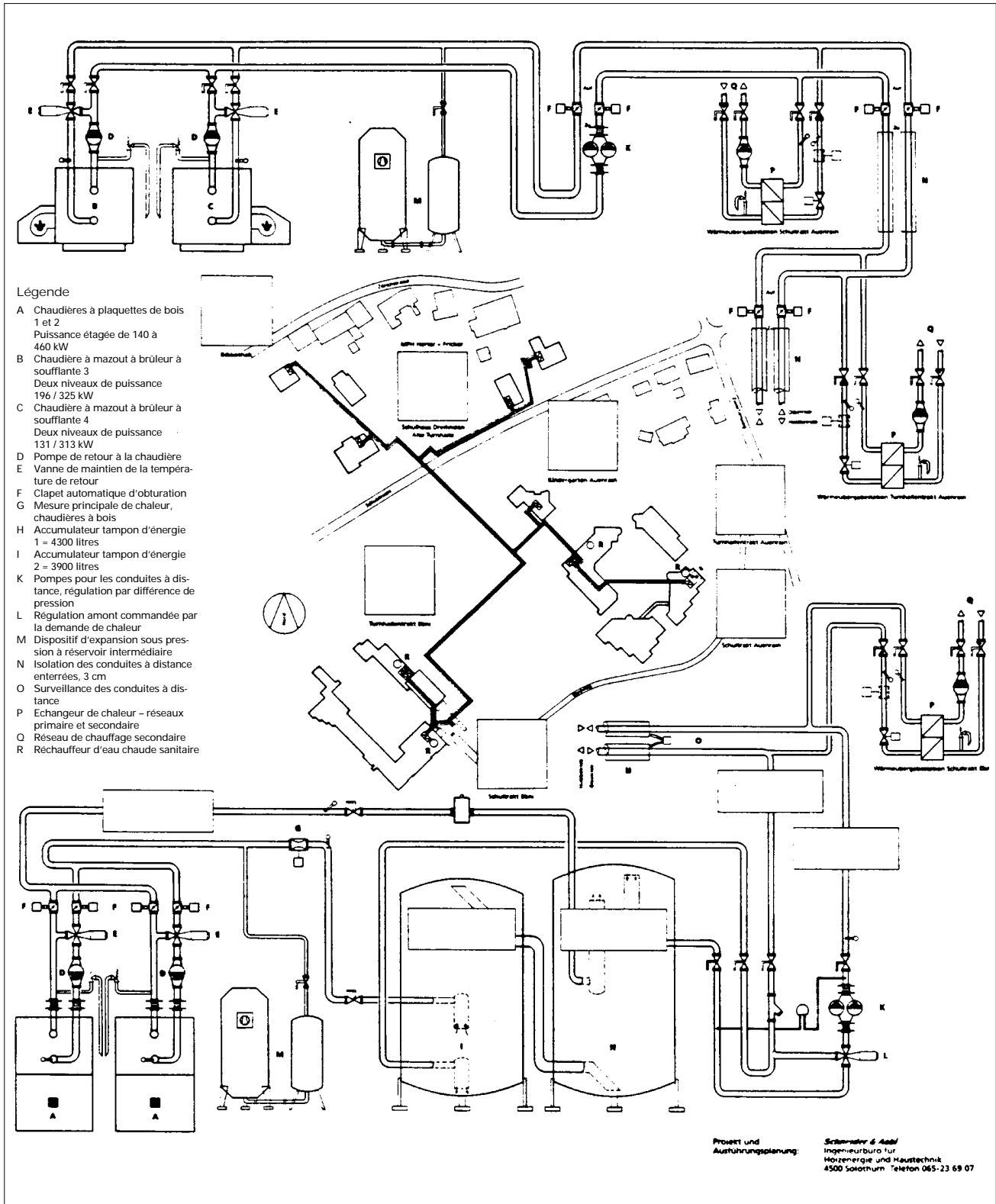
Caractéristiques principales (résumé)			
Chaleur utile:	1'300 MWh/a	Prix de l'énergie: sans réseau	11.22 ct/kWh
Heures de marche pleines:	..... h/a	Prix de l'énergie: avec réseau	13.55 ct/kWh
Coût de l'installation:	1'400 Fr./kW		
Coût du réseau:	620 Fr./m'		

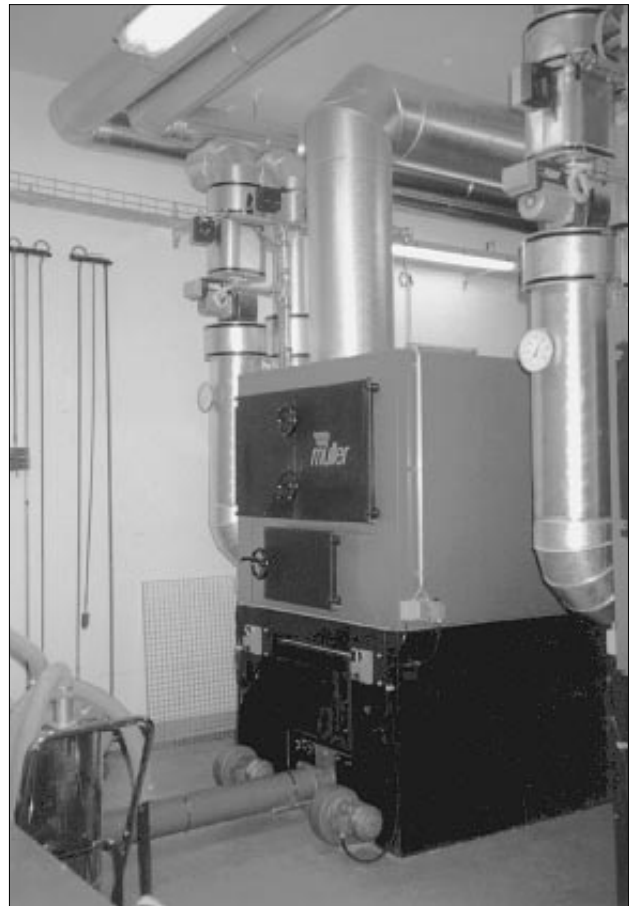
Mode de facturation du réseau	
Prix de l'énergie:	6.5 ct/kWh
Taxe de base:	..... Fr./kW par an
Taxe de raccordement forfaitaire	..... Fr./kW

Autres documents	
<input type="checkbox"/> Schéma de la chaudière	Données sur: <input type="checkbox"/> Etudes préliminaires
<input type="checkbox"/> Disposition de la chaufferie/locaux	<input type="checkbox"/> Avant-projet
<input type="checkbox"/> Schéma du réseau	<input type="checkbox"/> Projet
<input type="checkbox"/> Contrôle OPair	<input type="checkbox"/> Exécution, direction technique des travaux
	<input type="checkbox"/> Mise en service et réception

Particularités
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pré-régulation du réseau selon les besoins des sous-stations</li> <li>- descente automatique des chaudières et cyclons</li> <li>- lift hydraulique pour les conteneurs à cendres</li> <li>- valorisation des cendres sur terrain agricole</li> </ul>







## A2 Limites fixées par l'Opair pour les bois de chauffage

	Puissance calorifique					
	plus de 20 kW jusqu'à 70 kW	de 70kW à 200 kW	de 200 kW à 500 kW	de 500 kW à 1 MW	de 1 MW à 5 MW	plus de 5 MW
<i>Bois de chauffage</i>						
• Grandeur de référence: les valeurs limites se rapportent à une teneur en oxygène des effluents gazeux de.....% vol	13	13	13	13	11	11
• Particules solides au total ....mg/m <sup>3</sup>	–	150	150	150	150	50
• Monoxyde de carbone (CO) - pour le bois de chauffage, selon l'annexe 5, ch. 3, 1 <sup>er</sup> al., lettres a et b .....mg/m <sup>3</sup>	4000 <sup>1)</sup>	2000	1000	500	250	250
- pour le bois de chauffage, selon l'annexe 5, ch. 3, 1 <sup>er</sup> al., lettre c .....mg/m <sup>3</sup>	1000	1000	800	500	250	250
• Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ), exprimés en dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ) .....mg/m <sup>3</sup>	2)	2)	2)	2)	2)	2)
• Substances organiques sous forme gazeuse, exprimées en carbone total (C) .....mg/m <sup>3</sup>	–	–	–	–	50	50
• Ammoniac et composés de l'ammonium, exprimés en ammoniac <sup>3)</sup> .....mg/m <sup>3</sup>	–	–	–	–	30	30
<i>Remarques :</i>						
– Un tiret dans le tableau signifie qu'aucune limitation n'est prescrite, ni dans l'annexe 3, ni dans l'annexe 1.						
1) Non applicable aux potagers de chauffage central.						
2) Voir la valeur limite pour l'oxyde d'azote, annexe 1, chiffre 6.						
3) Cette limite d'émission n'a de sens que pour les installations de combustion équipées d'un dispositif de dénitrification.						

<sup>2</sup> Les limitations d'émissions pour les composés du chlore selon l'annexe 1, chiffre 6, ainsi que celles pour les substances organiques au sens de l'annexe 1, chiffre 7, ne sont pas applicables.

### A3 Calcul du rendement annuel $\eta_a$

Le mode de calcul exposé ci-après permet de déterminer le rendement annuel  $\eta_a$  avec une précision de l'ordre de  $\pm 5\%$ . Ce dernier dépend des pertes de l'installation de chauffage, du taux d'utilisation  $\alpha$  et de la puissance moyenne  $P$ . Le calcul part d'un chauffage dont le rendement de la chaudière  $\eta_c$  repose sur des paramètres d'exploitation moyens. Ce rendement  $\eta_c$  est adapté par des facteurs de correction pour les chauffages qui ont d'autres paramètres d'exploitation. La charge  $\alpha$ , le rendement de la chaudière  $\eta_c$  et la puissance moyenne  $P$  permet de déterminer le rendement annuel  $\eta_a$ .

On admet que le rendement de la chaudière  $\eta_c$  est constant sur toute la plage de puissance. La part relativement plus élevée des pertes de rayonnement à puissance partielle est compensée par la température plus basse des gaz de fumées.

Taux d'utilisation  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\text{(durée de service du chauffage)}}{\text{(durée d'enclenchement du chauffage)}}$$

La durée d'enclenchement comprend la période comprise entre l'allumage du chauffage et son arrêt; elle se compose de la durée de service et de la durée d'attente. La durée de service est généralement saisie à l'aide d'un compteur d'heures de service, ou par le biais de la commande programmable à mémoire.

*Rendement de la chaudière  $\eta_c$*

Le rendement de la chaudière  $\eta_c$  est de 83% pour un chauffage automatique à plaquettes de bois dont les paramètres d'exploitation sont les suivants :

Pertes de rayonnement $q_R$	=	1,5%
Humidité du bois $u$	=	60%
Température des gaz de fumées $T_{GF}$	=	200°C
Excédent d'air $\lambda^*$	=	2

\* L'excédent d'air  $\lambda$  peut être calculé à partir du procès-verbal des mesures périodiques selon l'OPair ( $CO_2 - Vol.\%$ )  $\lambda = 20,4/CO_2$ .

La différence par rapport aux pertes de rayonnement admises  $q_R$  de 1,5% peut être directement ajoutée

ou soustraite au rendement de la chaudière  $\eta_c$ . Si les pertes de rayonnement ne sont pas connues, elles peuvent être déterminées approximativement comme la moitié des pertes d'attente  $q_A$ . Les facteurs de correction suivants s'appliquent aux autres paramètres :

pro $\Delta u$	=	bois plus humide de 10%
	→	rendement de la chaudière $\eta_c$ réduit de 0,4%
pro $\Delta \lambda$	=	excédent d'air supérieur de 0,1
	→	rendement de la chaudière $\eta_c$ réduit de 0,6%
pro $\Delta T_{GF}$	=	température des gaz de fumées plus élevée de 10°C
	→	rendement de la chaudière $\eta_c$ réduit de 1,0%

Ces facteurs de correction s'appliquent aussi en sens inverse.

*Puissance moyenne calculée  $P$*

La puissance moyenne à laquelle fonctionne le chauffage pendant la durée moyenne de service peut se calculer comme suit :

$$P = \frac{(\Delta cc)}{\text{(Puissance nominale x } t_s)} \times 100\% \text{ [%]}$$

ou :

$\Delta cc$  = valeur finale du compteur de chaleur - valeur initiale

$t_s$  = durée de service du chauffage [h]

*Perte en attente  $q_A$*

Une installation moderne de taille moyenne connaît des pertes d'attente de l'ordre de 3%. Les valeurs indicatives pour les installations d'autres grandeurs sont les suivantes :

> 300 kW :	$q_A = 1\% - 3\%$ (1,5% - 4%)
< 300 kW :	$q_A = 3\% - 5\%$ (4% - 6%)

Les valeurs entre parenthèses s'appliquent aux installations anciennes.

*Rendement annuel  $\eta_a$*

Le taux d'utilisation  $\alpha$ , le rendement de la chaudière  $\eta_c$ , les pertes d'attente  $q_A$  et la puissance moyenne  $P$

## Exemple

*Données de départ*

Compteur de chaleur:  
Différence lue sur le compteur de chaleur  $\Delta_{cc}$  =  
99 764 kWh pendant la période de chauffage

## Chauffage:

Puissance nominale 70 kW → installation de petite  
taille →

Perte en attente  $q_A$  = 4 %  
Perte de rayonnement  $q_R$  = 2 %  
Température des gaz  
de fumées  $T_{GF}$  = 180 °C  
Excédent d'air  $\lambda$  = 1,8

*Calcul du taux d'utilisation  $\alpha$ :*

Période de chauffage:  
Du 15 septembre au 4 avril = 202 jours = 4848 h

$$\text{Taux } \alpha = \frac{2036 \text{ h}}{4848 \text{ h}} = 0,42$$

*Calcul du rendement de la chaudière  $\eta_c$ :*

$\eta_c$  admis = 83 %

## Facteurs de correction:

pertes par rayonnement  $q_R$  = - 0,5 %  
humidité du bois  $u$  =  
excédent d'air  $\lambda$  = + 1,2 %  
température des gaz  
de fumées  $T_{GF}$  = + 2,0 %  
Total = + 2,7 %  
=====

Rendement de la chaudière  $\eta_c = 83\% + 2,7\% = 85,7\%$

*Calcul de la puissance moyenne  $P$ :*

Puissance moyenne

$$P = \frac{\Delta_{cc}}{\text{puissance nominale} \times t_s} \times 100\%$$

$$= \frac{99\,764 \text{ kWh}}{70 \text{ kW} \times 2036 \text{ h}} \times 100\%$$

Puissance moyenne = 70 %

*Calcul du rendement annuel  $\eta_a$ :*

Degré du rendement annuel

$$\eta_a = \eta_c \frac{P - (q_A/\alpha)}{P - q_A} \quad [\%]$$

$$\eta_a = 86 \frac{70 - (4/0,42)}{(70 - 4)}$$

Rendement annuel  $\eta_a = 78,8\%$

permettent de calculer le rendement annuel à l'aide  
de la formule suivante :

$$\eta_a = \eta_c \frac{P - (q_A/\alpha)}{P - q_A} \quad [\%]$$

ou :

$\alpha$  = taux d'utilisation [-]

$\eta_c$  = rendement de la chaudière [%]

$q_A$  = pertes en attente [%]

$P$  = puissance moyenne [%]

## A4 Calcul du débit massique d'oxyde d'azote

Le débit massique  $\dot{m}_{\text{NO}_x}$  se calcule comme suit:

$$\dot{m}_{\text{NO}_x} = \frac{\dot{V}_{\text{GF}} \text{NO}_x}{1000} \quad [\text{g/h}]$$

OU:

$V_{\text{GF}}$  = débit volumique des gaz de fumées (secs)  $[\text{m}^3/\text{h}]$  à  $0^\circ\text{C}$  et  $\lambda_{\text{norm}}$

$\text{NO}_x$  = concentration d'oxyde d'azote  $[\text{mg}/\text{m}^3]$  à  $\lambda_{\text{norm}}$  dans les gaz de fumées secs

Le débit volumique des gaz de fumées sec correspond approximativement au débit volumique de l'air de combustion sec. On peut estimer le débit massique des gaz de fumées et le débit massique d'oxyde d'azote à l'aide de la relation entre la puissance du chauffage et le débit massique du bois ainsi que de son pouvoir calorifique:

$$\dot{V}_{\text{gaz de fumées}} = \dot{V}_{\text{air comburant}}$$

$$\dot{V}_{\text{gaz de fumées}} = \dot{m}_{\text{bois}} V_{\text{th}} \lambda_{\text{norm}} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\text{de plus: } \dot{Q} = \dot{m}_{\text{bois}} \text{PCI}$$

d'où:

$$\dot{V}_{\text{gaz de fumée}} = \frac{\dot{Q} V_{\text{th}} \lambda_{\text{norm}} 3.6}{18'500 - 25 u} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

OU:

$\dot{m}_{\text{bois}}$  = débit massique de bois sec en kg/h

$V_{\text{th}}$  = volume théorique d'air comburant par kg de bois sec =  $4,58 \text{ m}^3/\text{kg}$

$\lambda_{\text{norm}}$  = excédent d'air à  $\text{O}_2 \text{ norm}$ ;  
pour  $\text{O}_2 \text{ norm} = 11\% \text{vol.}$ ,  $\lambda_{\text{norm}} = 2,1$

$\dot{Q}$  = puissance du chauffage en MW

PCI = pouvoir calorifique en kJ/kg

$u$  = humidité du bois en %<sub>atro</sub>

### Calcul du débit massique d'oxyde d'azote dans le cas des installations à plusieurs chaudières

L'OPair, annexe 3, ch. 3, prescrit comme suit le calcul du débit massique pour les installations à plusieurs chaudières:

1. Si plusieurs installations de combustion forment ensemble une unité d'exploitation, la puissance calorifique (ann. 1, ch. 24) de l'ensemble (puissance calorifique totale) est déterminante pour la limitation des émissions de chacune des installations.
2. La puissance calorifique totale est la somme des puissances calorifiques de chacune des installations de combustion composant l'unité d'exploitation.
3. Les dispositions des 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> alinéas ne s'appliquent pas:
  - a. Aux installations de combustion individuelles d'une puissance calorifique inférieure ou égale à 1 MW, pour autant qu'une ou plusieurs autres installations composant l'unité d'exploitation soient alimentées avec les mêmes combustibles;
  - b. Aux installations de combustion d'une puissance calorifique inférieure ou égale à 5 MW, pour autant qu'aucune autre installation composant l'unité d'exploitation ne soit alimentée avec le même combustible.

#### Exemple 1

Chaudière à bois 1	1,0 MW
Chaudière à bois 2	1,0 MW
Chaudière à mazout	0,9 MW

Chaque chaudière est évaluée séparément.

#### Exemple 2

Chaudière à bois 1	1,1 MW
Chaudière à bois 2	1,1 MW
Chaudière à mazout	1,5 MW

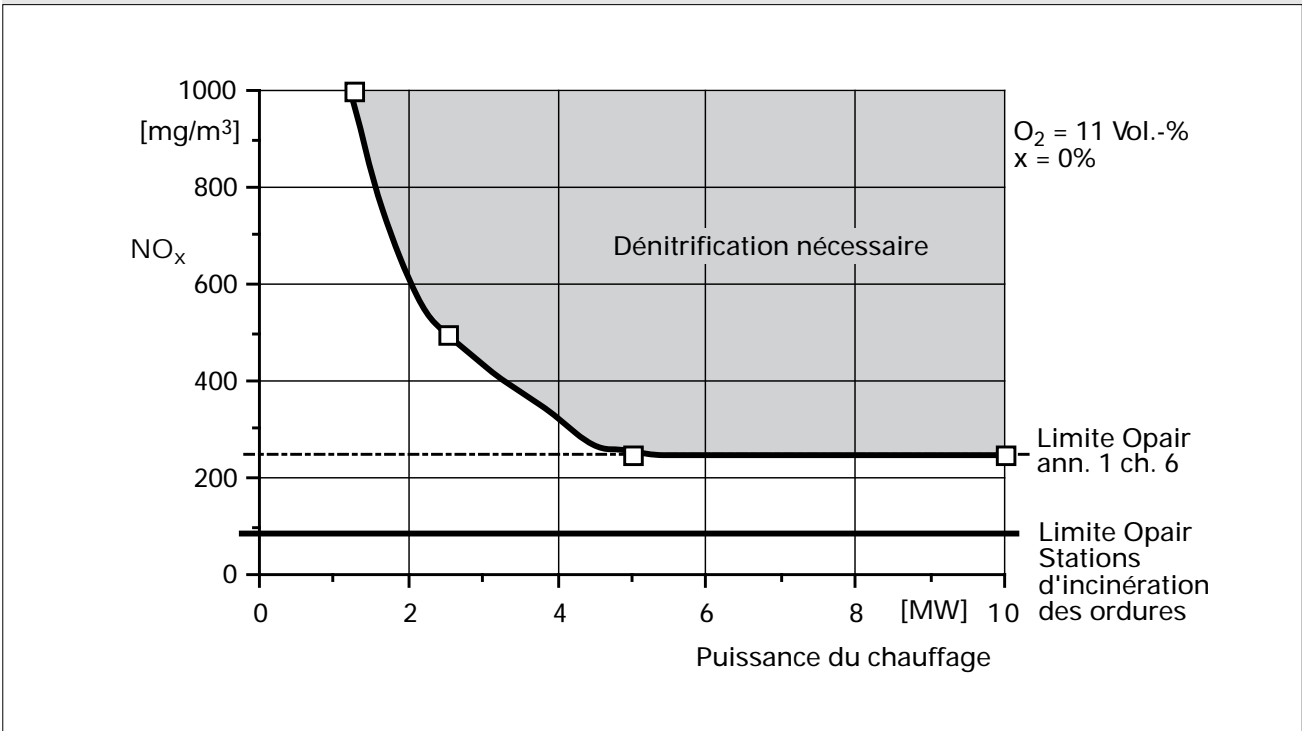
La chaudière à mazout est évaluée séparément. Pour les chaudières à bois, la somme des émissions d'oxyde d'azote et la somme des puissances sont déterminantes.

#### Exemple 3

Chaudière à bois	5,1 MW
Chaudière à mazout	5,1 MW

Les deux chaudières seront évaluées ensemble comme une unité d'exploitation pour le calcul du débit massique d'oxyde d'azote.

Teneur en NO<sub>x</sub> en fonction de la puissance du chauffage en tant que critère des mesures de dénitrification



## A5 Modèles à copier Formule de description d'installation

Objet	
Emplacement: .....	Altitude au-dessus du niveau de la mer: .....m
But: <input type="checkbox"/> Chauffage des locaux <input type="checkbox"/> Eau chaude sanitaire <input type="checkbox"/> Chaleur industrielle	
Usagers: <input type="checkbox"/> Ecole <input type="checkbox"/> Habitation individ. <input type="checkbox"/> Habitation plurifamiliale	
Indice énergétique: .....	MJ/m <sup>2</sup> /a ..... Surface de référence SRE .....m <sup>2</sup>
Besoins en puissance thermique: Extension initiale: .....kW	Extension finale: .....kW
Besoins en énergie thermique: Extension initiale: .....MWh/a	Extension finale: .....MWh/a
Production de chaleur: Chaudière à bois 1: .....kW	Chaudière à bois 2: .....kW Chaudière à bois 3: .....kW
	Chaudière à mazout: .....kW Chaudière à gaz: .....kW
Réseau de chauffage à distance: Puissance: .....kW	Longueur du tracé: .....m

Combustible	
Approvisionnement: <input type="checkbox"/> Achat de bois énergie	<input type="checkbox"/> Propre fourniture (scierie par. ex.), désignation exacte: .....
	<input type="checkbox"/> Combinaison d'achat et d'approvisionnement propre: .....% d'approvisionnement propre
<input type="checkbox"/> Plaquettes forestières	<input type="checkbox"/> Sous-produits de transformation <input type="checkbox"/> .....
..... % directement de la forêt au silo	..... % scierie
..... % indirectement (stock interméd.)	..... % menuiserie
..... % mixte (direct et indirect)	..... % charpenterie
	..... % fabrication de panneaux de particules
Assortiment: <input type="checkbox"/> Bois feuillus	Teneur en eau: <input type="checkbox"/> 10 – 25 %
<input type="checkbox"/> Bois résineux et feuillus tendres	<input type="checkbox"/> 25 – 40 %
<input type="checkbox"/> Écorces	<input type="checkbox"/> 40 – 50 %
<input type="checkbox"/> Sous-produits du bois	<input type="checkbox"/> 50 – 60 %
	<input type="checkbox"/> > 60 %
Facturation: <input type="checkbox"/> par m <sup>3</sup> Pl	Prix: ..... Fr./m <sup>3</sup> Pl
<input type="checkbox"/> par kWh	..... Fr./kWh
<input type="checkbox"/> par t <sub>atro</sub>	..... Fr./t <sub>atro</sub>
	Pour combustible: ..... à x = .....%

Chaudière	
Type de chaudière: <input type="checkbox"/> Foyer à poussée inférieure	<input type="checkbox"/> Foyer à grille mobile <input type="checkbox"/> .....
Régulation: <input type="checkbox"/> Puissance <input type="checkbox"/> à un niveau 100%	<input type="checkbox"/> Combustion <input type="checkbox"/> Régulation de la température
<input type="checkbox"/> sur plusieurs niveaux (p. ex. 100/80/60%)	<input type="checkbox"/> Régulation lambda
<input type="checkbox"/> en continu (p. ex. 100%-30%)	<input type="checkbox"/> Régulation CO/lambda
<input type="checkbox"/> autre: .....	<input type="checkbox"/> Autre: .....
Epuration des gaz de fumée: <input type="checkbox"/> Cyclone	<input type="checkbox"/> Electrofiltre <input type="checkbox"/> Filtre textile
<input type="checkbox"/> Filtre <input type="checkbox"/> DENOX	<input type="checkbox"/> SCR <input type="checkbox"/> SNCR

Silo	
Volume brut: ..... m <sup>3</sup>	Volume net: ..... m <sup>3</sup>
Système de chargement: <input type="checkbox"/> Convoyeur	<input type="checkbox"/> Répartiteur silo <input type="checkbox"/> Pompe <input type="checkbox"/> Autre: .....
Système d'extraction: <input type="checkbox"/> Raclor de fond	<input type="checkbox"/> Extracteur central <input type="checkbox"/> Autres: .....
Autonomie: <input type="checkbox"/> < 1 semaine	<input type="checkbox"/> 1 – 2 semaines <input type="checkbox"/> 2 – 4 semaines
(pendant la saison la plus froide)	<input type="checkbox"/> 4 – 8 semaines <input type="checkbox"/> > 8 semaines
Rotation du volume net du silo: ..... nombre de rotations du volume net par an	

Données d'exploitation	
Heures de pleine puissance: Au bois: ..... h/a	Au mazout: ..... h/a
Consommation annuelle: Bois <input type="checkbox"/> ..... m <sup>3</sup> Pl/an	<input type="checkbox"/> ..... t <sub>atro</sub> /a <input type="checkbox"/> ..... MWh/a à η <sub>a</sub> = ..... %
	Mazout <input type="checkbox"/> ..... l/a <input type="checkbox"/> ..... t/a
	Consommation d'électricité pour le fonctionnement du chauffage au bois: ..... kWh/a
Chaleur utile: .....	MWh/a



Investissements	Investis- sement	Durée	Annuité	Amortis- sement	Entretien & Réparations	Coûts de E & R
Construction chaufferie:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Construction silo (y c. accès):	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Extracteur de silo:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Construction citerne:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Instal. sanitaires et électriques:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Chaudière, y c. raccordement au collecteur:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Cheminée:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Déchetiseur:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Réseau de chaleur:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a	..... %	..... Fr./a
Honoraires de planification:	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a		
Subventions: <input type="checkbox"/> Confédération	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a		
<input type="checkbox"/> Canton	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a		
<input type="checkbox"/> .....	..... Fr.	..... an	..... %	..... Fr./a		

Coûts annuels (sans renchérissement)						
Amortissements (Cf. investissements)				Total ..... Fr./a		
Coûts du combustible:	Bois	.....	Fr./a			
	Electricité	.....	Fr./a			
	Mazout	.....	Fr./a	Total ..... Fr./a		
Coûts entretien et réparations:	Personnel, service	.....	Fr./a			
	Ramoneur, mesures	.....	Fr./a	Total ..... Fr./a		
Frais divers:	Administration	.....	Fr./a			
	Assurances, impôts	.....	Fr./a	Total ..... Fr./a		
Coûts annuels totaux:				..... Fr./a		

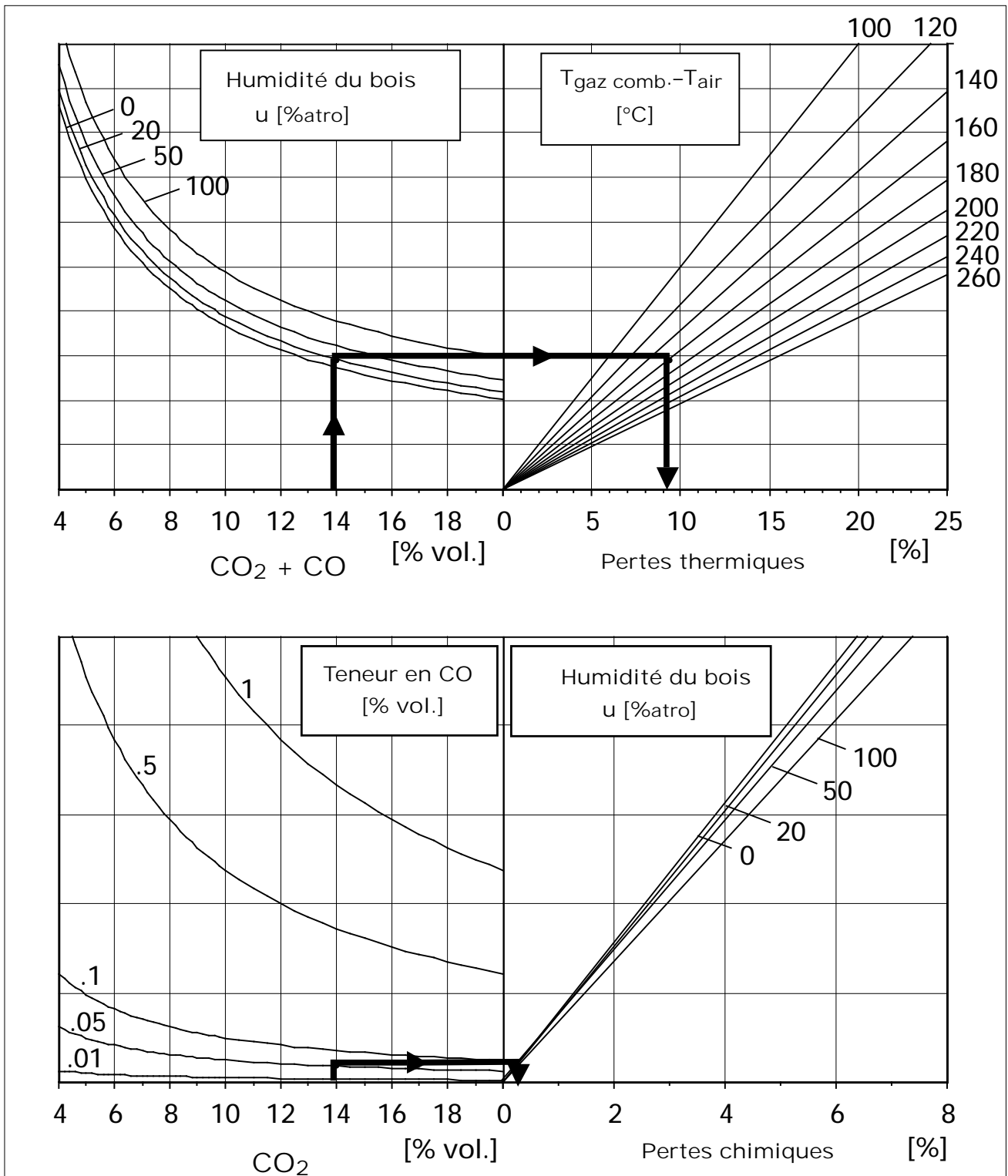
Caractéristiques principales (résumé)					
Chaleur utile:	..... MWh/a	Prix de l'énergie: sans réseau	..... ct/kWh		
Heures de marche pleines:	..... h/a	Prix de l'énergie: avec réseau	..... ct/kWh		
Coût de l'installation:	..... Fr./kW				
Coût du réseau:	..... Fr./m'				

Mode de facturation du réseau		
Prix de l'énergie:	..... ct/kWh	Taxe de raccordement forfaitaire ..... Fr./kW
Taxe de base:	..... Fr./kW par an	

Autres documents	
<input type="checkbox"/> Schéma de la chaudière	Données sur: <input type="checkbox"/> Etudes préliminaires
<input type="checkbox"/> Disposition de la chaufferie/locaux	<input type="checkbox"/> Avant-projet
<input type="checkbox"/> Schéma du réseau	<input type="checkbox"/> Projet
<input type="checkbox"/> Contrôle OPair	<input type="checkbox"/> Exécution, direction technique des travaux
	<input type="checkbox"/> Mise en service et réception

Particularités

Nomogramme pour le calcul du rendement technique de combustion de la chaudière



## A6 Appel d'offres FSIB

### FSIB «STANDARD» – Offre pour chauffage à plaquettes

**Ouvrage:** .....  
 .....  
 .....

**Maître d'ouvrage:** .....  
 .....  
 .....

Numéro de téléphone: ..... Numéro de fax: .....

**Architecte:** .....  
 .....  
 .....

Numéro de téléphone: ..... Numéro de fax: .....

**Concepteur:** .....  
 .....  
 .....

Numéro de téléphone: ..... Numéro de fax: .....

**Entrepreneur:** .....  
 .....  
 .....

Numéro de téléphone: ..... Numéro de fax: .....

Nature des travaux: **CFC 242 Production de chaleur à partir du bois**

Délai de remise: .....

Niveau de prix: .....

Délai d'exécution: .....

Total net de l'offre: ..... Offre valable jusqu'au .....

Lieu, date: .....

Signature: .....

Avec/sans proposition de contrat d'entreprise

### Conditions générales relatives aux offres d'installations de chauffage au bois

#### ÉTABLISSEMENT DE L'OFFRE

Les prix globaux requis doivent être appliqués.  
Les indications techniques doivent impérativement être remplies.

**Un descriptif détaillé de l'offre doit être joint par l'offreur. Ce descriptif contient tous les détails ainsi que les matériaux, les quantités, les dimensions et les poids.**

La présentation de ces offres et la répartition des différents postes de l'installation ne doivent pas obligatoirement concorder avec celle du prix global; elles peuvent être établie avec le propre système informatique de l'offreur pour les soumissions. Le prix total de l'installation doit toutefois concorder avec le total récapitulatif des prix.

**Proposition d'alternatives ou de compléments jugés souhaitables ou nécessaires par le fabricant.**

Les descriptions complètes de ces compléments ainsi que l'exposé des avantages qu'ils présentent doivent être joints à l'offre détaillée.

#### PRESCRIPTIONS

L'installation doit répondre aux exigences légales ainsi qu'aux prescriptions fédérales et cantonales en vigueur, en particulier:

- aux dispositions de la CNA,
- aux prescriptions des services de lutte contre l'incendie,
- aux directives AEAI,
- à l'Ordonnance sur la protection de l'air OPair 92,
- aux normes et recommandations de la SIA et des associations professionnelles en relation avec les techniques utilisées.

#### GARANTIE

- Deux ans sur la chaudière
- Un an sur les installations de convoyage et de transport (extraction, convoyeurs à vis ou à chaîne, etc.) et sur le système de remplissage du silo, ventilateurs, etc.
- Un an sur les composants électriques (armoire de commande, thermostats, sondes, etc.).
- Respect des paramètres indiqués de performances et de garantie.
- La garantie ne s'étend pas à l'usure normale des composants de l'installation.

### PRESTATIONS DU FOURNISSEUR DE L'INSTALLATION

- Plan d'agencement de l'installation de chauffage au bois.
- Plan des pièces à intégrer au silo (sans calcul statique).
- Schéma électrique.
- Instructions d'exploitation, plans de révision et de maintenance.

### EXÉCUTION PAR LE FOURNISSEUR DE LA CHAUDIÈRE

- Livraison de l'ensemble du matériel franco chantier.
- Mise à disposition de l'outillage éventuellement nécessaire.
- Pose et montage complet de l'installation.
- Peinture complète de l'installation et finitions après montage.
- Réglages et mise en service de l'installation avec instruction du personnel d'exploitation.
- Réglages subséquents après environ deux mois d'exploitation.

### L'ÉLÉMENT « CONSTRUCTION » COMPORTE LES TÂCHES ET POSTES SUIVANTS :

- |                      |  |
|----------------------|--|
| Bâtiments:           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- tous les travaux de construction,</li> <li>- amenée d'air frais dans la chaufferie,</li> <li>- tous travaux de charpente et de menuiserie,</li> <li>- tous travaux de peinture à l'exception de l'installation fournie,</li> <li>- pose des ancrages des cylindres hydrauliques et éléments intégrés.</li> </ul>  |
| Installation:        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- branchement hydraulique de la chaudière au système de chauffage,</li> <li>- dispositifs de sécurité hydrauliques nécessaires.</li> </ul>  |
| Sanitaire:           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- branchement au réseau d'adduction d'eau des dispositifs de protection contre l'incendie et montage des vannes ou équipements fournis par l'entrepreneur.</li> </ul>   |
| Electricité:         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- montage et pose de l'armoire de commande,</li> <li>- tous les branchements électriques de l'armoire de commande aux divers moteurs et appareils,</li> <li>- mise à disposition d'un raccordement de courant pour les travaux de montage et pour les appareils de soudure,</li> <li>- présence d'un monteur électricien lors de la mise en service.</li> </ul> |
| Isolation:           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- isolation des conduits de gaz de fumées de la chaudière à la cheminée.</li> </ul>   |
| Construction:        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- mise à disposition de locaux sous clé pour le dépôt du matériel de l'entreprise,</li> <li>- mise à disposition d'une grue pour le déchargement et le transport de la chaudière et de ses accessoires,</li> <li>- assistance pour l'amenée des éléments lourds.</li> </ul>   |
| Accès:               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'accès doit être assuré.</li> </ul>  |
| Mesures officielles: | <ul style="list-style-type: none"> <li>- mesures par un institut reconnu et neutre pour les premières mesures officielles (en cas de non-respect des valeurs limites, les mesures suivantes sont à la charge du fabricant dans la mesure où la responsabilité des défauts lui incombe).</li> </ul>   |

### PRIX DE L'INSTALLATION

Les prix s'entendent pour une installation complète répondant à toutes les prescriptions applicables ainsi que pour la pose et le montage soignés de tous les composants, prêts à fonctionner, y compris emballage et transport.

Tous les travaux de montage nécessaire au bon fonctionnement de l'installation doivent être compris, même s'ils ne sont pas expressément requis dans le descriptif d'installation. Le montage comprend également la mise en service de l'installation ainsi que l'instruction de l'exploitant. Le prix doit comprendre tous les frais du monteur ainsi que les frais de déplacement.

A défaut d'entente contraire, les prix s'entendent pour les travaux de montage effectués en une seule opération. Si, pour des raisons relevant de l'ouvrage, les travaux de montage doivent être interrompus plusieurs fois, les frais qui en découlent peuvent être facturés ultérieurement moyennant justificatifs.

Pour être valables, toutes les adaptations de prix et toutes les prétentions éventuelles en dommages-intérêts (pénalités de retard) qui pourraient être formulées contre l'entrepreneur doivent être mentionnées dans le contrat.

### CONDITIONS DE PAIEMENT

- 30 % dans les trente jours suivant la commande,
- 30 % à l'issue du montage brut de l'installation,
- 30 % une fois le montage terminé, payables dans les trente jours suivant la remise de la facture,
- 10 % après la réception finale de l'installation et contre caution solidaire d'une banque, d'une validité de deux ans, mais au plus tard six mois après la fin des travaux de montage, étant entendu que le fabricant ne serait pas responsable d'une éventuelle remise de la date de mise en service,
- toute autre condition éventuelle de paiement doit être convenue sous forme écrite.

### CONDITIONS GÉNÉRALES DE LIVRAISON

Les conditions générales de livraison des fabricants et fournisseurs de la branche chauffage, ventilation, climatisation sont applicables; elles figurent en annexe.

**Données spécifiques de l'installation de l'ingénieur pour le fournisseur****242.0 Bases**

Description des bases de l'installation (but d'utilisation, extensions ultérieures, intégration au système de chauffage, fourniture des plaquettes, véhicules de transport, etc.).

**INDICATIONS GÉNÉRALES ET EXIGENCES POSÉES À L'INSTALLATION DE CHAUFFAGE AUTOMATIQUE AU BOIS****242.01.01 Production de chaleur**

Puissance de la chaudière..... kW    Température de départ maximum .....°C  
 Pression de service ..... bar    Température de retour minimum .....°C

**Combustible**

Bois forestier ou plaquettes industrielles/naturelles

Répartition du bois énergie selon des critères de technique d'installation

Bois résineux .....%    Bois forestier .....%  
 Bois feuillu .....%    Sous-produits de la  
 Ecorces .....%    transformation du bois .....%

Assortiment	Dimension des plaquettes mm	Part max. de surlongueurs % poids	Part max. de particules fines* jusq. 3 mm % poids	Part max. d'écorce % poids	Teneur max. en eau x **	Humidité max. du bois u **
Plaquettes sèches, fines	40/20/10	1% > 80 mm	< 5%	< 10%	< 30%	< 43%
Plaquettes vertes, fines	40/20/10	1% > 80 mm	< 5%	< 10%	< 50%	< 100%
Plaquettes vertes, grossières	60/20/10	1% > 220 mm	< 5%	< 10%	< 50%	< 100%
Plaquettes vertes, grossières, à proportion d'écorce élevée	60/20/10	1% > 220 m	< 5%	< 30%	< 60%	< 150%

\* Au maximum 5% d'aiguilles en plus

\*\* Teneur en eau, resp. humidité du bois stocké dans les règles de l'art, sans eau d'origine externe

**Autres combustibles :** (indiquer la proportion en %)

.....  
 .....

**242.01.02 Evacuation des cendres**

- Exécution standard pour la chaudière de la taille prévue  
Description détaillée dans l'offre de l'entrepreneur
- Evacuation manuelle des cendres
- Evacuation automatique mécanique des cendres
  - Seau à cendres de 100 litres
  - Conteneur à cendres de 600 litres
  - Conteneur à cendres de 800 litres
  - ..... litres
- Evacuation automatique pneumatique des cendres
  - Conteneur à cendres de 600 litres
  - Conteneur à cendres de 800 litres
  - ..... litres
- Evacuation à un niveau plus élevé que celui de la chaufferie

### 242.01.3 Transport du combustible

- Dimensions des plaquettes:  40 x 20 x 10 mm  
1% de surlongueurs jusqu'à 80 mm
- 60 x 20 x 10 mm  
1% de surlongueurs jusqu'à 220 mm
- .....

### 242.01.4 Système d'extraction du silo

Dimensions du silo: Longueur: ..... m  
Largeur: ..... m  
Hauteur: ..... m

### 242.01.5 Commande

- Exécution standard pour la chaudière de la taille prévue  
Description détaillée dans l'offre de l'entrepreneur
- Commande répondant aux exigences minimales suivantes
- Régulation de la puissance
  - Optimisation de la combustion
  - Régulation de la dépression
  - 
  - 
  -
- En plus du chauffage au bois, les composants de régulation et de commande suivants doivent encore être intégrés dans l'armoire de commande:

.....  
.....  
.....  
.....

(Un schéma doit être joint en cas d'extensions importantes, sinon le prix n'est considéré que comme indicatif.)

- Extension de l'armoire de commande selon schéma ci-joint
- Etablissement du schéma d'ensemble en cas d'extension de l'armoire de commande

### 242.06 OPTIONS

- 242.06.1  Fourniture des éléments à incorporer pour le dispositif d'extraction du silo, y compris instructions de montage.  
(Livraison des éléments à incorporer sur le chantier, sans montage. Pose des éléments par l'entreprise de maçonnerie.)

- 242.06.2  Commutation de l'installation au mazout ou au gaz en mode de fonctionnement de secours.

- 242.06.3  Aspirateur à cendres, si désiré, pour le nettoyage rapide de la chaudière.
- Seau à cendre d'environ 100 litres
  - Conteneur de 600 litres
  - Conteneur de 800 litres
  - .....

- 242.06.4  Dispositif de remplissage du silo et de répartition du combustible pour une meilleure utilisation du volume du silo
- Exécution pour couvercle de remplissage au milieu du silo
  - Exécution pour couvercle de remplissage à l'extrémité du silo

- 242.06.5  Couvercle de remplissage du silo
- ..... Nombre:
- Exécution:  carrossable (8 tonnes de pression par roue)  
 non carrossable
- Dimensions:  1600 x 2600 mm  
 1800 x 3000 mm  
 2000 x 3000 mm  
 2200 x 3200 mm  
 .....

Désirs particuliers:

.....  
.....

**242.06.07 Autres options désirées**

(Cheminées, isolation phonique, conduite V4A pour gaz de fumées, aération du silo, lift à cendres, manchons de mesure EMPA, etc.)

242.06.08  .....  
.....  
.....

242.06.09  .....  
.....  
.....

**Autres points demandés par l'ingénieur:**

**242.0 Bases de planification**

**Agencement de la chaufferie**

(Esquisse de la chaufferie et du silo comportant les indications nécessaires relatives aux dimensions, emplacement, cheminée, accès au silo, évacuation des cendres etc., ou plans de construction correspondants).

**Plan:**

**Coupe:**

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### INDICATIONS SPÉCIFIQUES DU FABRICANT DU CHAUFFAGE

#### Indications relatives à l'entreprise :

Nombre de collaborateurs dans le secteur chauffage  
au bois : ..... collaborateurs

Personnel technique : ..... collaborateurs

Fabrication/montage : ..... collaborateurs

Service : ..... collaborateurs

Service après-vente à :  
.....  
.....  
.....

Part de la fabrication propre ..... %  
En cas d'importation, pays d'origine : .....

Référence pour des installations similaires Année de mise en service  
avec numéro de téléphone :

1. ....  
.....  
.....  
.....
2. ....  
.....  
.....  
.....
3. ....  
.....  
.....  
.....
4. ....  
.....  
.....  
.....

Liste de références en annexe, si disponible.

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE L'INSTALLATION

Chauffage/chaudière

- Foyer à poussée inférieure  
 Foyer à grille mobile  
 .....

Puissance nominale ..... kW  
Température maximum de l'eau ..... °C  
Température de retour minimum ..... °C  
Pression de service maximum ..... bar  
Pression d'essai ..... bar  
Capacité en eau ..... litres  
Résistance hydraulique ..... mbar  
Poids à vide ..... kg  
Départ ..... DN  
Retour ..... DN

Température des gaz de fumées à 100% de puissance ..... °C  
Température des gaz de fumées à 50% de puissance ..... °C

Rendement de combustion de la chaudière \*  
à 100% de puissance ..... %  
Rendement de combustion de la chaudière \*  
à 50% de puissance ..... %  
(\* à humidité moyenne du bois)

Pertes d'exploitation à puissance nominale ..... %

Respect garanti des limites OPair CO.....[mg/m<sup>3</sup>] à.....% O<sub>2</sub>  
Poussières [mg/m<sup>3</sup>] à.....% O<sub>2</sub>

#### Dispositif de transport

Description du système de transport du silo à la chaudière

.....  
.....  
.....

Diamètre de la vis : ..... mm  
Section du convoyeur à poussoirs : ..... mm  
Section.....: ..... mm



**Système d'extraction** (extracteur de fond à poussoirs)

Diamètre du cylindre ..... mm  
 Nombre de poussoirs ..... unités  
 Force de traction maximum ..... t  
 Force de poussée maximum ..... t

**Système d'évacuation des cendres**

Evacuation des cendres du foyer  oui  non  
 Système  pneumatique  mécanique

Capacité du conteneur ..... litres

**Commande/régulation**

Régulation de la puissance/nombre de paliers de puissance .....

Affichage  oui  non

Optimisation  oui  non

.....  
 .....

**Raccordements électriques**

Ventilateur d'aspiration pour le tirage ..... kW  
 Ventilateur d'air comburant ..... kW  
 Extracteur de fond ..... kW  
 Evacuation des cendres ..... kW  
 Installation de transport complète ..... kW  
 Consommation moyenne de courant/h à 100% de puissance ..... kW  
 à 50% de puissance ..... kW

**Indications spéciales de l'offreur**

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**242.01 Production de chaleur****Particularités**

L'entrepreneur joindra en complément un descriptif détaillé contenant toutes les indications relatives aux poids, performances, etc., des objets de la soumission.

**242.01.1 Production de chaleur/Dépoussiérage des gaz de fumées**

Chaudière en acier.

Unité de chauffage en maçonnerie réfractaire, à foyer à poussée inférieure ou à grille mobile.

Ventilateurs nécessaires pour l'amenée d'air comburant.

Isolation générale de 100 mm d'épaisseur, carrosserie extérieure en acier verni.

Dépoussiérage avec réservoir répondant aux caractéristiques demandées.

Isolation du dépoussiérage des gaz de fumées à enveloppe en acier ou en aluminium.

Ventilateur pour les gaz de fumées.

Conduits pour les gaz de fumées jusqu'à la cheminée, sans isolation.

Fr. ....

**242.01.2 Evacuation des cendres**

Evacuation des cendres du foyer.

Evacuation des poussières du dispositif de dépoussiérage des gaz de fumée.

Éléments de transport nécessaire tels que vis à cendres, roues cellulaires, éléments pneumatiques de transport selon la variante demandée dans les données de base.

Les unités de commande nécessaires sont à inclure dans la partie commande.

Fr. ....

**242.01.3 Transport du combustible du silo à la chaudière**

Transport transversal après extraction du silo.  
Unité de transport jusqu'à la vis d'alimentation.  
Vis d'alimentation.  
Dispositif de protection contre l'incendie selon AEAI.  
(Les dimensions de l'unité de transport doivent être spécifiées avec précision dans l'offre détaillée!)

Fr. \_\_\_\_\_

**242.01.4 Système d'extraction du silo**

Dimensions et agencement du silo selon le plan ci-joint, comprenant :  
Extracteur à pousoirs  
(Leur nombre doit être indiqué dans l'offre détaillée),  
Cylindres hydrauliques  
(Leur nombre doit être indiqué dans l'offre détaillée),  
Groupe hydraulique,  
Raccordement hydraulique entre les cylindres et le groupe hydraulique,  
Jeu d'éléments de commande pour la commande et l'extracteur de fond.

Fr. \_\_\_\_\_

**242.01.5 Armoire de commande avec commande/régulation**

Armoire métallique à grande porte frontale, étanche à la poussière, contenant :  
Dispositif complet pour la commande et la surveillance de l'ensemble de l'installation, selon données de base, y compris optimisation de la combustion  
(La plage de régulation doit être incluse dans l'offre détaillée),  
Tous les appareils et fusibles, contacts, relais, etc., nécessaires au fonctionnement de l'installation,  
Système d'information et de surveillance de toutes les fonctions et dérangements.

Fr. \_\_\_\_\_

**242.01.6 Transport, montage, mise en service et réglages**

Comprenant :  
Transport jusqu'au chantier de l'ensemble du matériel,  
Montage complet de l'installation à l'exception de l'armoire de commande et branchements électriques des différents appareils,  
Mise en service de l'installation, réglages et mises au point, instruction du personnel d'exploitation,  
Réglages subséquents après environ deux mois d'exploitation.

Fr. \_\_\_\_\_

**242.07 Options****242.07.1 Livraison des éléments à intégrer pour le système d'extraction du silo**

Système d'ancrage pour les tiges des cylindres hydrauliques.

Rails de guidage pour les tiges.

Fermetures à la sortie du silo.

Livraison des éléments à intégrer sur le chantier, sans montage.

Plan de pose pour le maçon. Fr. \_\_\_\_\_

**242.07.2 Chauffage de secours au mazout ou au gaz**

Pour le fonctionnement en mode de secours (pas de Low-NOx).

Équipement comportant une porte interchangeable pour le montage du brûleur.

Commande électrique du brûleur à mazout ou à gaz. Fr. \_\_\_\_\_

**242.07.3 Aspirateur à cendres**

Comprenant :

Aspirateur mobile à cendres à filtre facilement remplaçable,

Réservoir ou conteneur à séparateur amont pour le ramassage des cendres,

Accessoires pour aspirateur – tubes fixes et flexibles résistant à la chaleur (cendres chaudes),

Élément d'armoire de commande et câble de raccordement électrique,

Livraison complète et mise en service de l'appareil. Fr. \_\_\_\_\_

**242.07.4 Répartiteur de silo**

... dispositif (s) de remplissage et de répartition du combustible dans le silo pour une meilleure utilisation de son volume.

- Descriptif selon offre spécifique de l'entrepreneur avec indication des performances de répartition et du degré de remplissage
- Groupe hydraulique nécessaire.
- Extension de l'armoire de commande.
- Montage et mise en service.

Fr. \_\_\_\_\_

**242.07.5 Couvercle de remplissage du silo**

... couvercle (s) de remplissage du silo, exécution selon données de base.

Complet y compris cadre d'encastrement, écoulement d'eau, grille de protection contre les chutes, équipement hydraulique ou auxiliaires d'ouverture.

- Selon l'offre spécifique de l'entrepreneur.
- Compléments pour l'armoire de commande.
- Montage et mise en service.

Fr. \_\_\_\_\_



## A7 Bibliographie

Chauffages centraux au bois – Principes de base pour l'étude et l'exécution de projets  
Programme d'impulsions – Les installations du bâtiment  
Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne 1989  
Source: OCFIM, 3000 Berne, N° 724.623 f

Valorisation énergétique des restes de bois de l'industrie  
Office fédéral des questions conjoncturelles  
Source: OCFIM, 3000 Berne, N° 724.238 f

Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich  
Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne 1994  
Source: OCFIM, 3000 Berne, N° 724.270 d  
Version française abrégée: N° 724.270 f

Energie aus Heizöl oder Holz – Eine vergleichende Umweltbilanz  
Schriftenreihe Umwelt Nr. 131 – Holz  
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne 1990  
Source: OFEFP, 3003 Berne

Energie tirée du mazout ou du bois – Test comparatif entre chauffage automatique aux plaquettes de bois et chauffage au mazout  
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne 1991  
Association suisse pour l'énergie du bois, Zurich 1991

Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen  
Diane 7, Klein-Holzfeuerungen  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1993  
Source: ENET, case postale 142, 3006 Berne

Electricité par le bois – Estimation économique de la génération d'électricité par le bois  
Diane 8 – Bois et papier de récupération, source d'énergie  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1994  
Source: OCFIM, 3000 Berne, N° 8051.82 f

Wirtschaftlichkeit der Holzenergienutzung in der Gemeinde  
Förderprogramm Holz  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1994  
Source: ASEB, Falkenstrasse 26, 8008 Zurich

Emissionsarme Altholznutzung in 1 – 10 MW Anlagen  
Diane 8 – Bois et papier de récupération, source d'énergie  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1994  
Source: OCFIM, 3000 Berne, N° 805.180 d

SNCR-Verfahren zur Stickoxidminderung bei einer Holzfeuerung  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1994  
Source: ENET, case postale 142, 3006 Berne

Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz  
Thomas Nussbaumer, thèse EPF N° 8838, Zurich 1989

Verbrennungsregelung bei automatischen Holzsnitzelfeuerungen  
Jürgen Good, thèse EPF N° 9771, Zurich 1992

Energetische Nutzung von Holz, Holzreststoffen und Altholz  
Thomas Nussbaumer (éd.)  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1990  
Source: ENET, case postale 142, 3006 Berne

Neue Konzepte zur schadstoffarmen Holzenergie-Nutzung  
Thomas Nussbaumer (éd.)  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1992  
Source: ENET, case postale 142, 3006 Berne

Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz  
Thomas Nussbaumer (éd.)  
Office fédéral de l'énergie, Berne 1994  
Source: ENET, case postale 142, 3006 Berne

Energietechnik in der Holzverarbeitung – Handbuch für Holzindustrie und Handwerk  
Klaus Seeger, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen (D) 1989  
ISBN 3-87181-317-6

Reinigung von Abgasen  
Wolfgang Fritz und Heinz Kern, 2. Auflage, Vogel-Verlag Würzburg (D) 1990, ISBN 3-8023-0244-3

Energietechnik – Technische, ökonomische  
und ökologische Grundlagen  
Kurt Kugeler und Peter-W. Philippen, Springer-  
Verlag Berlin 1990  
ISBN 3-540-52865-2

## A8 Prescriptions et ordonnances

Ordonnance sur la protection de l'air (OPair)  
du 16 décembre 1985. Etat au 1.1.1993  
Source: OFEFP 3003 Berne, N° 814.318.142.1

Ordonnance sur le traitement des déchets  
(OTD)  
du 10 décembre 1990. Etat au 1.1.1993  
Source: OFEFP, 3003 Berne, N° 814.015

Recommandations sur la hauteur minimale  
des cheminées sur toit  
du 15 décembre 1989  
Source: OFEFP, 3003 Berne

Recommandations relatives à la mesure des  
immissions de polluants atmosphériques  
du 15 janvier 1990  
Source: OFEFP, 3003 Berne

Silos à plaquettes de bois vert  
Contenu: exigences techniques en matière de sécu-  
rité, comportement en cas de pénétration dans le  
silo  
Source: Caisse nationale suisse d'assurance en cas  
d'accidents, case postale, 6002 Lucerne, N° 66050. f

Silos à copeaux de bois  
CNA – Cahiers suisses de la sécurité au travail  
Contenu: matériaux sous forme de copeaux,  
vidange des silos et risques encourus, accidents  
dans les silos à copeaux, causes d'accidents  
Source: Caisse nationale suisse d'assurance en cas  
d'accidents, case postale, 6002 Lucerne, réf. : CSST  
N° 126

Règles concernant les engins de manutention  
continue  
CNA – Sécurité au travail  
Contenu: prescriptions en matière de construction  
et de dispositifs de sécurité  
Source: Caisse nationale suisse d'assurance en cas  
d'accidents, case postale, 6002 Lucerne, N° 1545 f

Aération et ventilation des chaufferies

Directive SICC 91-1, 11/1992

Contenu: détermination des quantités d'air, aération naturelle et ventilation mécanique, conseils pratiques, exemples

Source: Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation SICC, case postale, 3001 Berne

Directive de protection incendie – Installations thermiques

Edition 1993

Contenu: installation d'agrégats thermiques, évacuation des gaz de fumées, entreposage des combustibles

Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI

Source: AEAI, Bundesgasse 20, 3011 Berne

## A9 Adresses importantes

OFQC

Office fédéral des questions conjoncturelles

Effingerstrasse 27, 3003 Berne

Téléphone: 031/322 21 29 – Fax: 031/372 41 02

Renseignements sur les Programmes d'impulsions

RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité

PACER – Energies renouvelables

PI BAT – Entretien et rénovation des bâtiments.

OFEFP

Office fédéral des forêts, de l'environnement et du paysage

Hallwylstrasse 4, 3003 Berne

Téléphone: 031/322 93 11 – Fax: 031/322 99 81

Renseignements sur l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) et l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD).

OFEN

Office fédéral de l'énergie

Kapellenstrasse 14, 3003 Berne

Téléphone: 031/322 56 11 – Fax: 031/382 43 07

Renseignements sur le Programme d'impulsions de l'OFEN dans le contexte d'Energie 2000.

Programme d'encouragement en faveur du bois

c/o Association suisse pour l'énergie du bois

En Budron H – 1052 Le Mont-sur-Lausanne

Téléphone: 021/653 07 77 – Fax: 021/653 07 78

Prestations: conseils et informations sur tous les types de chauffages au bois ainsi que sur les aides financières possibles de la part de la Confédération et des cantons.

AEAI

Association des établissements cantonaux d'assurance incendie

Bundesgasse 20, 3011 Berne

Téléphone: 031/320 22 22 – Fax: 031/320 22 99

Renseignements sur les prescriptions en matière de protection contre l'incendie relatives à la préparation, au stockage et à l'utilisation des sous-produits de la transformation du bois. Adresses des établissements cantonaux d'assurance des bâtiments et des autorités de police du feu.

CNA  
Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents  
Case postale, 6002 Lucerne  
Téléphone: 041/215 111 – Fax: 041/215 828

Renseignements sur les prescriptions élémentaires de sécurité, en particulier en matière d'entreposage des sous-produits de la transformation du bois.

EFS  
Verband Energiefachleute Schweiz  
c/o INFOENERGIE  
FAT, 8356 Tänikon  
Téléphone: 052/623 470 – Fax: 052/623 489

L'EFS est l'organisation faitière des conseillers actifs en matière d'énergie et des associations du domaine de l'énergie. C'est auprès d'elle que l'on trouvera d'autres adresses, celles des services cantonaux de l'énergie en particulier; sont également disponibles les adresses et de brèves descriptions d'installations pilotes et de démonstration exemplaires.



# Associations de soutien

---

ASEB



Association suisse  
pour l'énergie du bois

---