

# ÉTUDE DE FAISABILITÉ POUR LA CRÉATION D'UNE CHAUFFERIE BOIS À LA ROMAINE



## SOMMAIRE

Préambule.....	2	4.1 - Rappel des principaux critères à prendre en compte.....	12
Liste des acronymes et abréviations.....	2	4.2 - Chaudière bois.....	12
Unités et grandeurs physiques.....	2	4.3 - Bâtiment chaufferie-silo.....	13
Introduction.....	3	4.4 - Réseau de chaleur.....	17
Généralités et contexte.....	3	4.5 - Sous-stations.....	18
La situation actuelle.....	3	4.6 - Autres travaux.....	19
Particularités du projet.....	3	4.7 - Obligations réglementaires.....	20
Lancement de l'étude.....	3	4.8 - Conclusion de l'étude technique.....	21
Documents demandés / fournis.....	3	5 - Analyse économique.....	23
1 - Bilan de l'existant.....	4	5.1 - Généralités.....	23
1.1 - Présentation du site.....	4	5.2 - Modes de gestion et montage du projet.....	23
1.2 - Caractéristiques des bâtiments.....	4	5.3 - Prix des énergies.....	25
1.3 - Évaluation des besoins et puissances.....	4	5.4 - Solutions de référence.....	25
1.4 - Prise en compte d'opérations de maîtrise de l'énergie.....	5	5.5 - Montants estimatifs d'investissements bois-énergie.....	26
2 - Étude thermique.....	6	5.6 - Aides au financement.....	26
2.1 - Récapitulatif des hypothèses utilisées dans l'étude.....	6	5.7 - Coûts de fonctionnement de la solution bois-énergie.....	28
2.2 - Solution bois étudiée.....	6	5.8 - Analyse et critères de comparaison.....	28
3 - Étude d'approvisionnement.....	10	5.9 - Conclusion de l'analyse économique.....	35
3.1 - Caractéristiques générales du bois recherché (plaquette).....	10	Conclusion générale.....	36
3.2 - Cas du granulé de bois.....	10	Annexes.....	37
4 - Étude technique.....	12	ANNEXE 1 - Petit glossaire.....	38
		ANNEXE 2 - Méthode de dimensionnement d'une chaudière bois.....	41

## Liste des acronymes et abréviations

- **CEE ou C2E** : certificats d'économie d'énergie dispositif visant à monétiser les économies d'énergie  
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Certificats-d-economies-d-energie,188-.html>
- **CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone l'un des principaux gaz à effet de serre
- **COP** : coefficient de performance représente le ratio entre la production de chaleur (ou de froid) d'une PAC et sa consommation électrique
- **DJU** degrés-jours unifiés écart quotidien entre les températures moyennes extérieure et intérieure, indicateur de la rigueur climatique, défini pour une température de chauffage donnée  
ex : par -5°C extérieur en moyenne pendant 24 h, le chauffage d'un bâtiment à 18°C correspond à  $18 - (-5) = 23$  DJU
- **ECS** : eau chaude sanitaire
- **GES** : gaz à effet de serre
- **ICPE** : installation classée pour la protection de l'environnement réglementation spécifique applicable notamment aux chaufferies de forte puissance (rubrique 2910), soumise à déclaration (< 2 MW), ou à autorisation préfectorale (>20 MW)
- **NA** : non applicable
- **NC** : non communiqué
- **ND** : non déterminé
- **NR** : non renseigné
- **PAC** : pompe à chaleur
- **PCI** : pouvoir calorifique inférieur quantité d'énergie disponible dans une unité de combustible, hors chaleur latente de la vapeur d'eau contenue dans les fumées
- **PCS** : pouvoir calorifique supérieur quantité d'énergie disponible dans une unité de combustible, y compris chaleur latente de la vapeur d'eau des fumées (qui peut être récupérée via des technologies de condensation)
- **PU** : polyuréthane
- **RDC** : rez-de-chaussée
- **SO** : sans objet
- **TRA** : temps de retour actualisé surcoût divisé par économie actualisée
- **TRB** : temps de retour brut surcoût divisé par économie

## Unités et grandeurs physiques

- **L** : litre
- **MAP** : mètre cube apparent de plaquette (mètre cube de bois déchiqueté)
- **W, kW, MW** : watt, kilowatt (1'000 W) , mégawatt (1'000'000 W ou 1'000 kW) unité de puissance (débit d'énergie)  
1 W vaut 1 joule par seconde (1J/s)
- **Wh, kWh, MWh** : watt-heure, kilowatt-heure, mégawatt-heure unité d'énergie
- 1 kWh correspond à l'énergie de 1'000 W pendant une heure, soit 3.6 MJ
- **kWhe, MWhe** : kWh, MWh d'électricité
- **kWh<sub>ef</sub>, MWh<sub>ef</sub>** : kWh, MWh d'énergie finale (énergie consommée au stade finale de la chaîne de transformation de l'énergie)
- **kWh<sub>ep</sub>, MWh<sub>ep</sub>** : kWh, MWh d'énergie primaire (énergie consommée avant toute transformation)
- **kWh<sub>th</sub>, MWh<sub>th</sub>** : kWh, MWh d'énergie thermique

## Généralités et contexte

La commune de **La Romaine** s'est engagée dans une réflexion sur les modes de production énergétique de son patrimoine communal.

À Vezet, la proximité de la mairie et d'un bâtiment de logements communaux, associée à la présence d'une dépendance, incitent la commune à envisager la réalisation d'une chaufferie bois (plus spécifiquement : au granulé de bois).

La présente étude évalue la faisabilité technico-économique d'une telle chaufferie pour chauffer les deux bâtiments.

## La situation actuelle

La zone concernée regroupe la mairie et le bâtiment de logements, qui sont équipés de chaudières individuelles au propane et au fioul.

## Particularités du projet

Le projet présente plusieurs spécificités :

- pas de **gaz naturel** sur la commune, ce sont le fioul et le propane qui sont utilisés pour le chauffage ;
- **les locaux de la mairie sont assez peu chauffés**, avec une seule demi-journée de permanence en semaine. Un des autres logements est actuellement inoccupé, mais nous considérerons pour l'étude qu'il est à nouveau occupé ;
- l'objectif d'une **solution 100 % bois** est recherché, néanmoins on peut s'interroger sur la nécessité d'assurer un secours pour les logements ;
- **l'église est inscrite aux Monuments Historiques**, l'intégration architecturale du projet devra être soignée.

## Lancement de l'étude

La réunion de lancement s'est déroulée le **23 octobre 2017** en présence de représentants de l'équipe municipale (dont le maire), et le SIED 70.

La commande a été officiellement signifiée par **courrier 28 novembre 2017**, reçu le 12 décembre 2017.

## Documents demandés / fournis

Documents / informations demandés	Fournis oui/non
Plan masse du site	oui
Plan des bâtiments	oui
Factures d'énergie sur 3 ans	Oui (mairie seulement)
Principales caractéristiques des installations thermiques	Relevées sur site
Contrat d'exploitation	aucun
Informations sur l'occupation des locaux et les besoins de chaleur	Expliquées/évaluées sur site
Évolutions à venir	Néant

# 1 - BILAN DE L'EXISTANT

## 1.1 - Présentation du site

Le projet se concentre sur la mairie et le bâtiment de logements à Vezet.

La dépendance principale repérée sur le plan ci-contre est proposée pour être convertie en chaufferie bois : elle accueillerait la chaudière bois et le silo de stockage.

## 1.2 - Caractéristiques des bâtiments

La mairie est séparée en une zone « tertiaire » (rez-de chaussée + étage), qui accueille le secrétariat, une salle de réunion, et des locaux pas ou peu chauffés (archives et autres rangements). Un logement est présent dans le bâtiment. Les combles sont actuellement inoccupés, leur aménagement ne semble pas prévu.

L'autre bâtiment accueille 4 logements.

Les bâtiments sont caractérisés par les estimations suivantes :

Bâtiment / ensemble	Propriétaire / occupant	Usage type	Descriptif	Estimation surface chauffée (m²)	Estimation volume chauffé (m³)
Mairie	Commune	Administratif, habitation	Bâtiment ancien, rénové	232 m²	618 m³
Logements	Commune	Habitation	Bâtiment ancien, rénové	410 m²	1'015 m³

Bâtiment / ensemble	Qualité générale de l'isolation	Ventilation	Énergie pour production thermique	Équipements chauffage	Équipements ECS
Mairie	Assez bonne	VMC	propane	2 chaudières 15 à 17 ans	Sur chaudière
Logements	Bonne	VMC	Fioul	4 chaudières ~15 ans	Sur chaudière

## 1.3 - Évaluation des besoins et puissances

Bâtiment / ensemble	Conso entrée chaudière	Conso spécifique	Besoins de chaleur	Besoins spécifiques	Inclusion ECS ?	Puissance hors foisonnement
Mairie	15.1 MWh	65 kWh/m²	13.3 MWh	57 kWh/m²	oui	14 kW
Logements	77.5 MWh	189 kWh/m²	65.9 MWh	161 kWh/m²	oui	35 kW
TOTAUX	92.6 MWh		79.2 MWh			49 kW

Les besoins de chaleur correspondent à l'énergie utile nécessaire au chauffage des locaux (ici c'est l'équivalent de l'énergie sortie chaudière - ou sous-station).

Les puissances ont été évaluées par un bilan thermique simplifié, et recoupées à l'aide des données de consommation d'énergie lorsque ces données étaient disponibles (voir prédiagnostics).



## 1.4 - Prise en compte d'opérations de maîtrise de l'énergie

Les prédiagnostics ont mis en évidence des possibilités de réduction des factures d'énergies, mais les opérations d'isolation des bâtiments sont d'un intérêt limité puisque ceux-ci sont déjà isolés. Les principales interventions envisageables raisonnablement sont :

- un renouvellement de chaudière ou un changement d'énergie ;
- un pilotage plus fin des installations de chauffage avec une régulation adaptée (à prévoir notamment dans le cadre du renouvellement des installations thermiques) ;
- éventuellement l'installation de systèmes de VMC hydroréglables au lieu des actuels caissons autoréglables.

En conséquence, les hypothèses retenues pour l'étude sont légèrement minorées par rapport à la situation actuelle, principalement pour ce qui concerne les consommations entrée chaudière : le projet bois-énergie sera comparé au remplacement des installations thermiques actuelles par des installations modernes et performantes, avec une régulation adaptée.

### 2.1 - Récapitulatif des hypothèses utilisées dans l'étude

Bâtiment / ensemble	Besoins de chaleur	Puissance max hors foisonnement
Mairie	13.3 MWh	14 kW
Logements	65.9 MWh	35 kW
<b>TOTAUX</b>	<b>79.2 MWh</b>	<b>49 kW</b>

### 2.2 - Solution bois étudiée

Les conditions techniques et économiques du projet devront être optimisées :

- à cause des faibles puissances et consommations en jeu (les investissements initiaux risquent de peser lourd face aux modestes consommations d'énergie) ;
- de façon à ne pas surdimensionner les installations, en privilégiant une gestion intelligente (priorité du chauffage de certains locaux par rapport à d'autre, stockage d'énergie, par exemple).

**L'aspect économique a un caractère majeur dans le dimensionnement de l'installation bois-énergie.**

Ici l'objectif n'est donc pas forcément d'obtenir un taux de couverture bois-énergie maximal, mais d'identifier le meilleur compromis dimensionnement/taux de couverture/coût d'investissement/aides mobilisables. Néanmoins, vu les puissances en jeu, une solution 100 % bois sera recherchée, avec un secours au fioul (qui pourrait également être utilisé en appoint si nécessaire).

Il est prévu d'étudier la création d'une chaufferie au granulé de bois ou au bois déchiqueté. Comme cela est détaillé dans l'étude technique, cette dernière possibilité est techniquement envisageable, mais elle se heurte à plusieurs contraintes :

- la taille du projet : afin que celui-ci soit compétitif il est nécessaire d'optimiser les coûts d'investissement. À ce titre il est souhaitable de limiter au maximum les travaux de génie civil ;
- un stockage de plain pied qui nécessite une trémie de bennage et un système de remplissage. Si cette solution est désormais éprouvée, la construction d'une trémie de bennage est délicate sur site :
  - par les travaux de génie civil qu'elle représente ;
  - par son implantation :
    - en la plaçant côté rue, elle condamne le trottoir et impose que le camion de livraison du bois effectue son dépôtage en stationnant sur la chaussée. Ce qui pose un problème de sécurité étant donné que le camion serait stationné dans un virage masqué, sauf à revoir la circulation sur le secteur et à affecter une emprise d'environ 45 m<sup>2</sup> (3 x 15 m) pour l'installation de la trémie et le stationnement du camion ;
    - en la plaçant dans la cour de la mairie, il est nécessaire de démolir au moins partiellement le mur et d'aménager une aire de manœuvre dans la cour, ce qui affecterait particulièrement le caractère des lieux ;
    - une conduite d'alimentation en eau passe sous ces deux implantations de trémie envisageables. La construction de la trémie maçonnée imposerait donc vraisemblablement le dévoiement de cette conduite.

Pour le reste, il est possible d'implanter la chaufferie bois et son silo dans la dépendance, mais avec des contraintes géométriques qui vont limiter les possibilités d'agencement et la capacité de stockage de plaquettes de bois.

Néanmoins, la solution au bois déchiqueté n'étant pas techniquement impossible, elle est évaluée dans cette étude.

### 2.2.1 - Définition des scénarios

Plusieurs paramètres peuvent permettre de définir des scénarios d'étude :

1. les **caractéristiques des consommateurs** (profil des besoins de chaleur, puissances, type de chauffage...) et leur éloignement par rapport à la chaufferie ;
2. les **motivations à l'origine du projet bois**, au regard de divers paramètres tels que :
  - des objectifs de rentabilité/compétitivité économique ;
  - les aspects environnementaux, la réglementation thermique en vigueur ;
3. la **faisabilité technique** ;
4. plus généralement, l'**adéquation avec le projet**.

Le raccordement de chacun des bâtiments est discuté dans le tableau qui suit :

Bâtiment / ensemble	Particularités et intérêts d'un raccordement	Risques
Mairie	+ propane très cher + chaudières à remplacer à moyen terme	Besoins très modestes, notamment pour le chauffage de la mairie dont l'occupation est très intermittente. Production actuelle non centralisée (chaudières murales), coût du raccordement. Production d'ECS pour l'été à convertir.
Logements	+ consommation plus stable et constante à priori	Coût de raccordement étant donné les multiples chaudières actuellement en place. Production d'ECS pour l'été à convertir, chaufferie centrale à créer.

Dans ce contexte, un seul scénario sera étudié : la mise en place d'une chaudière bois pour les deux bâtiments (version granulé et version bois déchiqueté).

Version	Besoins de chaleur	Puissance max hors foisonnement
Bois	79.2 MWh	49 kW

### 2.2.2 - Solutions de référence

Le projet bois sera comparé aux solutions qui seraient mises en œuvre si le projet bois n'était pas réalisé ;

Bâtiment / ensemble	Solution de référence
Mairie	Renouvellement des installations propane
Logements	Renouvellement des installations fioul

### 2.2.3 - Solution bois-énergie

La solution bois-énergie consistera en la mise en place d'un système de production de chaleur utilisant la plaquette ou le granulé de bois, si possible sans recourir à une installation complémentaire.

L'étude de dimensionnement aboutit à un **dimensionnement de l'ordre de 50 kW** pour la chaudière bois, ce qui permettrait de couvrir virtuellement 100% des besoins. Une telle chaudière pourrait toutefois s'avérer un peu

« juste » pour relancer simultanément et par grand froid le chauffage dans l'ensemble des locaux des 2 bâtiments. Bien que ce soit une situation exceptionnelle, il est préférable d'avoir un peu de marge, aussi, dans la mesure du possible, on installera également un ballon d'hydroaccumulation, et on récupérera une partie des installations fioul existante pour assurer le secours.

Dans tous les cas, avec un dimensionnement visant le 100 % bois, le rendement annuel de l'installation n'est pas très bon.

### 2.2.3.1 - Synthèse des données

DIMENSIONNEMENT BOIS-ÉNERGIE		Plaquette	Granulé
Période de fonctionnement bois		Septembre à fin mai	Septembre à fin mai
Énergie distribuée		79.2 MWh	79.2 MWh
Pertes réseau	Pertes réseau	6.9 MWh	6.9 MWh
	Rendement réseau	92.0%	92.0%
	Pertes / énergie distribuée	8.6%	8.6%
	Longueur réseau	98 m	98 m
Énergie produite		86.1 MWh	86.1 MWh
Bois	Puissance bois à envisager	1 chaudière 40 à 65 kW	1 chaudière 40 à 65 kW
	Puissance retenue	50 kW	50 kW
	Taux de couverture simulé	100.0%	100.0%
	Taux de couverture retenu	95.0%	100.0%
	Énergie produite	81.7 MWh	86.1 MWh
	Rendement annuel moyen	73.1%	78.1%
	Consommation	111.8 MWh	110.2 MWh
	soit	31.1 tonnes	24.0 tonnes
Appoint/secours	Type d'énergie	Fioul	Fioul
	Puissance retenue	40 kW	40 kW
	Taux de couverture	5%	0%
	Énergie produite	4 MWh	0 MWh
	Rendement annuel moyen	85%	85%
	Consommation	5.1 MWh	0.0 MWh
	soit	506 L	0 L
Énergie totale consommée		116.9 MWh	110.2 MWh
Rendement de production global		67.8%	71.9%

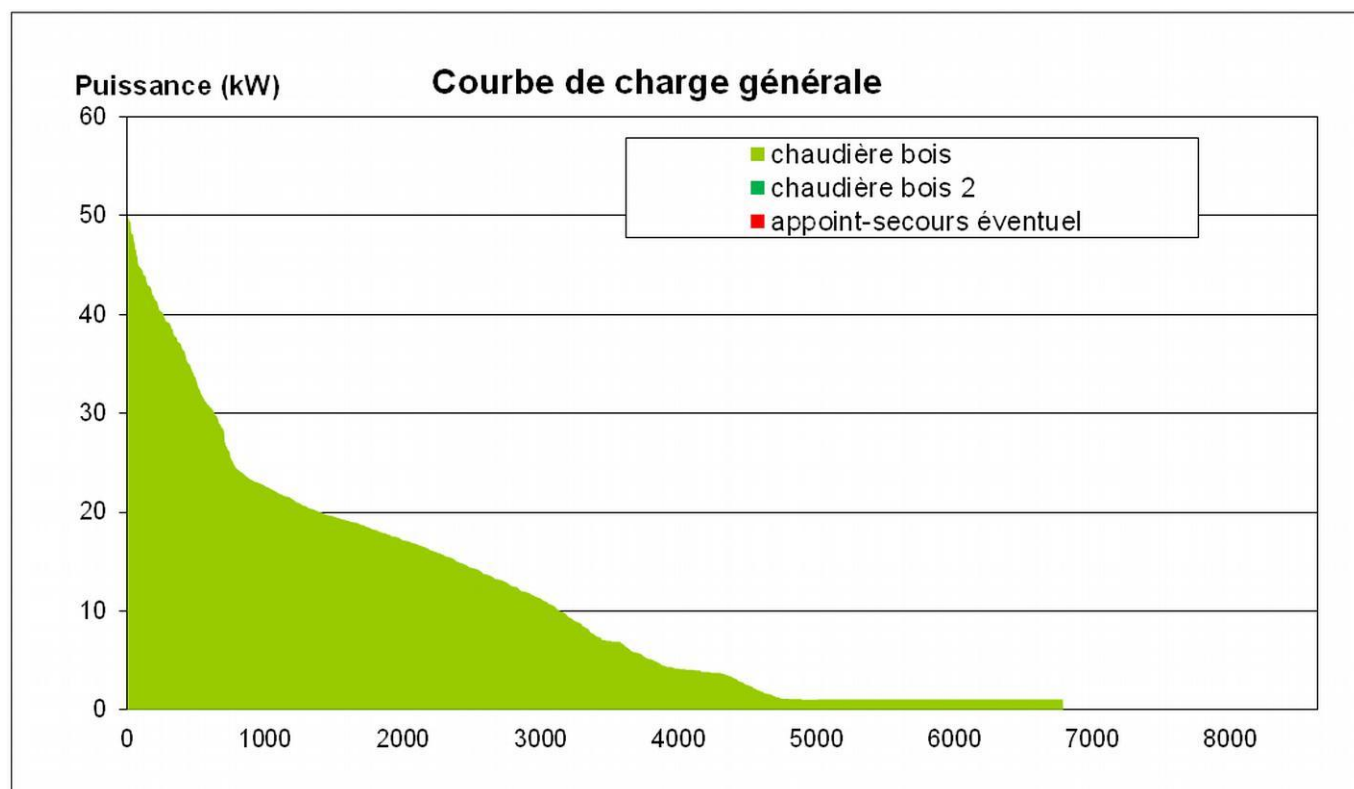
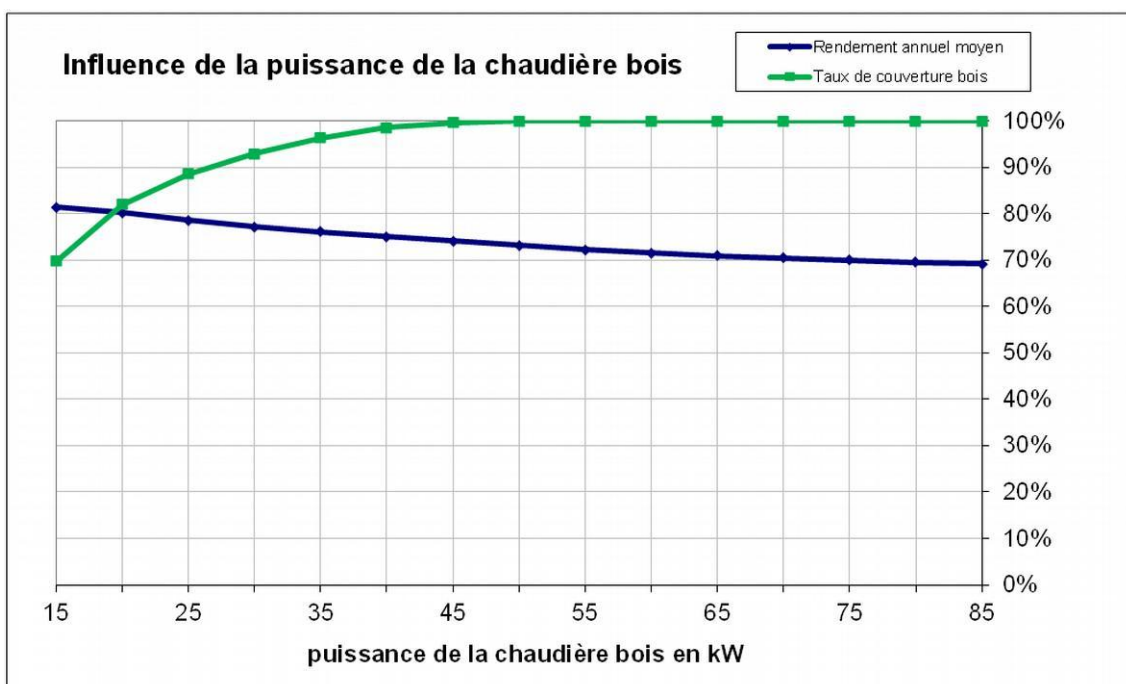
L'appoint-secours consisterait en la récupération de deux des chaudières fioul actuellement installées dans les logements, de façon à assurer la continuité de service en cas de défaillance ou de problème sur la chaudière bois.

À noter qu'avec le granulé de bois le rendement annuel serait légèrement amélioré par rapport à la solution plaquette :

- les chaudières au granulé de bois sont plus souples en fonctionnement que leurs homologues au bois déchiqueté ;
- par ailleurs, il n'y a pas de place disponible dans la future chaufferie pour installer un ballon d'hydroaccumulation (voir plus loin).

### 2.2.3.2 - Courbe de dimensionnement et courbe de charge

Note : certaines pointes exceptionnelles ne sont pas visibles sur la courbe de charge.



Très ponctuellement il est possible que la puissance appelée pour le chauffage et la production d'ECS sur l'ensemble des locaux dépasse les 50 kW attendus : mais c'est un phénomène qui ne devrait pas se produire plus de quelques heures par an, et qu'un ballon d'hydroaccumulation devrait permettre d'absorber (dans la mesure où un tel équipement peut être installé). À défaut, une chaudière fioul prendra le relais.

Avec une bonne gestion des relances de chauffage, il peut même être possible d'installer une chaudière bois de 40 kW, laquelle bénéficiera d'un rendement annuel un peu amélioré.

## 3 - ÉTUDE D'APPROVISIONNEMENT

### 3.1 - Caractéristiques générales du bois recherché (plaquette)

Le dimensionnement bois-énergie correspond à la gamme des « petites » chaudières bois. Celles-ci reposent généralement sur un concept de foyer volcan, qui impose :

- un bois sec : moins de 30 % d'humidité sur brut (M30), et même idéalement moins de 25 % d'humidité (M25) ;
- un bois calibré (système de transfert et d'alimentation par vis) : granulométrie G30, G40, ou P45 au maximum ;
- une teneur en fines et un taux de cendres maîtrisés (selon fabricant, généralement moins de 5 % de fines et A1.5 soit moins de 1.5 % pour le taux de cendres).

Classification selon norme CEN/TS 14961 :

<b>P (particle size = granulométrie)</b>	<b>M (moisture = hygrométrie)</b>	<b>A (ashes = taux de cendres)</b>
P16 à P45 (équivalent G30 à G50)	M25	A0.7 à A1.5

Les livraisons devront être réalisées par camion petit porteur, d'une capacité unitaire de 30 MAP au maximum, voir moins selon la capacité effective du silo (dans ce cas, le prix du bois sera affecté par le forfait de livraison, qui est fixe quelle que soit la quantité de bois livrée).

Vu la taille du projet et la présence d'une dépendance pouvant être convertie en chaufferie+silo, on cherchera à optimiser les coûts d'investissement en limitant les travaux de génie civil. Le silo sera donc de plain pied, avec un **système de remplissage par vis** à partir d'une trémie de bennage. Ce temps d'immobilisation du véhicule de livraison aura un impact sur le coût du combustible.

Afin d'être éligible aux subventions, le projet devra utiliser de la **plaquette forestière** (dont au moins la moitié de plaquettes certifiées PEFC ou équivalent), et/ou des broyats de bois d'emballage (propres) dont au moins 20 % de matières ayant obtenu une sortie du statut de déchets au sens de l'arrêté du 29 juillet 2014.

<b>Nature du combustible</b>		<b>Plaquette</b>
<b>Granulométrie moyenne</b>		10 mm x 20 mm x 40 mm de long, soit P16 à P45 au maximum
<b>Humidité moyenne</b>		<25%
<b>Pouvoir calorifique</b>	<b>kWh / tonne</b>	3'600
	<b>kWh / m3</b>	1'080
<b>Masse volumique</b>	<b>kg / m3</b>	300
	<b>m3 / tonne</b>	3.33

Le prix du bois retenu pour la plaquette forestière est de 32 € HT/MWh livré. Il est un peu supérieur aux prix de marché à cause des conditions de dépôtage, des faibles quantités consommées annuellement, et des livraisons par petit volume.

### 3.2 - Cas du granulé de bois

Le bois recherché est du granulé de 6 mm. On privilégiera un granulé de qualité (exemple DIN+, EN+, NF granulés biocombustibles Haute

Performance...), de façon à ce qu'il présente un pouvoir calorifique d'au moins 4.6 MWh/tonne, et intègre le moins possible de liant non ligneux (dans le cas contraire, il y a risque de formation de mâchefers dans le foyer).

### 3.2.1 - Liste de fournisseurs

De nombreux producteurs ou distributeurs sont présents en Franche-Comté et environs.

On pourra par exemple trouver sur la page web suivante :

<http://www.boisenergie-franche-comte.com/filiere-bois-energie-en-franche-comte/cours-nationaux-et-equivalences-energetiques/annuaire-des-entreprises.html>

- **BILLOTTE**  
24 Grande rue  
70400 GRANGES-LE-BOURG
- **Bois-énergie 70**  
9 route de Raze  
70130 VY-LE-FERROUX
- **NONNOTTE Énergie**  
14 rue du Stade  
70000 VELLEFAUX
- **ONF Énergie**  
3 grande rue  
BP 99  
70100 GRAY
- **Scierie GENET**  
14 ZI des Athelots  
70300 LUXEUIL-LES-BAINS
- **THIRIET Loic**  
41 Bas de la Côte  
70320 AILLEVILLERS-ET-LYAUMONT
- **Transprobois "La Buche Fresnoise"**  
52 avenue des Peupliers  
70130 Fresno-Saint-Mamès

### 3.2.2 - Caractéristiques et prix du bois

Nature du combustible		Granulé
Granulométrie moyenne		6 mm x 20 mm de long
Humidité moyenne		<10%
Pouvoir calorifique	kWh / tonne	4'800
	kWh / m3	7'385
Masse volumique	kg / m3	650
	m3 / tonne	1.54

Le prix du bois retenu pour l'étude est un prix de marché de 250 € HT/tonne, soit environ 57 € TTC/MWh. Le granulé est livré en vrac, par soufflage.

## 4 - ÉTUDE TECHNIQUE

Les caractéristiques techniques du projet sont définies ci-après, en fonction des possibilités, des contraintes imposées par le site et le calendrier.

### 4.1 - Rappel des principaux critères à prendre en compte

#### 4.1.1 - Critères calendaires

Pas de contraintes calendaires particulières. La continuité de service pendant la saison de chauffe devra toutefois être assurée. Idéalement les travaux devraient donc être réalisés entre mai et octobre, au moins pour ce qui concerne le chauffage dans les bâtiments (les travaux propres à la chaufferie bois pourront démarrer plus tôt).

À ce stade une réalisation pour l'automne 2018 est envisageable.

#### 4.1.2 - Critères économiques et financiers

- Vu les besoins modestes, il est nécessaire d'**optimiser le coût des travaux** : les choix techniques devront être faits en conséquence ;
- Le projet doit être éligible aux **subventions** bois-énergie ;
- **Le fonctionnement doit rester simple** afin de limiter les coûts d'exploitation.

#### 4.1.3 - Critères imposés par le projet et le site

Un seul emplacement a été envisagé : il s'agit de la **dépendance de la mairie**. Le local est apte à accueillir la chaudière à bois et un silo de stockage, néanmoins des aménagements sont nécessaires (chaufferie, silo, accès depuis l'extérieur...).

Toute autre implantation nécessite soit la construction d'une chaufferie, soit la mise en place d'une chaufferie préfabriquée. On essaiera d'éviter ces solutions pour des raisons économiques et afin de limiter les contraintes architecturales qui pourraient être imposées du fait de la proximité de l'église inscrite aux Monuments Historiques.

**La puissance installée sera inférieure à 70 kW** ce qui de limiter les contraintes réglementaires liées au local. Néanmoins, s'agissant du conduit de fumées et de la proximité de la mairie et des logements, il est souhaitable d'installer la chaudière côté rue afin que l'installation soit conforme au DTU 24.2 (fumisterie). Dans le cas contraire, le conduit de fumée sera très haut (environ 8m) et très visible, ce qui peut poser des problèmes d'intégration architecturale (à moins de ne pas respecter ledit DTU).

### 4.2 - Chaudière bois

Les deux principaux critères de sélection d'un système au bois sont :

- La puissance thermique nécessaire ;
- La nature et la qualité du combustible.

L'installation bois-énergie fonctionnera avec de la plaquette sèche et calibrée, ou du granulé normalisé. La chaudière bois aura les caractéristiques suivantes :

CARACTÉRISTIQUES CHAUDIÈRE BOIS	Plaquette	Granulé
Humidité maximale (sur brut) du combustible	<30 % idéalement <25 %	<10 %
Foyer	Volcan (ou petite grille)	Volcan
Alimentation foyer	Vis	Vis
Transfert du combustible	Vis	Aspiration (ou éventuellement vis), stock tampon attendant à la chaudière
Extraction de silo	Fraise rotative	Gravitaire, éventuellement avec vis selon le type de silo mis en œuvre
Décendrage automatique	Oui	Oui
Régulation	Modulante, sonde lambda	Modulante, sonde lambda
Extracteur de fumées	Oui	Oui
Nettoyage échangeur	Turbulateurs dans les tubes de fumées	Turbulateurs dans les tubes de fumées
Dépoussiérage des fumées	Turbulateurs dans les tubes de fumées	Turbulateurs dans les tubes de fumées
Divers	Hydroaccumulation selon possibilité en chaufferie	Hydroaccumulation selon possibilité en chaufferie

Pour la gamme de puissance considérée, plusieurs modèles - principalement allemands ou autrichiens - existent sur le marché, notamment : Okofen (chaudières granulé exclusivement), Fröling, Hargassner, Herz, KWB, Lindner & Sommerauer...

À noter que dans certains cas les puissances proposées ne correspondent pas exactement à celle du dimensionnement identifié. Le cas échéant, un modèle avec une puissance nominale proche peut être adapté (entre 45 et 55 kW). On prendra soin de choisir une modèle de chaudière capable de piloter un ballon d'hydroaccumulation.

Également, dans cette gamme de puissance on rencontre parfois des chaudières « mixtes » dont la conception permet de brûler indifféremment du granulé ou du bois déchiqueté (sous réserve de réglages adaptés...). Sous réserve que la conception du silo et le système de désilage le permettent.



exemple de chaudière granulé avec réservoir tampon pour le granulé (© Hargassner)

## 4.3 - Bâtiment chaufferie-silo

### 4.3.1 - Implantation

En l'absence d'autres locaux exploitables, l'implantation est réalisée dans la dépendance de la mairie. La dépendance a des dimensions de 7.25 x 3.3 m soit **24 m<sup>2</sup>**. Sur la longueur, au moins 2 m devront être utilisés pour aménager la chaufferie. Le reste peut accueillir le silo

### 4.3.2 - Caractéristiques de la chaufferie bois

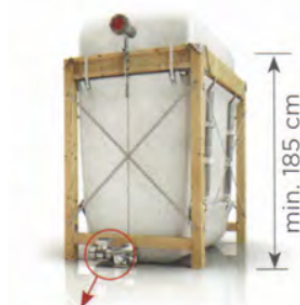
La chaufferie doit pouvoir accueillir la chaudière bois, la panoplie de chauffage et les autres organes hydrauliques et électrique, notamment le ballon d'hydroaccumulation. Elle aura une superficie minimale de 6.5 m<sup>2</sup>. L'agencement final dépendra notamment des dimensions de la chaudière bois retenue.

### 4.3.3 - Caractéristiques du silo

Le tableau ci-après compile les informations relatives aux dimensions du silo, au nombre de livraisons et à l'autonomie.

En version plaquette, un silo à bois doit être maçonné dans la dépendance. Afin qu'il présente une capacité suffisante, il est nécessaire de modifier le bâti, notamment en créant une ouverture pour accéder au local chaufferie. Cette solution aura un impact en termes de coût travaux, mais également sur l'architecture du bâtiment.

En version granulé, on privilégie l'installation d'un silo textile préfabriqué (illustration ci-contre), afin de limiter les travaux nécessaires sur le bâti. Mais il est possible de créer un silo maçonné également, d'une capacité éventuellement supérieur. Le cas échéant, ses dimensions et son implantation devront être pensées de façon à ce qu'il n'y ait pas besoin de modifier en profondeur le bâti (accès au bâtiment, notamment).



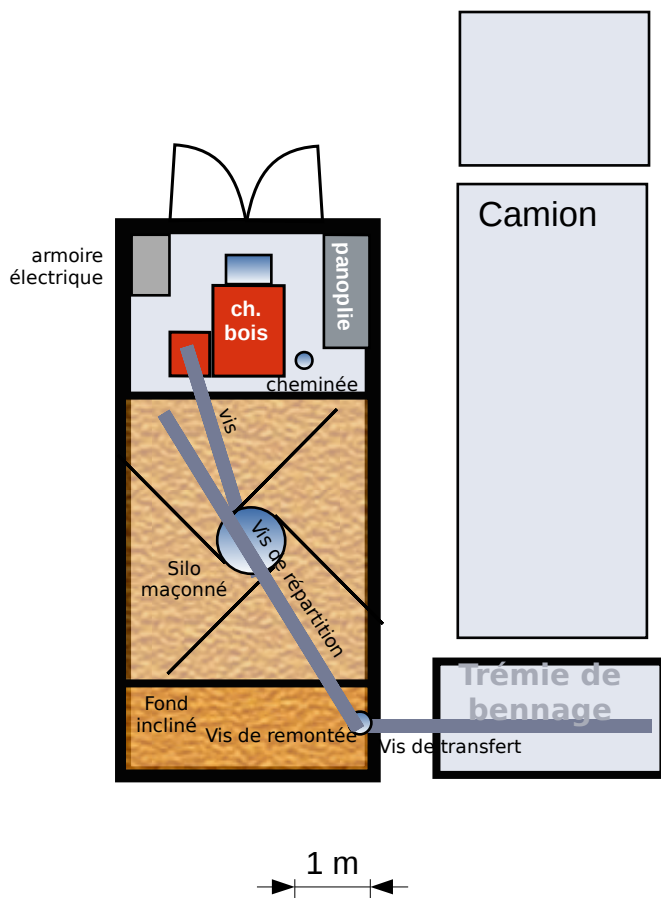
*exemple de silo textile de forte capacité pour granulés de bois (© Okofen)*

CARACTÉRISTIQUES SILO	Silo à plaquette	Silo à granulé
<b>Silo</b>		
Longueur	5.0 m	2.5 m
Largeur	3.3 m	2.5 m
Hauteur de stockage (environ)	3.5 m	2.5 m
Volume total	57.8 m3	15.6 m3
Volume utile	34.7 m3	12.5 m3
<b>Capacité totale</b>	<b>34.7 m3</b>	<b>12.5 m3</b>
<b>soit</b>	<b>22.5 tonnes</b>	<b>8.1 tonnes</b>
<b>Consommation annuelle</b>	<b>103.5 m3</b>	<b>36.8 m3</b>
<b>soit</b>	<b>31.1 tonnes</b>	<b>24.0 tonnes</b>
Livraison unitaire	30 MAP	5.0 tonnes
Nombre de livraisons	3.5	4.8
Consommation maximale	0.06 MAP/h	13.34 kg/h
soit, par jour	1.5 MAP	320.10 kg
Autonomie à pleine puissance	22.8 jours	15.6 jours
Fréquence de livraison réelle en plein hiver	<b>1.5 mois environ</b>	<b>1.5 mois environ</b>

À noter qu'il est possible de créer un silo granulé de plus grande capacité, mais au prix de travaux plus lourds (maçonnerie et pose de cloisons). Cette solution permettrait d'augmenter la capacité de stockage du granulé d'environ 50 %, et donc d'autoriser des livraisons par 10 tonnes. L'autonomie serait alors doublée.

## 4.3.4 - Exemple d'installation et agencement de la chaufferie

### 4.3.4.1 - Solution plaquette



En solution plaquette il est nécessaire de mettre en place une trémie de bennage pour les livraisons de bois. Le combustible déchargé est alors transféré par vis, avec notamment une vis verticale pour charger le silo, et une vis de répartition afin de remplir correctement le silo.

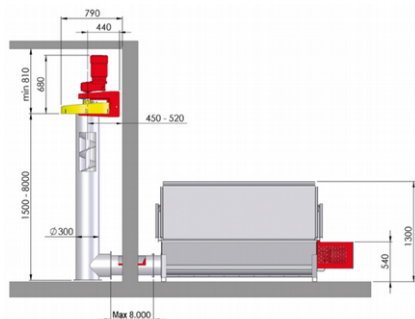
La fraise désilage rotative en fond de silo ne permettra pas de balayer toute sa surface. Une fraise avec des bras élastiques de 4 m permettra d'avoir une surface de travail acceptable. On prévoira l'installation de planches de bois au niveau des murs en pierre, afin que les pâles puissent frotter sans risque de dégradation (le remplacement périodique de ces planches sera nécessaire, leur état devra être contrôlé au moins une fois par an).

La partie non désilée sera équipée d'un fond incliné (plancher), de façon à limiter les volumes morts dans le silo.

L'accès du camion implique la démolition du mur de la cour de la mairie. La trémie de bennage pourra être maçonnée ou chaudronnée. Dans ce dernier cas, à voir la possibilité d'installer une trémie mobile,

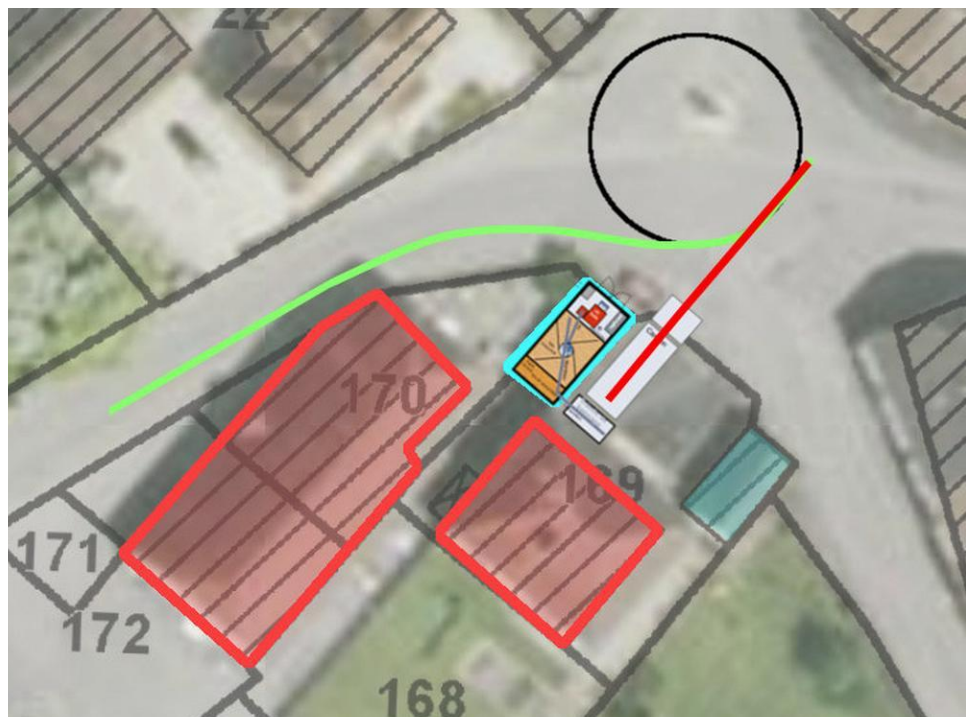
qui pourrait alors être déplacée en dehors des périodes de livraison. À noter que la trémie risquera de gêner passablement l'accès à la rampe PMR la mairie. Le photomontage ci-dessous donne un aperçu de l'installation de la trémie.

S'agissant d'une chaufferie de moins de 70 kW, nous n'avons pas prévu de remplacer la porte en bois.



exemple de système de remplissage avec trémie métallique et vis verticale  
(© Hargassner)

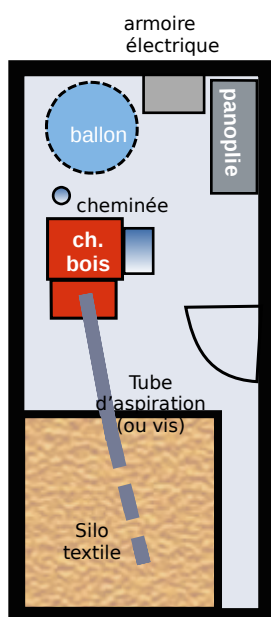




La manœuvre du camion de livraison doit être réalisée depuis la voir publique, avec une marche arrière réalisée depuis le carrefour.

C'est une manœuvre qui peut être dangereuse étant donné la faible visibilité pour des véhicules qui arriveraient de l'ouest, aussi il est nécessaire de la sécuriser : un personnel devra être présent pour prévenir les automobilistes.

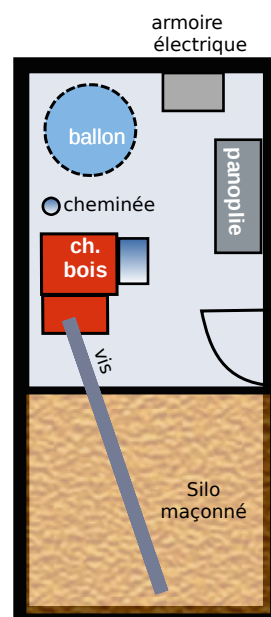
#### 4.3.4.2 - Solution granulé



Ci-contre (gauche) un exemple de configuration de l'ensemble chaufferie + silo dans la dépendance (échelle approximative), avec silo textile.

Alternativement, il est possible de créer un silo maçonné, avec désilage par vis et transfert par aspiration (schéma de droite). Pour cette solution, l'étanchéité du silo devra être assurée, et les parois devront bénéficier d'une finition lisse et antistatique.

À noter que l'installation présentant une puissance inférieure à 70 kW, nous n'avons pas prévu de mise en conformité du local (par rapport à l'arrêté du 23 juin 1978).



1 m

1 m

#### 4.3.5 - Appoint-secours

Pour l'appoint-secours, on propose de déplacer deux des chaudières fioul dans le local qui accueille aujourd'hui les cuves à fioul. Deux ou trois des cuves existantes devront être déposées. La capacité de stockage du fioul sera donc limitée mais ce n'est pas un problème étant donné la consommation annuelle anecdotique sinon inexistante.

#### 4.3.6 - Évacuation des fumées

Les chaudières bois automatiques sont pourvues d'une extraction mécanique ; il sera nécessaire de se conformer aux spécifications du constructeur de la chaudière retenue et à la réglementation en vigueur applicable.

Le conduit de fumée de la chaudière bois sera équipé d'un tubage en accord avec les prescriptions du fabricant retenu (typiquement conduit modulaire en acier double peau isolé), sa hauteur sera conforme au DTU applicable. À noter que le DTU 24.2 préconise que le conduit de fumées soit plus haut de 40 cm de tout obstacle situé à moins de 8 m. Le bâtiment accueillant la chaufferie ne permet pas de respecter discrètement cette hauteur, sauf :

- à construire un conduit de fumée très haut, ce qui serait préjudiciable à l'intégration architecturale du projet ;
- à prévoir un agencement intérieur avec le local chaufferie côté rue. Le conduit de fumée serait alors visible uniquement sur quelques dizaines de centimètres à proximité du faîtage du toit de la dépendance. L'agencement prévu en chaufferie privilégie cette solution.

La couleur du conduit de cheminée visible en toiture devra être sélectionnée de façon à proposer une bonne intégration architecturale. Il est souhaitable de consulter l'Architecte des Bâtiments de France pour obtenir son avis. Il est aussi possible de créer un conduit maçonné, mais nous n'avons pas prévu cette solution afin de ne pas générer de surcoûts inutiles.

#### 4.3.7 - Hydraulique

- Alimentation en eau, compteur et pot d'injection de produits de traitement, jeux de vannes ;
- Sécurité (soupapes, pressostat manque d'eau,...) ;
- Tuyauteries, calorifuge, robinetterie, filtres et pot à boue ;
- Circulateurs et pompes ;
- Ballon d'hydroaccumulation selon possibilité, d'une capacité de 1'500 L à 2'000 L environ. Pour rappel la configuration plaque ne permet pas d'installer un ballon : l'espace en chaufferie est insuffisant.

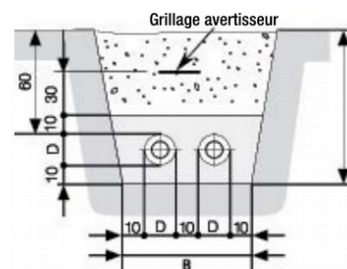
#### 4.3.8 - Électricité / régulation

- Alimentation électrique depuis la mairie ;
- Raccordement des équipements ;
- Régulation chaudière bois ;
- Régulation en débit et température du réseau de liaison avec la mairie et les logements ;
- Éventuellement régulation communicante avec le secondaire des bâtiments (si disponible sur régulation de la chaudière bois) ;
- Dispositif de coupure extérieur ;

## 4.4 - Réseau de chaleur

#### 4.4.1 - Caractéristiques techniques du réseau

Le réseau de chaleur sera réalisé en tubes pré-isolés posés en tranchée sur lit de sable dont une coupe type est représentée sur le plan ci-après. Les tubes du



vue en coupe d'une tranchée de  
réseau de chaleur

réseau de chaleur devront être éloignés au minimum de 25 cm des autres réseaux. Les tubes utilisés pourront être :

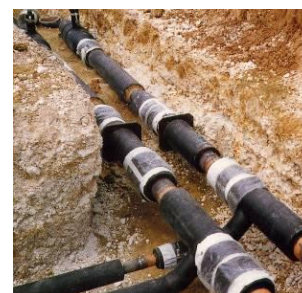
- en **polymère** : ils sont meilleur marché et plus faciles à mettre en place. Mais leur durée de vie dépendra des températures de fonctionnement du réseau de chaleur : plus celles-ci seront élevées, plus leur durée de vie sera limitée. Il est également souhaitable que les tubes soient pourvus d'une barrière anti-oxygène afin de limiter le risque de formation de boues. En configuration bi-tube, une même coquille isolante accueille les tubes aller et retour chauffage ;
- en **acier** : plus chers à l'achat et à la mise en œuvre, mais plus durables ;

Une attention particulière sera portée à la performance et à la durabilité des calorifuges employés, afin de maîtriser les déperditions du réseau et bénéficier d'un bon rendement de réseau. De même, les dispositifs de dilatation (points fixes, lyres...) seront mis en œuvre en tenant compte des prescriptions fabricant.

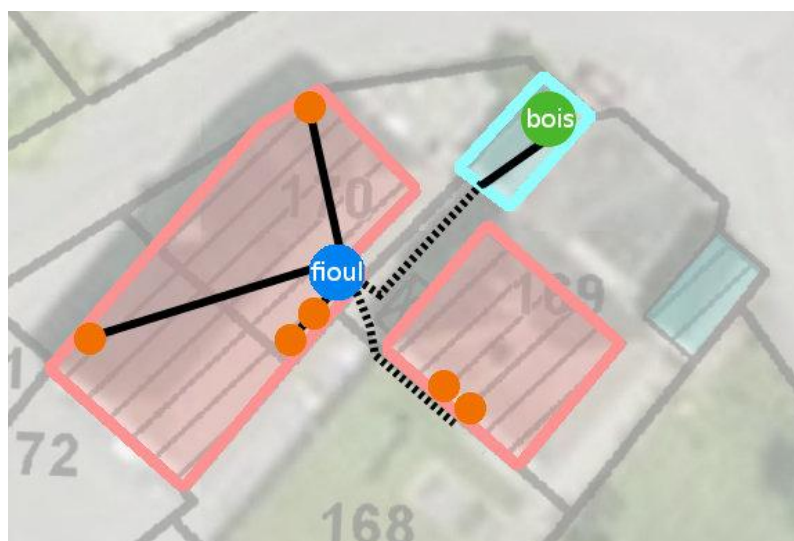
Le réseau au départ de la chaufferie aura une longueur globale enterrée d'environ 38 m. À celui-ci s'ajoute les longueurs nécessaires aux raccordements des sous-stations dans les locaux, qui représentent entre 40 et 60 m, selon le tracé réalisé dans le bâtiment (pour limiter les travaux dans les logements il peut être judicieux de passer les conduites dans les combles). **La longueur totale du réseau de la chaufferie aux sous-stations vaut donc quasiment 100 m.**



bi-tube polymère



réseau en tube acier



Ici, pour les parties enterrées, pour des questions de coût on privilégiera des **bi-tubes polymère**, avec une gestion en température appropriée afin de prolonger leur durée de vie (**protection contre les surchauffes, régulation du réseau en température et débit variables**) et de limiter les déperditions du réseau. Dans les bâtiments, les canalisations pourront être réalisées en tubes métalliques (acier, cuivre) ou polymère (multicouche), calorifugés au moins lorsque des locaux non chauffés sont traversés.

## 4.5 - Sous-stations

### 4.5.1 - Généralités

Les sous-stations constituent l'interface entre le réseau de chaleur dit « primaire » et les réseaux de distribution intérieure dits « secondaires ». Elles sont généralement constituées des organes suivants :

- Échangeur à plaques ou bouteille de découplage (dans le cas d'échangeurs à plaque on privilégiera des modules préfabriqués) ;
- Compteur de chaleur (utilisé pour mesurer les consommations et pour assurer la facturation du chauffage aux occupants) ;



- Équipements hydrauliques (vannes, tuyauteries, calorifuge, circulateur secondaire...) ;
- Alimentation électrique et régulation.

Ici il n'est pas utile d'installer un échangeur, une simple bouteille de découplage peut suffire.

### 4.5.2 - Spécificités des sous-stations

Bâtiment / ensemble	Puissance max	Implantation sous-station	Caractéristiques sous-station
Mairie	14 kW	1 dans la mairie, 1 dans le logement	Raccordement direct sur panoplie existante au niveau des chaudières murales (à déposer). Installation d'un ballon mixte pour la production d'ECS.
Logements	35 kW	Dans chacun des logements (4)	Raccordement direct sur panoplie existante au niveau des chaudières au sol (à déposer). Installation de ballons mixtes pour la production d'ECS.

Pour la production d'ECS, un ballon mixte est nécessaire afin de pouvoir produire l'eau chaude hors saison de chauffe sans maintenir la chaudière bois en fonctionnement (passage manuel à l'électricité). On peut aussi envisager de produire l'ECS estivale à partir des chaudières fioul, mais cette solution n'est pas recommandée à cause des rendements de production et de distribution. Enfin, on peut aussi substituer la production d'eau chaude sanitaire par de simples cumulus électriques (dans ce cas la production d'ECS ne serait plus assurée par la chaufferie).

## 4.6 - Autres travaux

### 4.6.1 - Génie civil et gros œuvre

- Petites démolitions (cloison existante) ;
- Silo à plaquette :
  - construction et aménagement d'un silo maçonné dans le bâtiment ;
  - porte d'accès latérale à murer ;
  - carottages et diverses réservations ;
- Silo à granulé (silo textile) :
  - petites démolitions (cloison existante) ;
  - raccord pompier de remplissage, avec tube (carottage nécessaire) ;
  - évent(s) (carottages nécessaires) ;
  - réservation pour vis d'extraction, grilles de ventilation ;
- Serrurerie diverse (grilles de ventilation...) ;
- Signalétique ;
- ...

### 4.6.2 - Travaux d'adaptation

- Dépose des chaudières, installation de circulateurs et éléments de régulation secondaires associés, ballons d'ECS mixte.

## 4.7 - Obligations réglementaires

### 4.7.1 - Chaufferie bois et stockage du bois

Dans la mesure du possible, la chaufferie devra répondre aux règles de l'art (DTU).

La chaufferie devra répondre aux prescriptions réglementaires en vigueur mais elle n'est pas soumise à l'**arrêté du 23/06/1978** pour les puissances supérieures à 70 kW, ni à la réglementation ERP.

L'article CH 13 de l'**arrêté du 25 juin 1980** concerne le stockage des combustibles solides. Son application implique d'équiper le silo d'une **ventilation** établie dans les mêmes conditions que l'évacuation de l'air vicié de la chaufferie. Ces ouvertures d'aération, disposées au niveau du toit (en surface), permettent l'évacuation de la vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub> s'accumulant en fond de silo, qui se dégagent du tas de bois déchiqueté par fermentation. La conception du silo doit respecter ces prescriptions. Dans la mesure où le granulé de bois sera très sec, la fermentation sera nulle.

### 4.7.2 - Effluents gazeux et solides

Vu la puissance de la chaudière biomasse, aucune valeur limite d'émission n'est imposée. Par assimilation de la réglementation destinées aux installations plus puissantes, il est de bonne pratique de considérer un plafond d'émission de poussières de 150 mg/Nm<sup>3</sup> sec à 11 % d'O<sub>2</sub>, et la conformité des chaudières au moins à la classe 3 de la norme EN 303.5, ou au label Flamme Verte (6 étoiles ou plus). Ces critères sont généralement imposés par les financeurs, lesquels peuvent même imposer des niveaux d'émissions 2 fois inférieurs (50 mg/Nm<sup>3</sup> sec à 6 % d'O<sub>2</sub>; une petite chaudière de qualité utilisant un bois sec respecte ces exigences sans système de filtration additionnelle).

### 4.7.3 - Cendres

Les composants principaux des cendres sont le calcium, la silice, la potasse et le magnésium. Ces éléments sont généralement présents sous forme d'oxydes. Pour leurs valeurs d'engrais, les éléments suivants sont importants : calcium (20 à 25% du poids), potasse (2 à 10%) et phosphore (0.5 à 1.5%).

À noter que leur composition les rend basiques et leur manipulation doit faire l'objet de précaution (masque anti-poussière, gants, lunettes de protection...).

L'utilisation des cendres provenant de la combustion dans les chauffages au bois est en principe possible dans l'agriculture, en tant qu'amendement, sous réserves que leur composition soit normalisée ou homologuée. Ceci n'est possible que pour les installations brûlant du bois à l'état naturel (ce qui est le cas ici). Les conditions à remplir et les quantités à utiliser en épandage agricole peuvent être déterminées en collaboration avec les organismes régionaux de conseil de fumure agricole. Une surface de 100 m<sup>2</sup> peut recevoir 30 litres/an. Des quantités supérieures chargent inutilement les sols.

Le décendrage sera réalisé par **voie sèche**, dans un cendrier métallique de 30 L environ (variable selon les modèles).

CENDRES	Solution plaquette	Solution granulé
Production de cendres	349 kg	158 kg
Volume de cendres	635.4 L	286.6 L
Nombre de cendriers annuels	21.2	9.6
Surface d'épandage correspondante	21 ares	10 ares

La production annuelle n'est pas anodine. Il s'agira d'évacuer les cendres environ toutes les 2 à 3 semaines en version plaquette, et tous les 3 semaines à un mois en version granulé.

## 4.8 - Conclusion de l'étude technique

### 4.8.1 - Sur les choix techniques

L'implantation de la chaufferie est possible dans la dépendance de la mairie. La chaufferie fait moins de 70 kW et elle n'est pas dans un ERP, ce qui simplifie la conception et les travaux à mener sur le bâti. Mais si la puissance de la chaudière bois à installer est la même en version granulé et plaquette, les travaux nécessaires sont sans commune mesure :

- pour la solution au granulé de bois, les travaux sont essentiellement « techniques », avec l'installation des matériels nécessaires mais pas ou peu d'adaptations sur le bâti ;
- pour la solution plaquette, il est nécessaire de modifier substantiellement l'agencement du local, avec la création d'un silo, la condamnation de l'entrée existante, divers travaux pour pouvoir installer une trémie de bennage et les multiples vis de transfert du combustible. Également, il est nécessaire d'aménager un accès à la cour de la mairie, ce qui implique la démolition du muret et de la grille, ce qui n'est pas sans impact pour l'aspect du site. Pour la trémie de bennage, il est possible de privilégier un modèle chaudière, ce qui permettra de limiter les travaux dans la cour et éventuellement la possibilité de la déplacer pour préserver les accès (PMR, notamment) en dehors des périodes de livraison.

L'agencement proposé pour l'ensemble chaufferie+silo tient compte de la contrainte liée à la hauteur du conduit de fumée, en plaçant la chaufferie côté rue plutôt que côté mairie.

La chaufferie bois serait raccordée au bâtiment des logements par l'intermédiaire d'une chaufferie fioul, à créer dans le local actuel des cuves à fioul en y rapatriant 2 des chaudières fioul des logements. Cette chaufferie fioul serait en mesure d'assurer l'appoint et le secours de chaudière bois pour les deux bâtiments (sous réserve que la conception hydraulique du réseau le prévoit).

S'agissant des sous-stations, il est préférable que celles-ci soient directement installées en lieu et place des chaudières actuelles : cela permettra d'éviter la multiplication des circuits dans les bâtiments, et de considérer chacune d'entre elles comme un point de livraison alimenté par le réseau de chaleur. Dans le cas contraire, il s'agirait de travaux de distribution intérieure aux bâtiments, avec le risque que ceux-ci ne puissent pas bénéficier de subventions.

### 4.8.2 - Conduite et entretien

Les solutions proposées imposeront davantage de conduite et de suivi que les actuelles installations de chauffage au fioul et propane. Idéalement :

- une **ronde de vérification** hebdomadaire, voire deux fois par semaine pour la solution bois déchiqueté ;
- la **gestion et le contrôle des livraisons** de bois ;
  - le suivi des stocks et les commandes de combustible ;
  - des livraisons quelques fois par an ;
- la gestion des **cendriers** (évacuation des cendres un peu plus d'une fois par mois) ;
- la planification d'opérations de **gros entretien et maintenance** sur les pièces d'usures, à réaliser préventivement en période estivale (arrêt de la chaudière bois).

Tout ou partie des tâches de conduite, entretien et maintenance peut être confiée à une société spécialisée. Mais s'agissant d'une « grosse installation domestique », on se contentera d'externaliser le ramonage et de confier l'entretien annuel à un professionnel. À noter également la nécessité que les compteurs de chaleur soit périodiquement vérifiés.

### 4.8.3 – Planning de réalisation

Le planning de réalisation du projet pourrait être le suivant :

- d'ici fin février 2018 : décision de lancer le projet ;
- d'ici avril 2018 : consultations d'entreprises ;
- fin mai-septembre 2018 : réalisation des travaux ;
- fin septembre début octobre 2018 : mise en service des installations.

Le planning ci-dessus est réaliste, mais il ne tient pas compte des dossiers de demande de subventions, qui peuvent introduire un délai d'instruction et possiblement un décalage de la mise en service vers la fin de l'année 2018. Le cas échéant, il est possible que le début de la saison de chauffe soit assuré par le fioul : dans ces conditions, les travaux prioritaires concernent le réseau dans les bâtiments et la création de la chaufferie fioul dans l'actuel local des cuves.

## 5 - ANALYSE ÉCONOMIQUE

### 5.1 - Généralités

#### 5.1.1 - Exploitation de chaufferie

Le coût annuel de fonctionnement d'une chaufferie se décompose traditionnellement de la manière suivante :

- **P1** : coût des combustibles ;
  - **P'1** : eau, électricité, etc. nécessaires au fonctionnement de la chaufferie. Nous intégrons ce terme au P2 ;
- **P2** : entretien courant, conduite de chaufferie (exploitation) ;
- **P3** : petites provisions (gros entretien et maintenance programmée) ;
- **P4** : amortissements ou remboursements des investissements (typiquement, amortissements linéaires ou remboursement des annuités d'emprunt).

Le **P1** est un **poste variable** dépendant du prix des énergies et des consommations (en fonction de la rigueur climatique).

Les **P2, P3 et P4** sont des **postes fixes**. On considère ici que pour les gros équipements (chaudières...) il s'agit d'un P3 MRE (maintien et remise en état) : les installations sont maintenues en bon état de fonctionnement. En fin de vie, de nouveaux investissements réalisés dans le cadre d'un nouveau P4 permettront leur renouvellement.

#### 5.1.2 - Taux d'emprunt

On suppose que le taux des emprunts correspond à 1.7 % sur 20 ans (durée équivalente à la durée de vie de la chaudière), soit une annuité moyenne de :

Durée	Taux	Annuité	Intérêts
20.0 ans	1.70%	5.94%	0.94%

#### 5.1.3 - Fiscalité

Selon le Code Général des Impôts, au niveau de l'exploitation :

- les abonnements pour la fourniture d'énergie (électricité) sont assujettis à une TVA de 5.5 % ;
- le combustible bois bénéficie d'une TVA réduite à 10 %;
- les autres postes de dépenses sont soumis au taux normal de 20 %.

### 5.2 - Modes de gestion et montage du projet

S'agissant d'une chaufferie qui n'alimente que des bâtiments communaux (chaufferie dédiée), il semble normal et logique que la commune porte directement le projet : elle en supporterait les investissements et les coûts de fonctionnement. S'agissant des logements, les charges de chauffage serait facturées au réel, au prorata de la consommation de chacun des logements, grâce à des compteurs de chaleur.

#### 5.2.1 - Contrats d'approvisionnement et d'exploitation

Divers marchés de fournitures et prestations de services peuvent être passés pour assurer le fonctionnement et l'entretien des installations :

- des marchés de fourniture de combustibles (P1) ;
- des marchés de prestations pour la conduite, l'entretien (P2), le dépannage, le gros entretien voire le renouvellement des équipements (P3).

Le périmètre et la forme des contrats doivent être définis en amont. Ils peuvent inclure tout ou partie des P1, P2 et P3.

Plusieurs types de contrats existent, il s'agit classiquement :

- de marché de **prestations uniquement** (P2, P3), auquel il faut ajouter des contrats de fourniture de combustibles ;
- de marché **intégrant la fourniture de combustible** (P1) :
  - soit de façon forfaitaire (forfait annuel fixe, éventuellement corrigé de la rigueur climatique) ;
  - soit au réel (marché **combustibles + prestations**) ;
  - soit en **comptage** (prix du MWh fixé contractuellement).

Des garde-fous peuvent être mis en place pour éviter toute dérive de performance (**clauses d'intéressement**).

**La durée du contrat doit être adaptée aux enjeux** : plus le marché intégrera de risques ou de dépenses potentielles pour l'exploitant, plus sa durée aura intérêt à être longue. Ainsi, sans P3 la durée des contrats n'excède pas 5 à 8 ans, alors qu'elle peut monter à 16 ans dans le cas contraire.

Le choix d'un marché d'exploitation dépend de plusieurs critères, parmi lesquels :

- la **capacité technique de personnel** déjà présent sur site (personnel communal) ;
- la **qualité de service** : ici, la qualité de service doit toutefois être raisonnable afin d'éviter tout recours inutile au fioul ;
- le **prix** : un marché qui englobe un large panel de prestations (P1, P2, P3...) est forcément plus onéreux que lorsque ces postes sont traités en interne.

Vu la taille du projet et les modestes enjeux, on privilégiera :

- une **conduite des installations en interne** : il s'agit principalement de la gestion des commandes et des livraisons du combustible, et l'évacuation des cendres ;
- un **contrat d'entretien simple** (entretien de chaudière et autres équipements, ramonage), comprenant également l'entretien annuel des installations, et des prestations en dépannage si nécessaire ;
- des **achats de bois** auprès de fournisseurs locaux.

Les personnes intervenant dans l'exploitation de la chaufferie devront être formées par le fabricant de chaudière et l'installateur de chauffage.

## 5.2.2 - Principaux types de montage

On pourrait envisager typiquement 3 types de montages :

### 5.2.2.1 - Consultation directe d'entreprises

S'agissant d'un projet assez modeste (pas de construction en tant que telle), on peut envisager une consultation directe d'entreprises de chauffage. Afin de pouvoir évaluer les propositions sur des bases comparables, il est souhaitable d'établir au préalable un cahier des charges définissant les attentes de la commune (un programme technique, par exemple).

### 5.2.2.2 - Maîtrise d'œuvre + marché de travaux

Dans ce cas, la conception est confiée à un **bureau d'études** (+ éventuellement architecte, mais ce n'est pas nécessaire ici), qui pourrait également assurer la passation et le suivi du marché de travaux jusqu'à la réception des installations.

Vu la taille du projet, on privilégiera une mission allégée afin de ne pas alourdir inutilement le budget de l'opération. Cependant, le recrutement d'un maître d'œuvre peut être judicieux pour la solution plaquette.

### 5.2.2.3 - Conception-réalisation-entretien-maintenance (CREM)

La conception pourrait être directement confiée à un **groupement d'entreprises**, lequel pourrait aussi assurer ensuite l'exploitation des équipements pour une durée déterminée, avec des engagements sur la performance. Cette solution est plutôt à réserver aux projets complexes et urgents. Le recours à un **AMO** indépendant est indispensable.

### 5.2.2.4 - Cas du projet de la Romaine

Le projet de chaufferie bois étant assez simple dans sa conception et dans ses enjeux, il est possible de consulter directement des entreprises d'installation. Vu les montants en jeu, il est toutefois nécessaire de lancer une procédure adaptée. Et, au minimum, de définir un cahier des charges techniques afin que les entreprises soumettent leurs propositions sur des bases équivalentes, et faciliter ainsi la comparaison des offres. Une phase de négociation peut être judicieuse (elle dépendra du calendrier de réalisation souhaité par la commune), notamment pour ajuster les solutions techniques proposées et les agencements prévus pour la chaufferie et le silo.

## 5.3 - Prix des énergies

Plaquettes de bois	Unité	PU HT	TVA	PU TTC
Prix de marché	tonnes	115.00 €	10.00%	126.50 €
	MWh PCI	31.94 €	10.00%	35.14 €
Granulé de bois	Unité	PU HT	TVA	PU TTC
Prix de marché	tonnes	250.00 €	10.00%	275.00 €
	MWh PCI	52.08 €	10.00%	57.29 €
Électricité tarif bleu	Unité	PU HT	TVA	PU TTC
tarif bleu (prix moyen 2016-2017)	kWh	0.12 €	20.00%	0.15 €
	MWh	123.21 €	20.00%	147.85 €
Fioul	Unité	PU HT	TVA	PU TTC
Prix moyen 2015-2017	litre	0.58 €	20.00%	0.69 €
	MWh PCI	57.69 €	20.00%	69.23 €
Propane	Unité	PU HT	TVA	PU TTC
Prix moyen 2015-2017	tonne	1'466.67 €	20.00%	1'760.00 €
	MWh PCI	113.96 €	20.00%	136.75 €

## 5.4 - Solutions de référence

### 5.4.1 - Investissements

Bâtiment / ensemble	Solution de référence	Budget HT indicatif	TVA <sup>1</sup>	Budget TTC indicatif
<b>Mairie</b>	Renouvellement installations propane (chaudières à condensation avec programmeur hebdomadaire et sonde extérieure de température)	7'600 €	4.0%	7'903 €
<b>Logements</b>	Renouvellement installations fioul (chaudières à condensation avec programmeur hebdomadaire et sonde extérieure de température)	15'200 €	10.0%	16'720 €
<b>TOTAL</b>	<b>Référence</b>	<b>22'800 €</b>		<b>24'623 €</b>

<sup>1</sup> FCTVA déduit le cas échéant, taux de TVA réduit le cas échéant

## 5.4.2 - Fonctionnement

COÛT DE FONCTIONNEMENT RÉFÉRENCE	Besoins	Rendement	Consommation	P1	P2	P3	P4	Total	€ TTC / MWh
Mairie	13.3 MWh	90%	15 MWh	2'021 €	200 €	76 €	469 €	2'766 €	208.00 €
Logements	65.9 MWh	88%	75 MWh	5'184 €	400 €	182 €	993 €	6'760 €	102.58 €
<b>TOTAL référence</b>	<b>79.2 MWh</b>		<b>90 MWh</b>	<b>7'205 €</b>	<b>600 €</b>	<b>258 €</b>	<b>1'463 €</b>	<b>9'367 €</b>	<b>118.27 €</b>

## 5.5 - Montants estimatifs d'investissements bois-énergie

	Solutions plaquettes	Solution granulés
<b>Chaudières bois et équipements</b>	<b>41'000 €</b>	<b>19'000 €</b>
Chaudière(s) bois	22'000 €	13'000 €
Désilage, convoyage, alimentation en bois	6'000 €	5'000 €
Équipements connexes	13'000 €	1'000 €
<b>Équipements chaufferie</b>	<b>19'500 €</b>	<b>20'500 €</b>
Évacuation des fumées	3'500 €	3'500 €
Appoint-secours (déplacement de 2 chaudières)	4'000 €	4'000 €
Hydraulique (raccordements, ballon tampon...)	6'500 €	8'500 €
Électricité, régulation	5'500 €	4'500 €
<b>Réseau de chaleur et sous-stations</b>	<b>32'500 €</b>	<b>32'500 €</b>
Tranchées et tubes pré-isolés <sup>2</sup>	11'500 €	11'500 €
Sous-stations et raccordement (yc dépose)	21'000 €	21'000 €
<b>Distribution intérieure<sup>3</sup></b>	<b>0 €</b>	<b>0 €</b>
Travaux de conversion et distribution	0 €	0 €
<b>Bâtiment chaufferie silo</b>	<b>31'630 €</b>	<b>6'030 €</b>
Terrassements, VRD, accès, abords	10'000 €	1'500 €
Gros œuvre, serrurerie, aménagement du bâti	18'000 €	3'000 €
Autres équipements, divers et imprévus	3'630 €	1'530 €
<b>Prestations intellectuelles et autres</b>	<b>12'463 €</b>	<b>6'242 €</b>
<b>TOTAL € HT</b>	<b>137'093 €</b>	<b>84'272 €</b>
<b>TOTAL € TTC<sup>4</sup></b>	<b>137'525 €</b>	<b>84'538 €</b>
<b>Surcoût par rapport à la référence</b>	<b>112'902 €</b>	<b>59'915 €</b>

En version granulé, on peut éventuellement réduire un peu les coûts d'investissement en supprimant les chaudières fioul de secours.

## 5.6 - Aides au financement

### 5.6.1 - Les aides locales et FEDER

En 2018, le projet est éligible à des aides du FEDER (qui sont gérées par la Région), à condition que d'autres financeurs interviennent. En 2017, le Contrat de Plan État-Région permettait quant à lui de financer les projets bois-énergie via des contributions de la Région et de l'ADEME. On suppose que les conditions de 2017 sont reconduites en 2018.

<sup>2</sup> Y compris liaisons hydrauliques dans les bâtiments

<sup>3</sup> Généralement non éligible aux subventions. Les travaux d'adaptation sont pris en charge dans le poste « sous-stations et raccordement »

<sup>4</sup> FCTVA déduit

Dans ces circonstances, le projet pourrait bénéficier, au maximum, de 80 % d'aides à l'investissement.

Pour le FEDER, les installations d'appoint-secours (fioul...) ne sont pas éligibles aux aides, et le temps de retour sur investissement (TRB) est limité à 7 ans. On peut espérer environ 40 % d'aides sur les dépenses éligibles (le FEDER peut financer jusqu'à 50 % des coûts éligibles).

Pour le CPER, la Région peut apporter jusqu'à 50 % d'aides et l'ADEME jusqu'à 65 % sur les coûts éligibles. Dans tous les cas le taux global d'aides à l'investissement ne pourra pas dépasser 80 % du coût du projet. Par ailleurs, pour le granulé le temps de retour sur investissement est plafonné à 8 ans.

### 5.6.2 - Conclusion pour les aides au financement

Les aides sur 2018 sont très attractives grâce aux dispositifs en vigueur. Les modalités peuvent toutefois évoluer d'ici à la réalisation du projet. Nous réalisons la suite de l'étude en considérant un taux d'aide « réaliste ».

AIDES AU FINANCEMENT	Plaquettes	Granulé
<b>Coût du projet TTC</b>	<b>137'525 €</b>	<b>84'538 €</b>
<b>Surcoût HT du projet</b>	114'293 €	61'472 €
<b>AIDES LOCALES</b>		
<b>Montant éligible FEDER</b>	132'693 €	79'952 €
<b>Aides FEDER (supposé 40%)</b>	53'077 €	31'981 €
<b>Montant maximal aides CPER (plafond 80%-FEDER)</b>	56'597 €	35'437 €
<b>Aides globales potentielles FEDER + CPER</b>	<b>109'674 €</b>	<b>67'418 €</b>
<b>Surcoût sur dépenses éligibles</b>	109'893 €	57'152 €
<b>Économie sur P1+P2+P3 TTC</b>	1'672 €	550 €
<b>Plafonnement des aides par rapport au TRB (surcoût sur dépenses éligibles / économie P1+P2+P3 TTC)</b>	<b>98'190 €</b>	<b>52'753 €</b>
<b>Montant retenu pour les aides locales</b>	<b>98'190 €</b>	<b>52'753 €</b>
<b>TOTAL DES FINANCEMENTS</b>		
<b>TOTAL</b>	<b>98'190 €</b>	<b>52'753 €</b>
<b>Soit un taux effectif total de</b>	<b>71%</b>	<b>62%</b>
<b>Solde à financer</b>	<b>39'335 €</b>	<b>31'785 €</b>

Il apparaît que les subventions seraient plafonnées par rapport au temps de retour sur investissement.

## 5.7 - Coûts de fonctionnement de la solution bois-énergie

COÛT ANNUEL D'EXPLOITATION	Plaquette	Granulé
<b>P1 TTC</b>	<b>4'280 €</b>	<b>6'312 €</b>
Prix bois	35.14 €	57.29 €
Conso bois	112 MWh	110 MWh
P1 bois	3'930 €	6'312 €
Prix appoint-secours	69.23 €	69.23 €
Conso appoint-secours	5 MWh	0 MWh
P1 appoint-secours	350 €	0 €
<b>P2 TTC</b>	<b>1'401 €</b>	<b>885 €</b>
Charges de personnel <sup>5</sup>	Temps masqué	Temps masqué
Travaux sous-traités	800 €	550 €
Consommables divers	80 €	30 €
Assurances	80 €	60 €
Divers	100 €	40 €
Électricité, abonnements et autres frais	341 €	205 €
<b>P3 TTC (petites provisions)</b>	<b>711 €</b>	<b>316 €</b>
<b>P4</b>	<b>2'337 €</b>	<b>1'888 €</b>
<b>Total annuel TTC</b>	<b>8'728 €</b>	<b>9'402 €</b>
Chaleur livrée	79.2 MWh	79.2 MWh
<b>Coût moyen TTC du MWh</b>	<b>110.21 €/MWh</b>	<b>118.71 €/MWh</b>

## 5.8 - Analyse et critères de comparaison

Du point de vue global, la solution plaquette semble la plus compétitive.

L'analyse qui suit est menée du point de vue de la commune **en tant que porteur du projet** : la commune porte les investissements, elle peut raisonner en surcoût. Celui-ci est amorti en fonction de l'économie générée sur les postes P1+P2+P3+intérêts P4.

On évalue également l'intérêt de l'opération pour la facture de chauffage des logements.

<sup>5</sup> Conduite en interne

## 5.8.1 - Approche en surcoût et rentabilité brute du projet

On raisonne ici en surcoût d'investissement et économie de fonctionnement sur P1+P2+P3+intérêts P4. Ce raisonnement est valide si c'est la commune qui porte le projet et les investissements, sans distinction des coûts de chauffage refacturés aux occupants des logements.

### 5.8.1.1 - Rentabilité brute du projet

RENTABILITÉ	Plaquette		Granulé	
	Sans subventions	Avec subventions	Sans subventions	Avec subventions
<b>Coût du projet subventions déduites</b>	137'525 €	39'335 €	84'538 €	31'785 €
<b>Coût de la solution de référence</b>	24'623 €	24'623 €	24'623 €	24'623 €
<b>Surcoût bois - référence</b>	112'902 €	14'712 €	59'915 €	7'162 €
<b>Coût annuel de fonctionnement P1+P2+P3+ intérêts P4 au bois</b>	<b>7'685 €</b>	<b>6'762 €</b>	<b>8'308 €</b>	<b>7'813 €</b>
<b>Coût annuel de fonctionnement P1+P2+P3+ intérêts P4 référence</b>	<b>8'295 €</b>	<b>8'295 €</b>	<b>8'295 €</b>	<b>8'295 €</b>
<b>Économie annuelle</b>	<b>611 €</b>	<b>1'534 €</b>	<b>-13 €</b>	<b>483 €</b>
<b>TRB du projet</b>	184.9 ans	9.6 ans		14.8 ans

### 5.8.1.2 - Rentabilité en fonction du taux de subventions

RENTABILITÉ	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
<b>Solde à financer plaquette</b>	137'525 €	123'773 €	110'020 €	96'268 €	82'515 €	68'763 €	55'010 €	41'258 €	27'505 €
<b>Surcoût du projet subventions déduites</b>	112'902 €	99'149 €	85'397 €	71'644 €	57'892 €	44'139 €	30'387 €	16'634 €	2'882 €
<b>Économie annuelle sur P1+P2+P3+ intérêts P4</b>	<b>611 €</b>	<b>740 €</b>	<b>869 €</b>	<b>998 €</b>	<b>1'128 €</b>	<b>1'257 €</b>	<b>1'386 €</b>	<b>1'516 €</b>	<b>1'645 €</b>
<b>TRB du projet plaquettes</b>	<b>185 ans</b>	<b>134 ans</b>	<b>98 ans</b>	<b>72 ans</b>	<b>51 ans</b>	<b>35 ans</b>	<b>22 ans</b>	<b>11 ans</b>	<b>2 ans</b>
<b>Solde à financer granulé</b>	84'538 €	76'084 €	67'630 €	59'177 €	50'723 €	42'269 €	33'815 €	25'361 €	16'908 €
<b>Surcoût du projet subventions déduites</b>	59'915 €	51'461 €	43'007 €	34'553 €	26'100 €	17'646 €	9'192 €	738 €	<b>-7'716 €</b>
<b>Économie annuelle sur P1+P2+P3+ intérêts P4</b>	<b>-13 €</b>	<b>66 €</b>	<b>146 €</b>	<b>225 €</b>	<b>305 €</b>	<b>384 €</b>	<b>464 €</b>	<b>543 €</b>	<b>622 €</b>
<b>TRB du projet granulé</b>		<b>778 ans</b>	<b>295 ans</b>	<b>153 ans</b>	<b>86 ans</b>	<b>46 ans</b>	<b>20 ans</b>	<b>1 ans</b>	<b>immédiat</b>

## 5.8.2 - Approche en coût global

Ici on raisonne en coût total P1+P2+P3+P4, sur la durée de vie prévisionnelle de la chaudière (20 ans).

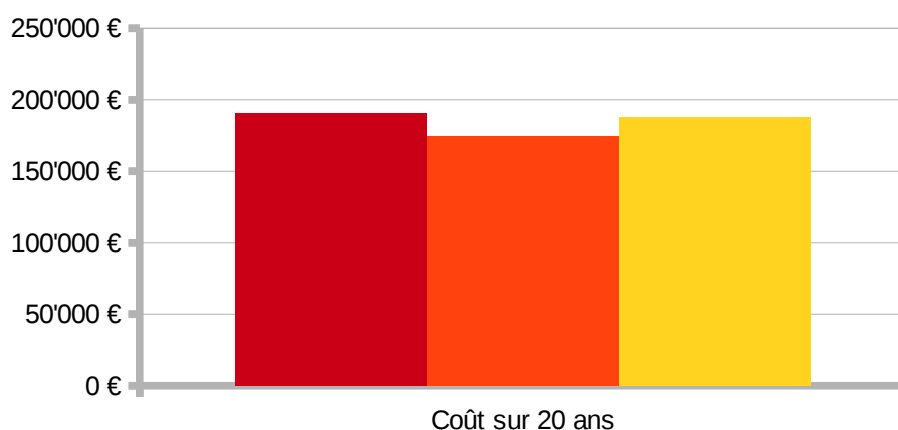
### 5.8.2.1 - Comparaison des coûts annuels

COÛT ANNUEL	Plaquette		Granulé	
	Sans sub-ventions	Avec sub-ventions	Sans sub-ventions	Avec sub-ventions
Coût annuel de fonctionnement P1+P2+P3+P4 au bois	14'561 €	8'728 €	12'535 €	9'402 €
Coût annuel de fonctionnement P1+P2+P3+P4 référence	9'526 €	9'526 €	9'526 €	9'526 €
Économie annuelle	-5'035 €	798 €	-3'009 €	125 €

### 5.8.2.2 - Coût sur 20 ans (hors actualisation)

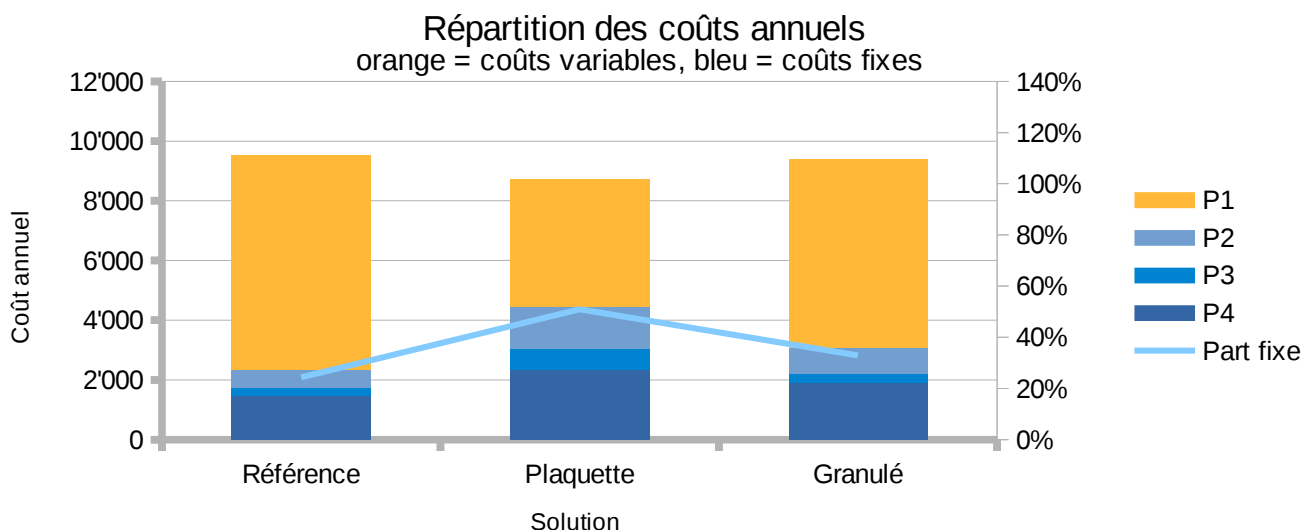
Bâtiment / ensemble	Référence	Plaquette	Granulé
Coût sur 20 ans	190'526 €	174'566 €	188'036 €
Économie		15'960 €	2'490 €

Coût sur 20 ans hors actualisation



### 5.8.2.3 - Volatilité des dépenses

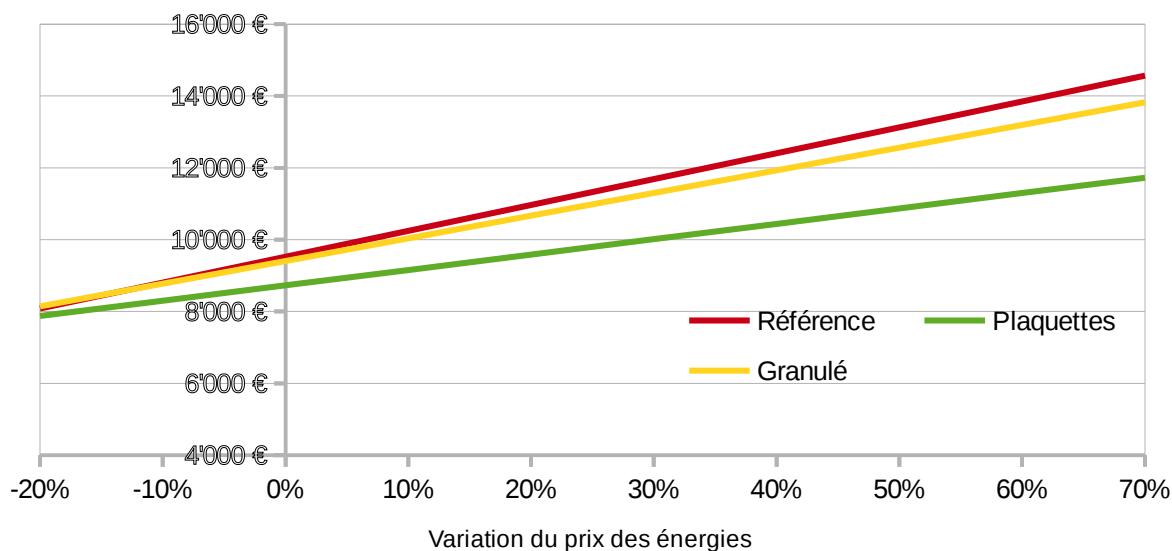
Poste	Référence	Plaquette	Granulé
P1	7'205 €	4'280 €	6'312 €
P2	600 €	1'401 €	885 €
P3	258 €	711 €	316 €
P4	1'463 €	2'337 €	1'888 €
Total	9'526 €	8'728 €	9'402 €
Part fixe	24%	51%	33%



Les coûts annuels un peu plus stables avec la chaufferie bois, grâce à une part fixe qui représente environ un tiers du coût annuel, contre seulement 1/4 pour la référence.

Variation du prix des énergies	-20%	-10%	+0%	+10%	+20%	+30%	+40%	+50%	+60%	+70%
Référence	8'085 €	8'806 €	9'526 €	10'247 €	10'967 €	11'688 €	12'408 €	13'129 €	13'849 €	14'570 €
Plaquettes	7'872 €	8'300 €	8'728 €	9'156 €	9'584 €	10'012 €	10'440 €	10'868 €	11'296 €	11'724 €
Granulé	8'139 €	8'771 €	9'402 €	10'033 €	10'664 €	11'295 €	11'927 €	12'558 €	13'189 €	13'820 €

### Coût annuel en fonction de l'évolutions du prix des énergies



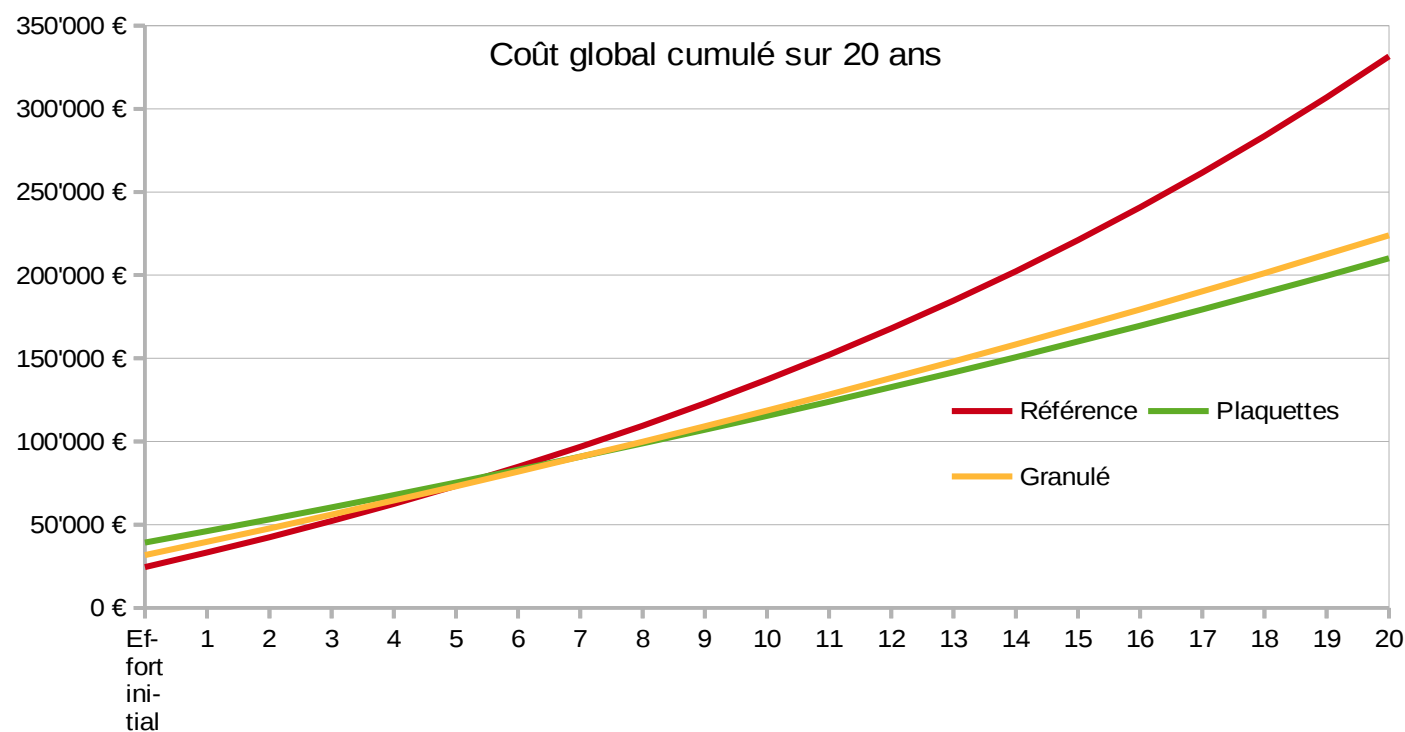
### 5.8.3 - Coûts actualisés sur 20 ans

Coût global avec actualisation de 6 % par an sur les énergies fossiles (fioul, propane) et 2 % par an pour le bois et les frais fixes (P2, P3). À noter que la contribution climat-énergie va déjà induire une augmentation du prix du fioul de plus de 5 % au premier janvier 2018, sans tenir compte de la variation probable du prix du pétrole.

<b>Augmentation énergies fossiles</b>	6.0%	<b>Augmentation bois</b>	2.0%	<b>Augmentation frais fixes (P2, P3)</b>	2.0%
---------------------------------------	------	--------------------------	------	--	------

Années	Effort initial	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Référence	24'623	33'368	42'588	52'312	62'569	73'391	84'810	96'861	109'583	123'013	137'195	152'171	167'990	184'700	202'355	221'009	240'723	261'559	283'582	306'865	331'480
Plaquettes	39'335	46'239	53'288	60'486	67'838	75'346	83'017	90'853	98'860	107'042	115'403	123'950	132'687	141'619	150'752	160'093	169'646	179'419	189'418	199'649	210'119
Granulé	31'785	39'748	47'864	56'136	64'568	73'163	81'923	90'853	99'955	109'234	118'692	128'333	138'161	148'180	158'393	168'804	179'418	190'237	201'268	212'513	223'976

Le temps de retour actualisé serait d'environ 5 ans pour la solution au granulé de bois, et de 6 ans pour la solution plaquettes.



## 5.8.4 - Répartition des charges avec les locataires des logements

### 5.8.4.1 - Aux prix actuels des énergies

En tant que bailleur, la commune peut récupérer les charges de chauffage portant sur les postes P1 et P2. Les P3 et P4 restent donc à sa charge. Cette approche peut modifier le regard à porter sur le projet : c'est la commune qui va récupérer la gestion des charges de chauffage. Les baux de location devront faire l'objet d'un avenant pour refléter ce changement de situation.

En pratique, une partie des charges de chauffage sera donc imputée aux locataires au prorata de leur consommation d'énergie. La commune supportera le reste, au prorata de sa consommation pour ce qui concerne les P1 et P2, et elle conservera le gros entretien ainsi que le financement des installations.

	Référence	Plaquette	Granulé
<b>Chaleur utile</b>	79.2 MWh	79.2 MWh	79.2 MWh
<b>Besoins de chaleur des logements</b>	74.7 MWh	74.7 MWh	74.7 MWh
<b>À charge des locataires (P1+P2 logements)</b>	<b>7'360 €</b>	<b>5'356 €</b>	<b>6'787 €</b>
<b>Économie pour les locataires</b>		<b>2'003 €</b>	<b>573 €</b>
<b>Besoins de chaleur de la mairie</b>	4.5 MWh	4.5 MWh	4.5 MWh
<b>À charge de la commune (P1+P2 mairie, P3, intérêts P4)</b>	<b>936 €</b>	<b>1'405 €</b>	<b>1'026 €</b>
<b>Économie pour la commune</b>		<b>-470 €</b>	<b>-90 €</b>
<b>Rentabilité effective pour la mairie</b>		Non rentable	Quasi-neutre

Avec cette approche on constate que l'opération est quasi-neutre pour la commune avec la solution au granulé, mais aux prix actuels des énergies l'économie pour les locataires est limitée (elle profite principalement au logement chauffé au propane).

La version plaquette permettrait aux locataires de bénéficier d'une économie substantielle sur leur facture de chauffage, mais elle coûterait plus cher à la commune.

### 5.8.4.2 - Répartitions des charges actualisées sur 20 ans

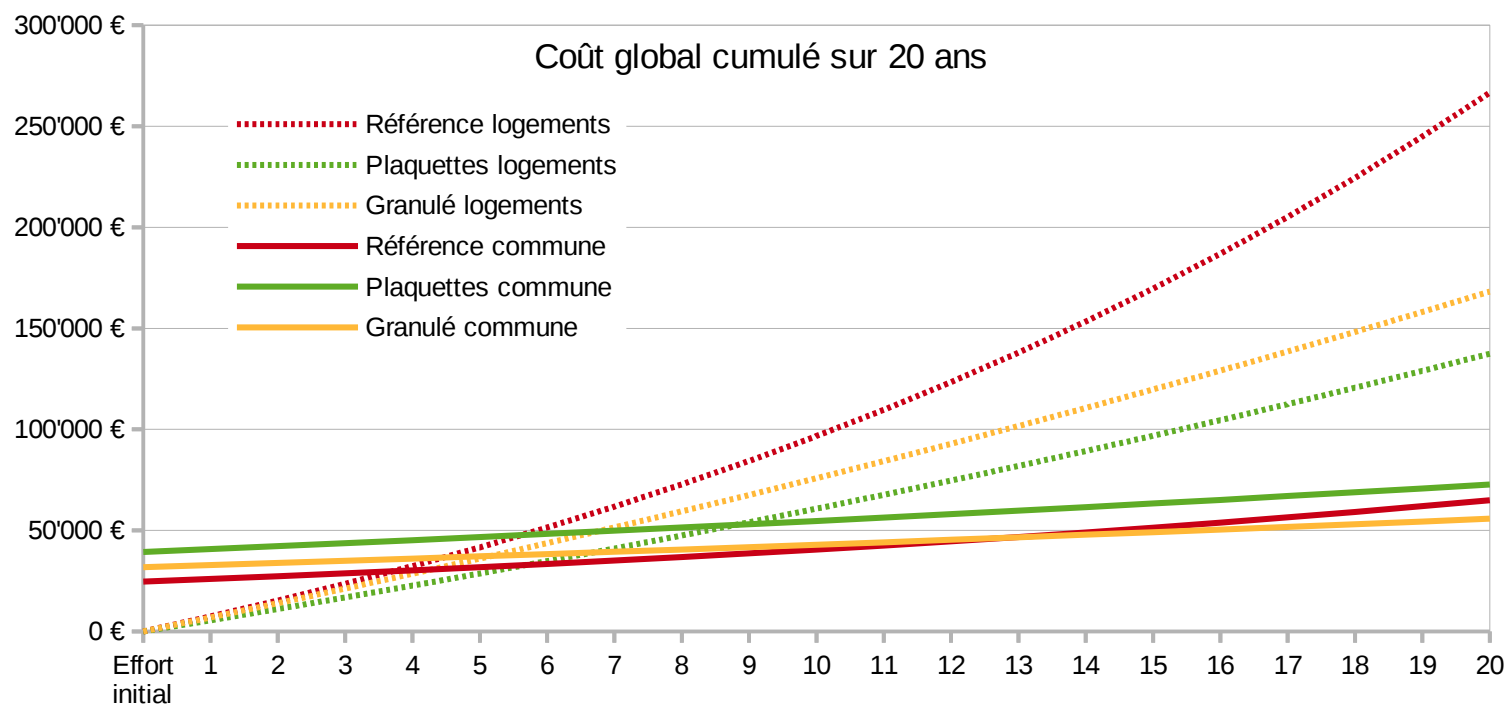
En reprenant les mêmes hypothèses d'actualisation que précédemment, on obtient :

<b>Augmentation énergies fossiles</b>	6.0%	<b>Augmentation bois</b>	2.0%	<b>Augmentation frais fixes (P2, P3)</b>	2.0%
---------------------------------------	------	--------------------------	------	--	------

Années	Effort initial	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Référence logements	0	7'419	15'263	23'557	32'327	41'602	51'411	61'787	72'762	84'371	96'654	109'649	123'399	137'949	153'345	169'639	186'884	205'136	224'456	244'905	266'553
Plaquettes logements	0	5'477	11'077	16'804	22'662	28'653	34'782	41'052	47'467	54'032	60'750	67'627	74'666	81'872	89'251	96'807	104'546	112'474	120'595	128'917	137'445
Granulé logements	0	6'923	13'983	21'186	28'532	36'025	43'668	51'464	59'416	67'527	75'800	84'238	92'845	101'625	110'580	119'714	129'031	138'534	148'227	158'114	168'199
Référence commune	24'623	25'949	27'325	28'755	30'242	31'789	33'398	35'075	36'821	38'642	40'541	42'522	44'591	46'751	49'009	51'370	53'839	56'422	59'127	61'959	64'927
Plaquettes commune	39'335	40'762	42'211	43'682	45'176	46'693	48'235	49'801	51'393	53'010	54'653	56'323	58'021	59'747	61'501	63'286	65'100	66'945	68'822	70'732	72'675
Granulé commune	31'785	32'825	33'881	34'951	36'036	37'138	38'255	39'389	40'540	41'707	42'892	44'095	45'316	46'555	47'813	49'090	50'387	51'704	53'041	54'399	55'778

Sur le long terme, on remarque que :

- pour les logements le granulé gagnerait en compétitivité face au fioul, et au final coûterait globalement moins cher à commune. C'est donc un compromis acceptable.
- le bois déchiqueté serait plus compétitif que le granulé pour les logements, mais resterait plus cher que le fioul et le granulé pour la commune.



### 5.8.5 - Aspects environnementaux

Le bois est considéré comme une énergie renouvelable car le CO<sub>2</sub> émis lors de sa combustion correspond à celui absorbé par l'arbre lors de sa croissance (sous réserve d'une gestion durable des forêts dont il est issu).

La substitution d'une énergie fossile par le bois permet donc d'éviter l'émission de CO<sub>2</sub>.

	Référence	Solution bois
Émissions de CO2 annuelles	24.7 tonnes	0.4 tonnes
Équivalent <sup>6</sup>	12 voitures	0 voitures
Émissions évitées		24.3 tonnes
Équivalent		12 voitures
Sur 20 ans		486 teqCO2

## 5.9 - Conclusion de l'analyse économique

L'analyse économique produit plusieurs conclusions :

- la solution à granulé de bois est pertinente face au renouvellement des installations existantes :
  - subventions déduites, pour la commune elle reste un peu plus chère à l'investissement que le fioul ;
  - elle ne permet pas de générer d'économie significative dans l'immédiat car le prix du fioul était relativement bas ces dernières années ;
  - mais avec la hausse probable du prix des énergies fossiles (notamment à cause de la CCE), à terme elle représente un bon compromis pour la commune ;
- la solution plaquette est beaucoup plus onéreuse à l'investissement :
  - elle pourrait cependant bénéficier d'un taux d'aide plus conséquent (environ +10 % par rapport à la solution granulé) ;
  - elle permettrait de bénéficier d'un combustible meilleur marché, qui se traduirait par une économie importante pour les locataires ;
  - en contrepartie, elle coûterait beaucoup plus cher à la commune, même sur le long terme.

<sup>6</sup> Nombre de voitures parcourant 15'000 km par an

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude de faisabilité indique d'une **chaudière bois de 50 kW** devra être installée pour satisfaire les besoins des deux bâtiments. Avec le foisonnement des besoins, il ne devrait pas être nécessaire de prévoir une énergie ap-point, mais on propose de réutiliser deux des chaudières fioul existantes, en secours.

La chaufferie peut être créée dans la dépendance de la mairie, mais avec plus ou moins de facilité selon que le combustible prévu est le granulé ou la plaquette :

- **en granulé**, il s'agit essentiellement d'un aménagement du local, dans lequel un silo textile peut être installé. **À l'usage c'est une solution pratique qui demande peu de suivi ;**
- **en plaquette**, il est nécessaire de recourir à plusieurs vis de transfert du bois, de construire un silo dans le local, et d'installer une trémie de bennage à l'extérieur tout en aménageant un accès camion pour les livraisons. **C'est une installation complexe pour un projet de cette taille**, par ailleurs il faudra être vigilant sur la gestion de la fourniture de bois car la capacité de stockage est limitée (le stock de sécurité est faible).

Si le projet plaquette coûte 50 % de plus à l'investissement que la solution granulé, il devrait aussi bénéficier d'un peu plus d'aides à l'investissement et au final le solde à financer par la commune ne serait différent que de quelques milliers d'euros. Si elle apparaît bien plus attractive du point de vue des occupants des logements, du point de vue de la seule commune c'est un investissement qui n'est pas rentable dans la durée.

### Au final :

- la solution granulé est simple à mettre en œuvre et à exploiter, et son impact sur le site est quasiment in-existant. Elle n'est pas beaucoup plus chère que le renouvellement des installations existantes et elle est attractive dans la durée à la fois pour la commune et ses locataires ;
- la solution plaquette est bien plus compliquée à mettre en œuvre et à exploiter, elle suppose des modifications importantes sur le site, lesquelles vont altérer son caractère architecturale. Elle assez chère à l'investissement, et ne profiterait réellement qu'au locataires.

**On recommande donc de réaliser le projet de chaufferie bois en créant une chaufferie au granulé : c'est la solution la plus indiquée étant donné les caractéristiques du site et du projet.**

Samuel BENOIT, le 26 janvier 2018.

## ANNEXES

## ANNEXE 1 - Petit glossaire

### Unité d'énergie

L'unité utilisée en France est le **kilowattheure** (kWh) : c'est la quantité d'énergie dégagée en une heure par un appareil de puissance 1 kW.

Le multiple est le **mégawattheure** (MWh) = 1'000 kWh

Autre unité légale : le Joule (J) : c'est la quantité d'énergie dégagée en une seconde par un appareil d'une puissance de 1 Watt.

Facteur de conversion       $3'600 \text{ J} = 1 \text{ Wh}$        $3.6 \text{ MJ} = 1 \text{ kWh}$        $1 \text{ MJ} = 0.2778 \text{ kWh}$

### PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète de l'unité de masse (ou de volume) de celui-ci.

On distingue le pouvoir Calorifique Supérieur (PCS), lorsque l'on valorise la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées humides produites par la combustion. Cette chaleur n'est utilisable que dans des « chaudières à condensation ».

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) ne prend pas en compte la chaleur latente, et en pratique, c'est cette valeur qu'il convient de prendre en compte.

Le PCI est généralement exprimé en kWh/kg (ou kWh/tonne ou kWh/litre ou kWh/m<sup>3</sup>).

### Puissance

La puissance d'un appareil est la quantité d'énergie disponible ou émise par unité de temps.

Pour une chaudière : l'énergie sous forme de chaleur transmise à l'eau de circulation

Pour un émetteur (radiateur, aérotherme, plancher chauffant...), énergie sous forme de chaleur cédée à l'ambiance.

La puissance s'exprime en kW (unité légale). Une ancienne unité est la kilocalorie par heure (kcal/h).

Facteur de conversion de kW à kcal/h :  $1 \text{ kW} = 0.86 \text{ kcal/h}$

Facteur de conversion de kcal/h à kW :  $1 \text{ kcal/h} = 1.1626 \text{ kW}$

### Rendement chaudière

Le rendement d'une chaudière est le rapport entre la quantité de chaleur utilisable et celle contenue dans le combustible. Il s'exprime en %. L'énergie contenue dans le combustible est généralement exprimée en valeur PCI. Il s'agit du rendement PCI.

Les différentes pertes de chaleur sont principalement :

- pertes par la chaleur des fumées chaudes envoyées à la cheminée ;
- pertes par les imbrûlés (gazeux ou solides) ;
- pertes par rayonnement de la chaudière.

Il convient également de distinguer le rendement instantané du rendement moyen annuel qui intègre les pertes à l'arrêt de la chaudière.

## Humidité du bois

Quantité d'eau contenue dans le bois exprimé en % définie par deux valeurs :

- hygrométrie sur anhydre (atro dans la littérature germanique « absolut troknet) : masse d'eau que renferme un kg bois sec à 0% ;
- hygrométrie sur brut (ou hygrométrie relative HR) : masse d'eau contenue dans un kilo de bois humide (humidité plus couramment utilisé en France).

Exemple : un échantillon de 25 kg de bois humide contient 5 kg d'eau.

Hygrométrie sur brut (HR) :  $5 \text{ kg eau} / 25 \text{ kg bois brut} = 20\%$

Hygrométrie sur anhydre (atro)  $5 \text{ kg eau} / (25-5) \text{ kg de bois sec} = 25\%$ .

## Degré Jour Unifié (DJU)

Caractérise la rigueur du climat. La quantité de chaleur à apporter à un bâtiment est théoriquement proportionnelle à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur (à 18°C). Cet écart de température moyen pour une journée est une donnée météorologique calculée par Météo France appelée DJU (base 18°C).

Si la température moyenne extérieure est de 2°C, le DJU de la journée est :  $18-2 = 16$ .

La quantité de chaleur nécessaire au chauffage d'un bâtiment durant une saison de chauffe est proportionnelle au DJU de la période.

## Données météorologiques

Situation géographique	Haute-Saône
Stations	Luxeuil
Zone	H1b
Altitude du site (m)	220 m
Température extérieure de base (°C)	-12°C
Degrés Jour Unifiés base 18	2'779 (moyenne annuelle hors été, 2014-2017)

## Rendement annuel

Nous rappelons ici la définition du rendement annuel du système de chauffage, issue des règles de calcul thermique DTU Th C.

Le rendement du système de chauffage est égal au rapport entre les besoins réels de chauffage et l'énergie consommée. Si l'on remonte de ces besoins, c'est-à-dire des pièces, à l'énergie consommée, c'est-à-dire au générateur, le rendement apparaît comme le produit des rendements successifs d'émission, de régulation, de distribution et de génération :  $R_{ch} = R_e \cdot R_r \cdot R_{dc} \cdot R_{gc}$

**Le rendement d'émission**, traduit l'incidence du mode d'émission de la chaleur dans une pièce sur les déperditions de celle-ci, pour un même confort. Il est pris égal à 1 pour un émetteur de référence. Pour tout autre émetteur, il est égal au rapport entre les déperditions correspondant à l'émetteur de référence et celles correspondant à l'émetteur considéré.

**Le rendement de régulation**, traduit la capacité du système et de ses dispositifs de régulation à suivre les besoins, compte tenu des variations des données climatiques et des apports internes. Il est égal à 1 dans le cas, théorique, où les besoins sont parfaitement suivis. Dans les autres cas, il est égal au rapport entre les besoins aux émetteurs et la chaleur fournie par ceux-ci.

**Le rendement de distribution**, traduit les pertes non récupérées du réseau de distribution du fluide chauffant, eau ou air. Il est égal à 1 dans le cas, théorique, où ces pertes sont nulles ou en absence de réseau de distribution. Dans les autres cas, il est égal au rapport entre l'énergie transmise aux émetteurs, majorée de la part récupérée des pertes de distribution, et l'énergie émise en amont du réseau de distribution.

**Le rendement de génération**, est le rendement de génération moyen pendant la période de chauffage. Il traduit l'efficacité de transformation de l'énergie consommée par le générateur en chaleur utile pour le chauffage. Il est égal à 1 lorsque toute l'énergie consommée est utile pour le chauffage. Dans les autres cas, il est égal au rapport entre la chaleur utile pour le chauffage et l'énergie consommée.

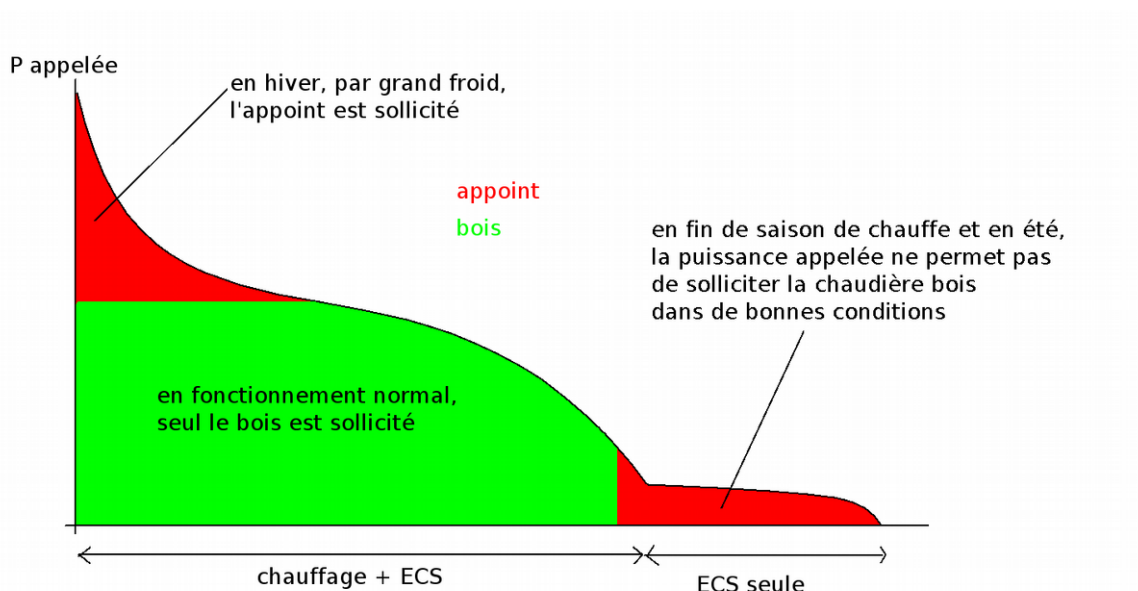
## ANNEXE 2 - Méthode de dimensionnement d'une chaudière bois

Les chaudières automatiques à bois déchiqueté n'ont pas la même souplesse de fonctionnement que leurs homologues à énergie fossile (fioul, gaz naturel, propane...). On cherche donc à dimensionner la chaudière à bois de manière à obtenir le meilleur compromis entre :

- le **rendement annuel** de la chaudière ;
- le **temps de fonctionnement** annuel de la chaudière ;
- le **taux de couverture** du bois (la proportion des besoins couverts par le bois) ;
- le **coût d'investissement**.

Ainsi **la chaudière à bois ne couvrira pas forcément l'ensemble des besoins** : on pourra avoir recours à un système d'appoint à combustible fossile (fioul, gaz) lors des pics de consommation (généralement en hiver, par grand froid) et les périodes d'utilisation intermittentes (mi-saison, été). La chaudière à bois sera donc sollicitée dans les meilleures conditions possibles, ce qui permettra d'allonger sa durée de vie.

Monotone de consommation :



L'un des outils pour dimensionner une chaudière bois est la monotone de consommation. Cette courbe est le classement décroissant de besoins de chauffage (puissance en kW) sur une année de chauffe. On peut notamment y visualiser le rôle de l'appoint.

Un dimensionnement classique pour une installation bois consiste à couvrir 50% des besoins de puissance, ce qui correspond à environ 85% des consommations d'énergie annuelles.