AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

21 rue du Maréchal Fosh
54 140 Jarville

UFR PGCM
Master 2 MEPP
54 500 Vandœuvre-lès-Nancy

Responsable formation : Mr Lacroix
Responsable stage : Mr J. Brunet

Rapport de stage

Etude de faisabilité et de dimensionnement d'un réseau de chaleur avec chaufferie biomasse

Bertrand DESPRES

Master 2 - MEPP

2011/2012

Date de soutenance : 04/09/2012

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 1

NOMENCLATURE 2

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX 3

INTRODUCTION 4

1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE 5

1.1. PRESENTATION GENERALE DU GROUPE IDEX 5
1.2. DOMAINES D'ACTIVITES 7
1.2.1. Maîtrise et gestion de l'efficacité énergétique 7
1.2.2. Protection de l'environnement 7
1.2.3. Multiservice technique 7
1.3. STRUCTURE DU GROUPE 8
1.3.1. Les implantations 8
1.3.2. L'organigramme 8
1.4. IDEX ET LES ENERGIES RENOUVELABLES 9
1.5. APPLICATION AUX RESEAUX DE CHALEUR 10
1.6. QUELQUES REFERENCES 11

2. LE RESEAU DE CHALEUR 12

2.1. PRINCIPE, FONCTIONNEMENT 12
2.1.1. Constitution d'un réseau de chaleur 12
2.1.2. L'unité de production de chaleur 13
2.1.3. Le réseau de distribution primaire 14
2.1.4. Les sous-stations d'échange 15
2.2. AVANTAGE DE LA CENTRALISATION DE LA PRODUCTION D'ENERGIE 17
2.2.1. Efficacité énergétique 17
2.2.2. Sécurité, encombrement et entretien 17
2.2.3. Impact environnemental 18
2.2.4. Avantage économique 18
2.3. SITUATION ACTUELLE DES RESEAUX DE CHALEUR EN FRANCE 19
2.3.1. La chaleur en France : Objectifs du Grenelle de l'environnement 19
2.3.2. La situation de la France par rapport à l'Europe 20
2.3.3. Perspectives 21

3. ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN PROJET DE RESEAU DE CHALEUR 22

3.1. CONTEXTE, PROBLEMATIQUE 22
3.2. BESOINS ENERGETIQUE DES BATIMENTS DE LA COLLECTIVITE 23
3.2.1. Point de départ 23
3.2.2. Calcul des puissances des sous-stations 24
3.2.2.1. Chauffage 25
3.2.2.1.1. Rigueur climatique : le Degré Jour Unifié (DJU) 25
3.2.2.1.2. Intermittence 26
3.2.2.1.3. Relation entre Consommation (kWh) et Puissance (kW) pour le chauffage d'un bâtiment 26
3.2.2.2. Production d'eau chaude sanitaire 27
3.2.2.3. Résultats 27
3.3. PLAN ET DIMENSIONNEMENT DU RESEAU DE CHALEUR 29
3.3.1. Localisation des sous-stations 29
3.3.2. Elaboration du plan du réseau de chaleur 30
3.3.3. Dimensionnement du réseau de chaleur 33
3.3.3.1. Tronçons 33
3.3.3.2. Calcul du débit d'eau dans les tronçons 35
3.3.3.3. Calcul du diamètre des tronçons 38
3.4. CHAUFFERIE 40

3.4.1. Type d'énergie renouvelable ... *40*
3.4.1.1. La géothermie ... 40
3.4.1.2. La biomasse ... 41
3.4.2. Description d'une chaufferie bois ... *42*
3.4.2.1. Le bois, une énergie renouvelable ... 42
3.4.2.2. PCI du bois ... 43
3.4.2.3. Emissions de CO2 évitées ... 44
3.4.2.4. Principe de fonctionnement ... 44
3.4.3. Dimensionnement des chaudières ... *45*
3.4.3.1. Puissances appelées en chaufferie ... 46
3.4.3.2. Puissances des chaudières ... 47
3.4.4. Dimensionnement des silos de stockage ... *53*
3.5. ETUDE ECONOMIQUE ... 54
3.5.1. Chaufferie ... *54*
3.5.1.1. Chaudières biomasse ... 54
3.5.1.2. Chaudières gaz avec brûleur ... 55
3.5.1.3. Génie civil ... 55
3.5.1.4. Fumisterie et hydraulique ... 55
3.5.2. Réseau de chaleur ... *56*
3.5.3. Sous-stations ... *56*
3.5.4. Analyses et solutions technico-économiques ... *57*
3.5.5. Récapitulatif ... *58*

CONCLUSION DE L'ETUDE ... 59

CONCLUSION GÉNÉRALE ... 60

ANNEXES ... 61

RESUME ... 67

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont en premier lieu à l'attention de **Mr. Thierry MOUROT**, Directeur Général Délégué, qui a accepté de m'accueillir durant ces 6 mois au sein de la Direction Régionale IDEX Energies de Normandie Nord-Est, à JARVILLE, dans un contexte où l'obtention d'un stage en entreprise s'avère difficile.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon tuteur de stage **Mr. Jacques BRUNET**, Directeur Technique Régional, qui m'a accordé sa confiance et attribué des missions valorisantes durant ce stage, **Mr. Rémy BIGAUT**, Ingénieur d'Etudes, qui a supervisé mon stage au jour le jour, et **Mr. Frederic JOLY**, Responsable des achats pour avoir su partager son bureau lors de mon stage, mais également toute l'équipe de la Direction Régionale car chacun d'entre eux a su trouver un peu de temps pour m'aider dans mes missions ou dans mon intégration au sein de l'entreprise.

Faire mon stage de dernière année dans votre entreprise a été un plaisir, j'ai pu apprendre beaucoup grâce à vous et surtout être conforté dans mon projet professionnel, ce qui est un aboutissement à mon cursus universitaire.

NOMENCLATURE

ml : Mètre linéaire
m^2 : Mètre carré
m^3 : Mètre cube
Nm^3 : Normo Mètre Cube
T : Température (Kelvin)
v : Vitesse (m/s)
P : Puissance (W)
Q : Consommation (Wh)
Tep : Tonne Equivalent Pétrole
Q_m : Débit massique (kg/s)
Q_v : Débit volumique (m^3/s)
ρ : Masse volumique (kg/ m^3)
μ : Viscosité dynamique (Pa.s)
υ : Viscosité cinématique (m^2/s)
Cp : Chaleur massique (J/kg.K)
ΔP : Différence de pression (Pa)
Λ : Coefficient de perte de charge régulière
ζ : Coefficient de perte de charge singulière
ε : Rugosité d'une surface (μm)
PCI : Pouvoir Calorifique Intérieur (J/kg ou kWh/t)
mmCE : Millimètre de colonne d'eau
Re : Nombre de Reynolds
h : Humidité relative (% ou kg)

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Chiffre d'affaires par secteur de clientèle (2009)
Figure 2 : Implantations du siège social (Boulogne Billancourt), des directions régionales et des agences
Figure 3 : Organigramme du groupe IDEX
Figure 4 : Usine de méthanisation à Amiens (10 millions de Nm^3/an de biogaz produit)
Figure 5 : Centrale biomasse avec réseau de chaleur, Saint-Etienne du Rouvray (76)
Figure 6 : Schéma global d'un réseau de chaleur
Figure 7 : Canalisations pré-isolées en attente de pose
Figure 8 : Caniveau enterré avec ventilation
Figure 9 : Tranchée
Figure 10 : Principe de fonctionnement d'une bouteille de mélange
Figure 11 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques
Figure 12 : Schéma général d'une sous-station avec échangeur à plaques et bouteille de mélange
Figure 13 : Répartition des consommations d'énergie en France
Figure 14 : Place des réseaux de chaleurs dans l'augmentation des énergies renouvelable (en Mtep)
Figure 15 : Vue 3D d'une potentielle future chaufferie biomasse à l'emplacement de la friche industrielle
Figure 16 : Réseau chauffage et ECS dans une sous-station
Figure 17 : Modèle d'intermittence
Figure 18 : Profil journalier de production d'ECS en Europe
Figure 19 : Repères de l'ensemble des sous-stations sur une carte du logiciel « Google Earth »
Figure 20 : Plan du réseau de chaleur utilisée pour l'étude
Figure 21 : Fractionnement n°1 du réseau de chaleur au niveau de la chaufferie
Figure 22 : Fractionnement n°2 du réseau de chaleur
Figure 23 : Schéma montrant les piquages dans les circuits « départ eau chaude » et « retour eau froide »
Figure 24 : Différents tronçons du réseau
Figure 25 : Tronçon « Chaufferie – A' »
Figure 26 : Tronçon « Chaufferie – A »
Figure 27 : Abaque de Dariès
Figure 28 : Schéma d'un réseau de chaleur géothermique
Figure 29 : Cycle du CO2
Figure 30 : Différents types de combustibles bois utilisés dans les chaudières
Figure 31 : Logigramme du principe de fonctionnement d'une chaufferie biomasse
Figure 32 : Schéma d'un ensemble chaudière bois
Figure 33 : Evolution de la puissance utile nécessaire en chaufferie
Figure 34 : Graphique montrant un mauvais dimensionnement de chaudières
Figure 35 : Mixité du bois en fonction de la puissances des chaudières bois
Figure 36 : Tarifs moyen des chaudières bois en fonction de leurs puissances

Tableau 1 : Fichier Excel brut : consommation des sous-stations du futur réseau de chaleur
Tableau 2 : Puissances appelées des sous-stations
Tableau 3 : Caractéristiques physiques de l'eau à 80°C
Tableau 4 : Conversion diamètre intérieur – DN
Tableau 5 : Classification et longueur de canalisation du réseau de chaleur
Tableau 6 : Durée de reconstitution de différentes énergies
Tableau 7 : PCI du bois (kWh/t) en fonction de l'humidité relative (%)
Tableau 8 : Emissions de CO2 évitées
Tableau 9 : Puissances utiles maximales en chaufferie non calculées
Tableau 10 : Exemple de calcul des puissances appelées annuelles et mensuelles en fonction des températures extérieures moyennes
Tableau 11 : Puissances utiles maximales en chaufferie
Tableau 12 : Les chaudières et leurs caractéristiques
Tableau 13 : Appels de puissances des différentes chaudières
Tableau 14 : Mixités obtenues avec les chaudières prises en exemple
Tableau 15 : Longueurs, diamètres, et prix des tubes

INTRODUCTION

Le contexte dans lequel nous vivons nous impose de nous poser quelques questions fondamentales. En effet, la raréfaction des ressources naturelles, notamment énergétiques, ainsi que le réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serres sont des problèmes cruciaux pour lesquels il va falloir trouver des réponses à court terme, si l'on souhaite continuer à se développer et à prospérer.

Dans cette optique, la France s'est fixée, via le Grenelle de l'environnement, un taux de production d'environ 20% d'énergie d'origine renouvelable d'ici l'horizon 2020.

Le groupe IDEX, exploitant énergétique, n'a pas attendu ces objectifs pour se développer dans le domaine des nouvelles énergies renouvelables. En effet, après le 2ème choc pétrolier (début des années 80),le groupe IDEX a réalisé d'importantes opérations dans différents secteurs, comme par exemple la construction du premier parc éolien français de Port la Nouvelle, près de Perpignan (1992), ou bien l'usine de méthanisation anaérobie de déchets ménagers avec valorisation énergétique à Amiens, première mondiale à l'échelle industrielle (1990), ou encore le développement des chauffages urbains via des réseaux de chaleurs alimentés en énergies renouvelables.

Mon sujet de stage porte sur ce dernier exemple, en effet la problématique est la suivante : Comment centraliser la production d'énergie pour le chauffage des bâtiments d'une collectivité territoriale afin d'en réduire les coûts tout en utilisant un maximum d'énergies d'origines renouvelables, au détriment d'énergies fossiles, afin de limiter les impacts environnementaux ?

Mon objectif est donc d'effectuer une étude de faisabilité et de dimensionnement pour la mise en œuvre d'une chaufferie biomasse, et d'évaluer l'impact sur la distribution du fluide caloporteur (réseau de chaleur) vers les établissements identifiés, en adéquation avec collectivité territoriale.

Je présenterai le groupe IDEX, son domaine d'activité, sa structure, …

Dans la seconde partie du présent mémoire, je développerai la centralisation de la production d'énergie en définissant un réseau de chaleur, en précisant son fonctionnement, en énumérant ses avantages, et en analysant sa place actuelle dans la production d'énergie en France et en Europe.

Enfin, la troisième partie exposera l'étude technico-économique d'un projet de réseau de chaleur d'une collectivité se situant dans le nord de la France. Cette étude comprendra la présentation du projet, le dimensionnement du réseau de chaleur avec chaufferie à partir des données fournies par la collectivité, et le chiffrage du projet.

1. Présentation de l'entreprise

1.1. Présentation générale du groupe IDEX

IDEX est le premier opérateur indépendant dans les domaines de la maitrise et la gestion de l'énergie, de la maintenance multitechniques et de l'installation d'équipements de production d'énergie et d'équipements techniques.

IDEX est un pionnier du développement des énergies nouvelles et renouvelables.

Créé par Georges PLANCHOT le **1er juillet 1963**, et présidé entre 1992 et 2011 par son fils Alain PLANCHOT, le Groupe IDEX n'a cessé d'entreprendre et d'innover au fil des décennies pour devenir un acteur majeur dans les secteurs énergétiques et environnementaux.

Il faut remonter au tout début des années 60 pour voir une société, alors nommée **"L'Industrielle de Chauffage"**, s'illustrer sur des projets complexes d'installations de chauffage et de climatisation. Les programmes de construction de grands ensembles immobiliers se développent de façon spectaculaire et l'énergéticien se fait le spécialiste des systèmes de chauffage collectif à distance.

Au fil des ans, les avancées techniques, le souci d'utilisation optimale des combustibles et les impératifs de sécurité et de continuité de service, rendent nécessaire la formation d'équipes spécialisées dans la gestion de ces équipements. Dans cette optique, **"L'Industrielle d'Exploitation de Chauffage"**, qui deviendra le groupe IDEX, voit le jour.

Le socle historique des activités d'IDEX était constitué de contrats de gestion de réseaux de chaleur revêtant alors principalement la forme d'affermage. Très rapidement, la société élargit ses activités aux services de gestion et de maintenance des équipements thermiques et électromécaniques nécessaires au confort et au fonctionnement des bâtiments : logements, bureaux, tertiaire, équipements collectifs, santé.

Le Groupe IDEX s'est développé et structuré dans l'indépendance actionnariale autour de la famille dirigeante en revendiquant et respectant depuis plus de quarante ans, sous des formes régulièrement adaptées et renouvelées, ses valeurs fondatrices :

- assurer un service de proximité dans une relation durable avec les clients,
- atteindre l'excellence énergétique et environnementale via la maîtrise des techniques et de l'innovation,
- garantir son indépendance à l'égard des fournisseurs d'énergies primaires et des multinationales de services publics délégués.

En 2012, le Groupe IDEX compte 3500 collaborateurs et réalise 500 M€ de chiffre d'affaires

Les activités exercées sont réparties comme suit :

- services d'efficacité énergétique et de maintenance technique : 320 M€,
- gestion de réseaux de chaleur et de froid : 75 M€,
- gestion d'usines de valorisation énergétique de déchets ménagers : 25 M€,
- ingénierie de génie climatique : 80 M€.

L'essentiel des revenus provient de plus de 10.000 contrats de services, dont la durée résiduelle moyenne dépasse 7 ans. La clientèle se répartit paritairement entre le secteur public (l'Etat et les collectivités territoriales comptent pour 47% du CA) et le secteur privé, et présente les caractéristiques suivantes :

Figure 1 : Chiffre d'affaires par secteur de clientèle (2009)

1.2. Domaines d'activités

1.2.1. Maîtrise et gestion de l'efficacité énergétique

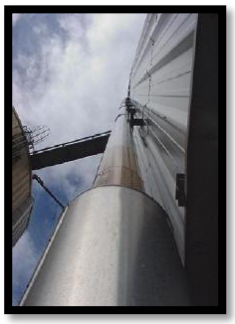
IDEX assure la gestion, la fourniture, la production et la transformation des énergies primaires sous toutes ses formes (fioul, gaz, électricité, énergies renouvelables…).

Les modalités d'intervention des équipes d'IDEX sont diverses :

- Conduite et maintenance des installations de toutes puissances
- Production et vente de fluides thermiques et frigorifiques
- Ingénierie d'études et de travaux :
  - conseils, conceptions
  - audits, optimisations
  - installation
- Maîtrise des technologies :
  - Géothermie
  - Biomasse
  - Cogénération, Trigénération

1.2.2. Protection de l'environnement

IDEX est un des acteurs majeurs dans le domaine de la gestion et de la valorisation des déchets (ordures ménagères, déchets industriels) ainsi que dans la surveillance de la qualité de l'air (contrôle des combustions, traitement des fumées…)



1.2.3. Multiservice technique

A partir d'un noyau technique, IDEX prend en charge l'ensemble des prestations nécessaires pour maintenir les installations en parfait état et gérer tous types de bâtiments afin d'obtenir toutes les garanties de puissance, de sécurité et de confort pour les usagers.

1.3. Structure du groupe

1.3.1. Les implantations

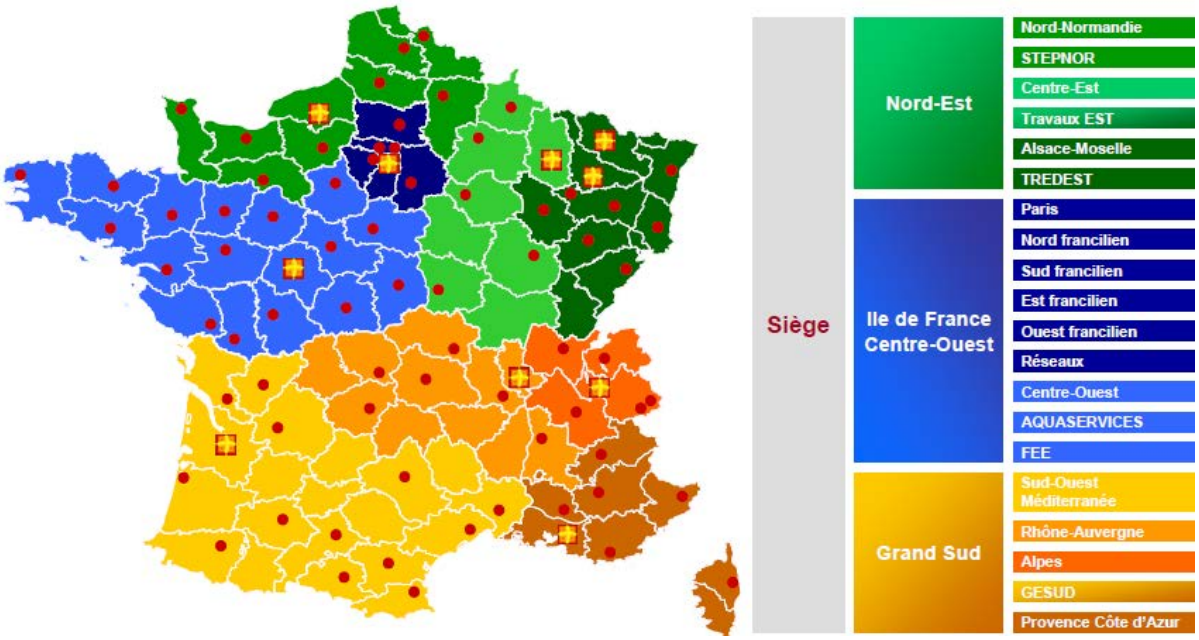


Figure 2 : Implantations du siège social (Boulogne Billancourt), des directions régionales et des agences

1.3.2. L'organigramme

La vocation de proximité d'IDEX vis-à-vis de ses clients a guidé l'organisation de la société :

- 3 Directions régionales (Ile de France, Grand Sud, Nord Est)
- 50 agences réparties sur le territoire
- Plusieurs dizaines de secteurs et sous secteurs d'intervention.

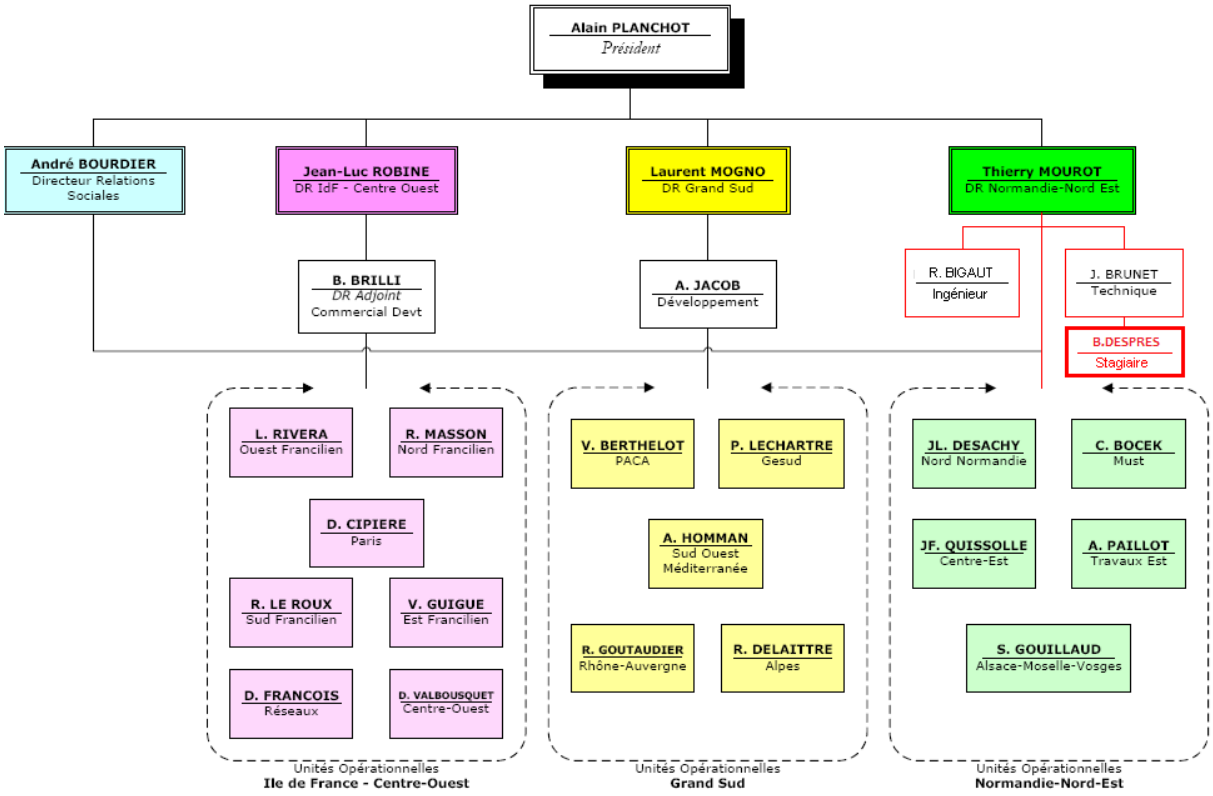


Figure 3 : Organigramme du groupe IDEX

Rattaché à la direction « Normandie – Nord Est » (Jarville) dont le directeur est Mr. Thierry MOUROT, je suis affecté au service technique régional intervenant sur une grande moitié nord de l'hexagone.

1.4. IDEX et les énergies renouvelables

Depuis deux décennies, IDEX a fortement ancré son activité dans les métiers des énergies renouvelables.

Cet engagement s'est traduit, dès le début des années 80 consécutives au second choc pétrolier, par la réalisation d'importantes opérations dans différents secteurs :

- Construction du premier parc éolien français de Port la Nouvelle (1992),
- Opérations de Géothermie pour le chauffage urbain,
- Méthanisation anaérobie des déchets ménagers avec valorisation énergétique à Amiens, première mondiale à l'echelle industrielle (1990),
- Multiples opérations dans les domaines du bois énergie et du solaire thermique.

Ces opérations, aujourd'hui en pleine exploitation, démontrent clairement la justesse des choix de l'époque ainsi que la pérennité des filières concernées.

Figure 4 : Usine de méthanisation à Amiens (10 millions de Nm^3/an de biogaz produit)

L'acquisition en 2001 de SINERG (aujourd'hui ADELIS), filiale du Groupe Caisse des Dépôts spécialisée en tiers investissement en énergie, a également permis à IDEX d'accroître son rôle de développeur et de gestionnaire de projets dans ce secteur d'activités.

1.5. Application aux réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur ou plus simplement les grandes chaufferies collectives représentent une cible privilégiée pour la mise en œuvre d'opérations d'énergies renouvelables pour les raisons suivantes :

- L'intervention sur des opérations existantes permet de recourir à des énergies à faible émission de CO2 (Bois, géothermie…) en substitution aux combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz…) couramment utilisés,
- Pour des projets neufs, la création de chauffages urbains évite d'avoir recours à des chaufferies en pied d'immeubles fonctionnant au gaz ou au chauffage électrique individuel et permet une meilleure récupération des charges pour le bailleur social,
- Sur le plan fiscal, ce type d'opération permet de faire bénéficier les abonnés et clients finaux d'une forte économie due :
    - au taux réduit de TVA (5,5 %) sur toute la facture de chauffage,
    - au produit de la vente des certificats CO2 libérés par l'opération (réseaux existants) ou éligibles aux procédures d'échange européen (Certificats Mise en Œuvre Conjoint « MOC »).
    - au produit de la vente des certificats d'économie d'énergie (CEE).

IDEX en sa qualité de délégataire de réseaux de chaleur est soumis depuis 2004 au Plan National d'Allocation de Quota de CO2 (PNAQ1 et PNAQ2) ; il est par ailleurs « obligé » dans le cadre de la loi de 2006 sur la maîtrise de l'énergie (CEE).

Pour répondre à ces exigences réglementaires, IDEX a mis en place un service énergétique chargé :

- de la valorisation quotidienne des différents droits attachés aux opérations (CO2, CEE, MOC, certificats verts…),

- de suivre la réglementation fiscale (TVA, pratique de l'amortissement dérogatoire, réduction des bases de taxe professionnelle…),
- de mettre en place et négocier les contrats d'achat d'énergies traditionnelles (fioul, gaz dérégulé, charbon, électricité…) ou renouvelables (Biomasse, bois, énergie de récupération thermique…).

1.6. Quelques références

CHÂTEAU DE VERSAILLES

- **Prestations assurées** P2 / P5 dans le domaine CVC
- **Puissances installées**
  - **Chaud** 23 MW (53% chauffage urbain - 45% gaz naturel - 2% FOD)
  - **Froid** 360 kW
- **Surface gérée** 200 000 m²
- **Moyens humains** 11 techniciens sur site

CENTRE GEORGES POMPIDOU

- **Prestations assurées** P2 – P3 – P5
- **Puissances installées**
  - **Chaud** 6,5 MW (récupération sur groupe froid) + CPCU
  - **Froid** 9 MW (3 groupes froid)
- **Surface gérée** 100 000 m²
- **Moyens humains** 1 chef d'équipe, 1 assistante, 5 techniciens et 1 apprenti

OPÉRA DE LORRAINE NANCY

- **Prestations assurées** P2
  Entretien et dépannage chaufferie gaz + production ECS
- **Puissances installées**
  - **Chaud** 700 KW
- **Surface gérée** 12 300 m²
- **Moyens humains** 1 technicien

Ou bien encore de grandes sociétés telles que : AIRBUS (Toulouse), NESTLE Waters (Vittel), ThyssenKrupp (Florange), …

2. Le réseau de chaleur

2.1. Principe, fonctionnement

Un réseau de chaleur est une installation comprenant :

- une chaufferie centralisée transformant une ou plusieurs énergies primaires en une énergie calorifique,
- Un réseau de distribution du fluide caloporteur (généralement de la vapeur d'eau sous pression ou de l'eau chaude)
- un ensemble de sous-stations alimentant des usagers finaux, qui peuvent être des industries, des bâtiments communaux, des hôpitaux, des bâtiments tertiaires et des habitations dans un grand nombre de cas.

2.1.1. Constitution d'un réseau de chaleur

Tout réseau de chaleur comporte les principaux éléments suivants :

- **L'unité de production de chaleur** qui peut être, par exemple, une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM), une chaufferie alimentée par un combustible (fioul, gaz, bois...), une centrale de géothermie profonde, etc. Généralement un réseau comporte une unité principale qui fonctionne en continu et une unité d'appoint utilisée en renfort pendant les heures de pointe, ou en remplacement lorsque cela est nécessaire.

Figure 5: Centrale biomasse avec réseau de chaleur Saint-Etienne du Rouvray (76)

- **Le réseau de distribution primaire** composé de canalisations dans lesquelles la chaleur est transportée par un fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude). Un circuit aller (rouge) transporte le fluide chaud issu de l'unité de production. Un circuit retour (bleu) ramène le fluide, qui a cédé ses calories (Variation négative d'enthalpie) au niveau des sous-stations d'échange. Le fluide est alors à nouveau chauffé (Variation positive d'enthalpie) par la chaufferie centrale, puis renvoyé dans le circuit. La conception du réseau vise à assurer une densité thermique (nombre de bâtiments raccordés par kilomètre de conduite posée) aussi élevée que possible, afin de permettre la viabilité économique du réseau (coût d'investissement fortement lié au linéaire de conduite ; recettes liées au nombre d'usagers).

- **Les sous-stations d'échange**, situées en pied de bâtiment, permettent le transfert de chaleur par le biais d'un échangeur entre le réseau de distribution primaire et le réseau de distribution secondaire qui alimente les émetteurs implantés dans un bâtiment. Le réseau secondaire ne fait pas partie du réseau de chaleur au sens juridique, car il n'est pas géré par le responsable du réseau de chaleur mais par le responsable de l'immeuble.

Figure 6 : Schéma global d'un réseau de chaleur

2.1.2. L'unité de production de chaleur

La chaleur est produite dans des installations robustes et fiables, surveillées en permanence et entretenues par des professionnels. Elle peut être générée à partir de diverses sources d'énergie :

- **Les énergies conventionnelles (fossiles)** telles que le gaz ou le fioul qui produisent de la chaleur par leur combustion (Réaction exothermique) ; ces énergies sont fortement émettrices de gaz à effet de serre. Elles sont bien adaptées à la fourniture de chaleur lors des pointes de consommations.

- **Les énergies renouvelables** : la biomasse (bois, résidus agricoles, cultures énergétiques...) qui produit de la chaleur par combustion dans une chaufferie spécifique, la géothermie profonde qui permet la récupération de la chaleur (via un échangeur) de nappes aquifères profondes (à partir de 1500m de profondeur).

- **L'énergie de récupération** telle que la chaleur fatale dégagée lors de l'incinération des déchets dans les UIOM ou encore celle issue de sites industriels (Compression de gaz, raffinerie).

Avec la consommation réduite des nouveaux bâtiments (Règlementation Thermique 2012), d'autres sources de chaleur peuvent alors devenir exploitables par les réseaux, comme la géothermie peu profonde ou encore la chaleur prélevée dans les eaux usées ; ces systèmes font appel à des pompes à chaleur qui permettent d'extraire l'énergie de la source pour la transférer au réseau, en utilisant uniquement une force motrice et la propriété des gaz évoluant dans un cycle de carnot (Fluide frigorigène).

Les installations produisant des fumées sont équipées de systèmes de traitement perfectionnés et contrôlés, ce qui permet de réduire fortement leur impact sur la qualité de l'air par rapport à des systèmes individuels. Certaines unités de production de chaleur fonctionnent par ailleurs en cogénération, permettant de produire simultanément de l'électricité (revendu sur le réseau EDF) et de la chaleur nécessaire au réseau de chaleur.

2.1.3. Le réseau de distribution primaire

Le réseau de distribution primaire constitue une boucle qui conduit le fluide caloporteur de l'unité de production de chaleur jusqu'aux sous-stations d'échange. On emploie trois types de fluides.

Les types de fluide caloporteur :

Le réseau eau chaude a une température comprise entre 60° et 110°C. Il est généralement prévu pour les groupes d'immeubles d'habitation ou de bureaux, ou encore les hôpitaux et établissements industriels qui ne consomment pas de vapeur.

Le réseau eau surchauffée a une température comprise entre 110°C et 180°C, sous une pression supérieure à 4 bars. Il est principalement utilisé dans les réseaux de grande envergure qui alimentent des bâtiments nécessitant des températures élevées (laveries, abattoirs, industries textiles...).

Le réseau vapeur a une température de 200°C à 300°C. Son utilisation est de plus en plus limitée. Il est présent essentiellement pour la fourniture de chaleur industrielle, mais Paris l'utilise pour son réseau de chaleur (réseau de la CPCU).

F

Figure 7 : Canalisations pré-isolées en attente de pose

La tuyauterie et les différents types de pose :

Les canalisations sont en général constituées d'un système double enveloppe : une gaine extérieure en acier (jusqu'à 800 mm de diamètre) à l'intérieur de laquelle se trouve une autre gaine en acier transportant le fluide caloporteur entourée d'une épaisseur d'isolant (laine de roche, mousse de polyuréthane, etc.).

La pose peut se faire en caniveau enterré, ce qui permet une protection mécanique et minimise les effets dus à l'humidité par ventilation de ces caniveaux. Elle peut également se faire en tranchée,

solution moins coûteuse, mais nécessitant que les gaines soient entourées d'un film protecteur contre l'humidité et qu'elles soient installées à une profondeur suffisante afin d'absorber les efforts de la surface.

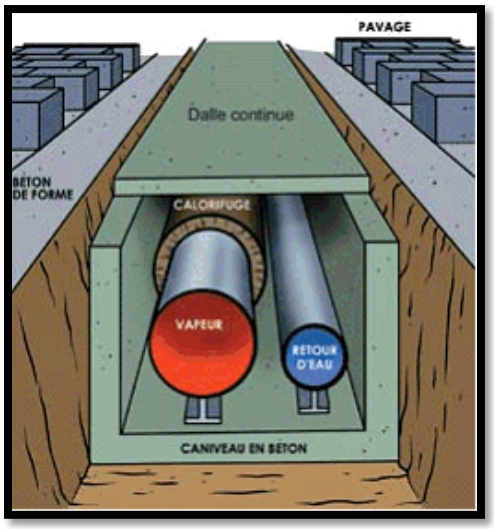


Figure 8 : Caniveau enterré avec ventilation

Figure 9 : Tranchée

2.1.4. Les sous-stations d'échange

La chaleur est livrée aux clients en différents points de livraison (ou sous-stations) tout au long du réseau.
Généralement située en pied de bâtiment, la sous-station a pour rôle :

- de transférer la chaleur du réseau primaire (réseau allant de la production de chaleur aux sous-stations) au réseau secondaire (réseau interne de l'immeuble),
- d'adapter le débit et la température aux besoins des utilisateurs,
- de compter la chaleur consommée.

Le transfert de chaleur entre les réseaux primaire et secondaire s'effectue par le biais d'une bouteille de mélange ou par échangeur :

- Une bouteille de mélange permet un transfert de chaleur entre un fluide chaud et un fluide froid en les mélangeant, contrairement à l'échangeur. Dans la bouteille de mélange (voir schéma ci-contre), une partie du retour du circuit à chauffer (secondaire, chez le client) est mélangée au débit du circuit chaud (réseau de chaleur, primaire), puis renvoyée dans la boucle du secondaire.

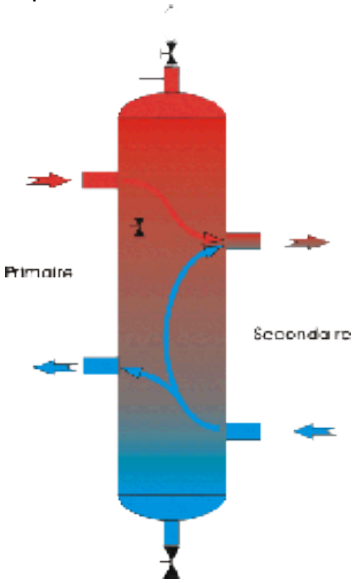


Figure 10 : Principe de fonctionnement d'une bouteille de mélange

- Pour une configuration avec échangeurs de chaleur, les réseaux primaire et secondaire sont deux boucles différentes, sans mélange des deux fluides. L'échange de chaleur entre les deux boucles se fait au niveau d'un échangeur primaire.

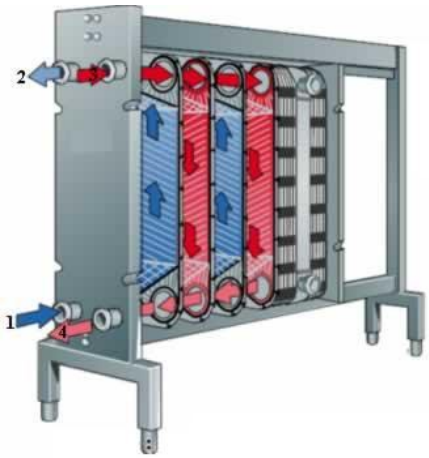


Figure 11 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

Les bouteilles de mélanges sont très présentes sur les anciennes installations, mais sont petit à petit remplacées par des échangeurs de chaleur qui ont un gros avantage : les fluides des deux circuits ne se mélangent pas. C'est indispensable lorsque les deux fluides sont différents ou que leurs états sont différents (exemple : eau chaude et vapeur d'eau), ou bien lorsque la pression des deux réseaux n'est pas la même. L'inconvénient d'un échangeur est qu'il génère beaucoup plus de pertes de charges qu'une bouteille de mélange. Enfin, ces deux appareils permettent des débits différents entre les deux réseaux.

Un échangeur secondaire entre le fluide secondaire et l'eau de ville (3ème boucle) permet de préparer l'Eau Chaude Sanitaire (ECS). L'échange de chaleur est comptabilisé par un compteur de chaleur agréé et contrôlé annuellement. Ce compteur est relevé mensuellement pour la facturation et la consommation est analysée pour vérifier toute dérive.

Le schéma suivant présente une sous-station possédant les deux appareils de transfert de chaleur, à savoir un échangeur primaire à plaques, pour l'échange entre le réseau primaire et secondaire, et une bouteille de mélange pour la préparation ECS :

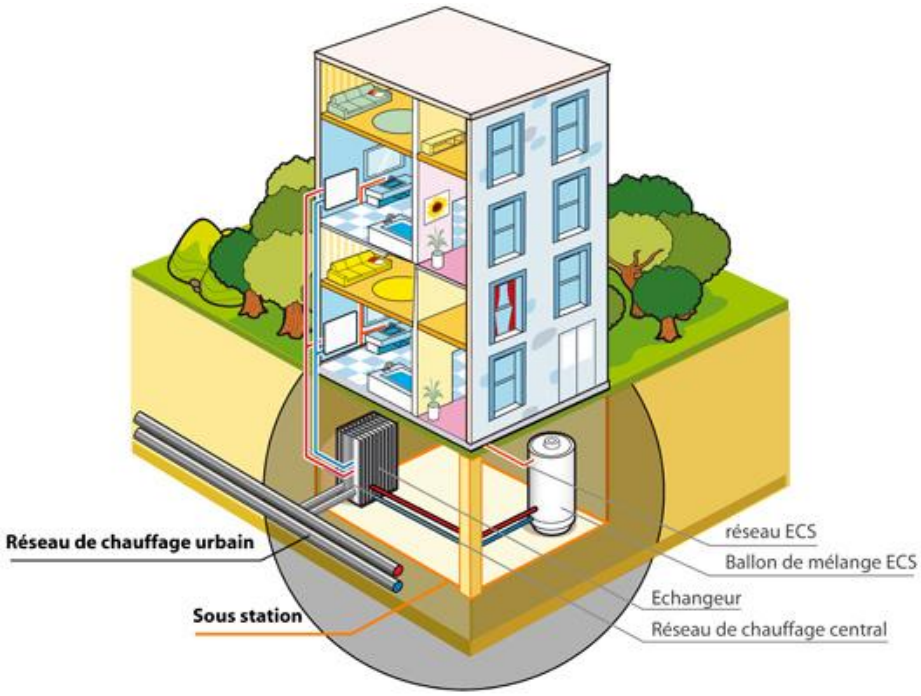


Figure 12 : Schéma général d'une sous-station avec échangeur à plaques et bouteille de mélange

2.2. Avantage de la centralisation de la production d'énergie

Les réseaux de chaleur présentent des avantages importants par rapport à des solutions de production de chaleur décentralisé, notamment en matière d'efficacité énergétique, de maîtrise de l'énergie, et de diminution des émissions de gaz à effet de serre :

- simplicité d'utilisation
- maîtrise des coûts énergétiques
- développement multi-énergétique
- diminution des rejets atmosphériques
- préservation de l'environnement sur les plans esthétiques, visuels et sonores
- sécurité accrue par l'absence d'installation de combustion dans les immeubles desservis
- suppression des charges d'entretien ou de mise en conformité liées aux productions localisées
- prise en compte préventive des risques sanitaires

2.2.1. Efficacité énergétique

La grande diversité des sources d'énergie (gaz, fioul, charbon, incinération des ordures ménagères, biomasse, cogénération, géothermie, …) permet de choisir les combinaisons d'énergie les plus performantes en fonction de la demande énergétique au cours de l'année.

De plus, les installations de grandes puissances ont de meilleurs rendements car le ratio pertes thermiques/puissance est en partie plus faible que pour les petites installations. Ce rendement est amélioré grâce à une gestion et une régulation permanente de la production d'énergie par des professionnels présents sur site.

2.2.2. Sécurité, encombrement et entretien

Les bâtiments raccordés au réseau de chaleur bénéficient d'une sécurité absolue et d'une garantie de livraison de chaleur parfaitement fiable. La chaleur est acheminée sous forme d'eau chaude ou de vapeur d'eau jusqu'aux sous-stations. Ces dernières ne produisent ni fumées, ni poussières, ni odeurs et fonctionnent sans combustible, donc sans danger pour les usagers et l'environnement.

De plus, elles sont moins encombrantes que des chaufferies locales collectives puisqu'elles ne nécessitent ni chaudière, ni cheminée, ni stockage de combustible, et propose un emplacement réduit pour la mise en place de l'échangeur.

L'ensemble des installations est conçu généralement pour une durée de vie de 20 à 30 ans environ, sans baisse de rendement. L'exploitation de la chaufferie, du réseau et de la partie « primaire » des sous-stations relève de la responsabilité du délégataire ou exploitant. Dans la plupart des cas, ce dernier est disponible 24h/24 et 7j/7 en vertu du contrat d'abonnement. L'abonné ne gère que le système de distribution interne du chauffage et de l'eau chaude sanitaire, c'est-à-dire le réseau secondaire, celui qui se trouve après l'échangeur de la sous-station.

2.2.3. Impact environnemental

La taille et la gestion industrielle des installations permettent d'obtenir de meilleurs rendements de combustion et de plus faibles rejets que la plupart des installations classiques de chauffage. De plus, les réseaux de chauffage urbain sont des installations soumises à des réglementations très strictes impossibles à développer au niveau individuel et leurs rejets (poussières, CO2, NOx, SOx, métaux lourds ...) font l'objet de contrôles continus.

Techniquement, ils permettent d'utiliser des énergies renouvelables difficiles d'accès ou d'exploitation, telles que la biomasse sous toutes ses formes, la géothermie profonde ou encore la chaleur de récupération, par exemple issue des usines d'incinération des déchets. Par ailleurs, en zone urbaine dense où l'habitat est essentiellement collectif, les aménagements individuels tels que l'installation de chauffage au bois, la géothermie superficielle ou encore la pose de panneaux solaires pour la production d'eau chaude sont souvent difficiles, parfois même impossibles. Le réseau de chaleur parait être alors une bonne solution pour la substitution d'énergie fossile par des énergies dites renouvelables.

2.2.4. Avantage économique

Grâce à des chaufferies centrales fonctionnant sur le mode de la multi-énergie, les réseaux de chaleur permettent à tout moment d'offrir des prix très compétitifs aux utilisateurs.

De plus, l'installation, l'entretien, l'exploitation et le renouvellement des équipements nécessaires à la production et au transport de la chaleur étant supportés par l'exploitant, le réseau de chaleur se révèle être une solution de chauffage qui simplifie la vie des clients.

En ce qui concerne les chaufferies biomasse, l'utilisation du bois permet de maintenir un coût de chaleur extrêmement compétitif grâce au recours à des filières locales d'approvisionnement. Cette tendance devrait se confirmer car la biomasse (énergie renouvelable) ne subit pas les tensions du marché des produits pétroliers (énergies fossiles).

En conclusion, le réseau de chaleur est un outil de chauffage sûr, écologique et économique.

2.3. Situation actuelle des réseaux de chaleur en France

Pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la France doit fortement augmenter sa production d'énergie à partir de sources renouvelables d'ici 2020. Les réseaux de chaleur, mis en place par les collectivités sur leurs territoires, permettent de mobiliser d'importants gisements d'énergie renouvelable difficiles d'accès ou d'exploitation. Ces réseaux devront être développés et modernisés de façon très volontariste au cours des prochaines années : l'objectif fixé pour 2020 est un triplement du nombre de raccordements et du taux d'énergies renouvelables utilisées comme sources de chaleur (76% de la chaleur distribuée par les réseaux de chaleur produite à partir d'énergies renouvelables).

2.3.1. La chaleur en France : Objectifs du Grenelle de l'environnement

La chaleur (chauffage de bâtiments, eau chaude sanitaire, chaleur industrielle et chaleur de cuisson) représente environ la moitié de l'énergie consommée en France chaque année ; à titre de comparaison, le secteur des transports en représente un tiers et l'électricité (hors chauffage) 15%.

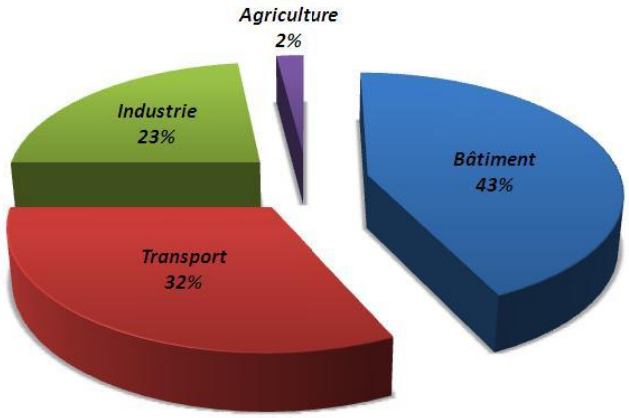


Figure 13 : Répartition des consommations d'énergie en France

En 2007, année prise comme référence pour les objectifs à l'horizon 2020, seulement 13% de cette chaleur provenait d'énergies renouvelables.

Dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, la France s'est fixé l'objectif d'augmenter de 20 millions de tonnes équivalent-pétrole (Mtep) sa production d'énergies renouvelables, à l'horizon 2020 (à titre de comparaison, la consommation annuelle totale d'énergie en France est de l'ordre de 160 Mtep). Les énergies renouvelables devront ainsi représenter 23% de la production énergétique nationale.

La moitié de ces 20 Mtep devront provenir de la production de chaleur.

Les réseaux de chaleur offrent donc un moyen de développer l'utilisation de chaleur renouvelable dans les villes. Ils devront contribuer à l'horizon 2020 au quart de l'effort de production supplémentaire de chaleur renouvelable (+2,5 Mtep).

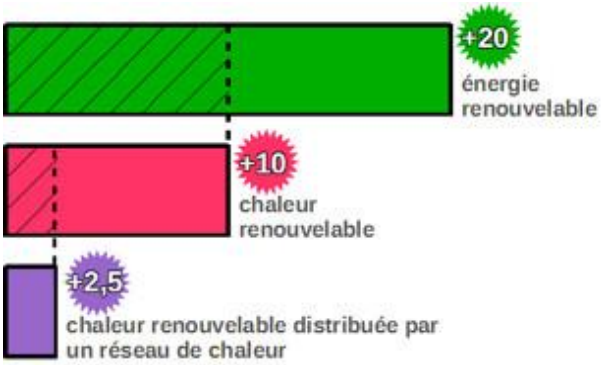


Figure 14 : Place des réseaux de chaleurs dans l'augmentation des énergies renouvelable (en Mtep)

2.3.2. La situation de la France par rapport à l'Europe

On estime qu'il existe en Europe environ 5000 réseaux de chaleur, représentant 10% du marché du chauffage. L'importance des réseaux de chaleur est très variable d'un pays à un autre : au Royaume-Uni ou aux Pays-Bas, ils desservent moins de 4% des logements ; à l'inverse, en Finlande, en Lituanie ou en Suède, le chauffage urbain est le mode de chauffage dominant, avec des taux de pénétration de l'ordre de 50%.

Les réseaux de chaleur sont en général plus développés dans le nord, l'est et le centre de l'Europe. Ces différences entre les pays s'expliquent en partie par les conditions climatiques et les ressources énergétiques locales (comme en Islande, où l'abondance de la ressource géothermique permet aux réseaux de chaleur d'atteindre un taux de pénétration de 95%), mais aussi et surtout par les politiques menées par les différents pays en matière d'énergie depuis les années 70-80.

Part de marché des réseaux de chaleur dans différents pays d'Europe	
Allemagne	13%
Autriche	18%
Croatie	9,5%
République Tchèque	41%
Danemark	50%
Finlande	49%
France	5%
Grèce	0,3%
Islande	95%
Lettonie	29%
Lituanie	50%
Pays-Bas	3,6%
Norvège	4,8%
Pologne	47%
Roumanie	29,6%
Serbie	25%
Slovénie	9%
Suède	55%
Suisse	2,8%

Source : Euroheat & Power - 2007

En 2011, les 450 réseaux de chaleur recensés en France desservaient environ 2 millions d'équivalents logements, soit un taux de raccordement d'environ 5 à 6%, bien en dessous de la moyenne européenne ; il est de 14% en Allemagne.

Les réseaux de chaleur français représentent une production totale d'énergie de l'ordre de 2 Mtep. Ils sont alimentés, en 2009, à plus de 30% par des énergies renouvelables ou de récupération, ce qui les place bien au-dessus des taux moyens nationaux, que ce soit pour la production d'électricité (environ 10%) ou pour la chaleur tous systèmes confondus (15%). En 2009 toujours, 22% des réseaux de chaleur sont alimentés à plus de 50% par des énergies renouvelables.

2.3.3. Perspectives

A l'échelle européenne, les réseaux de chaleur sont aujourd'hui perçus comme un moyen de contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique. Dans les pays où la production d'électricité est essentiellement thermique, le développement de réseaux de chaleur alimentés par la cogénération permet d'augmenter l'efficacité énergétique.

Les réseaux de chaleur sont également perçus comme un moyen de mobiliser massivement certaines sources d'énergies renouvelables et de récupération, et certains pays comme l'Allemagne ou la France, qui disposent de marges de progression importantes en matière de chauffage urbain, intègrent clairement cet outil dans leur politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Par exemple, le « Fond Chaleur » créé en France en 2008 pour accompagner certains engagements du Grenelle de l'Environnement (dont l'objectif, pour rappel, est d'atteindre 23% d'énergie d'origine renouvelable avant 2020), est un des outils d'accompagnement de l'évolution des réseaux de chaleur.

3. Etude technico-économique d'un projet de réseau de chaleur

3.1. Contexte, problématique

Début d'année 2010 dans une ville du Nord-Pas-de-Calais d'environ 23 000 habitants, le président d'une association annonçait, à l'occasion d'une grande conférence de presse, le lancement du projet « Eco-zone ». L'idée est de convertir une ancienne friche industrielle de 2 hectares en vitrine du développement durable, de l'économie solidaire et de la pédagogie populaire.

Le cœur du projet consiste à implanter une chaufferie, avec énergie renouvelable, associée à un réseau de chaleur desservant une vingtaine de sous-stations en chauffage et en Eau Chaude Sanitaire (ECS) situées à moins de 3,5 km du site. Ce projet très innovant permettrait de créer 9 emplois durables et non délocalisables. Il permettrait de voir émerger une véritable filière ENR locale.

Figure 15 : Vue 3D d'une potentielle future chaufferie biomasse à l'emplacement de la friche industrielle

Les autres développements prévus : remplacer la toiture amiantée des 5 000 m² de bâtiments existants par une centrale photovoltaïque (sans doute une des plus puissantes au nord de la Loire), une éolienne, des systèmes de récupérations d'eaux de pluies, un magasin solidaire, un verger pédagogique, un potager, des serres géothermiques, un séchoir à bois, une activité de recyclage des panneaux solaires, un centre de formation et un groupement d'employeurs.

Reconnaissante du soutien apporté depuis le début par la Communauté Urbaine de la ville, l'association a tenu à renvoyer la balle en accueillant, pendant 6 mois, 40 étudiants universitaires dans le cadre du lancement de projets tutorés.

Ce partenariat (notamment avec un IUT Génie Thermique et Energie) a, dès la rentrée 2011, pris plus d'ampleur avec le projet de chalets pédagogiques dédiés aux Energies Nouvelles Renouvelables (ENR). Ce projet consiste à mettre en place des chalets pouvant accueillir du public, et mettant en valeur les développements récents tant dans le domaine de la performance énergétique des bâtiments (matériaux isolants innovants) que dans celui de l'éco-construction ou celui des ENR.

C'est dans ce contexte qu'IDEX Energies a décidé de réaliser une pré-étude ou étude de faisabilité dans le but d'avoir un aperçu de la taille du projet, des puissances de chaufferie mises en jeu ainsi que du prix moyen global.

Cette pré-étude est détaillée dans la suite du mémoire.

3.2. Besoins énergétique des bâtiments de la collectivité

3.2.1. Point de départ

Le point de départ pour cette étude de dimensionnement d'un réseau de chaleur est un fichier Excel que nous a fait parvenir la commune, et qui donne l'ensemble des sous-stations à raccorder au réseau de chaleur, avec leur consommation moyenne annuelle en kWh, comme nous le montre la figure suivante :

CHAUFFERIE	Sous-station	CONSOMMATION 2006 - KWH	CONSOMMATION 2007 - KWH	CONSOMMATION 2008 - KWH	CONSOMMATION 2009 - KWH	CONSOMMATION 2010 - KWH	COMMENTAIRE	Consommation moyenne annuelle (kWh)
ECOLE	37	389 670	311 380	364 930	350 730	409 710		365 284
ECOLE	34						REPRIS SUR L'ECOLE PAGNOL	
CHÂTEAU	1						16000 litres de fioul	160 000
SALLE DE REMISE EN FORME	6					40 000	MOYENNE PCS - ELECTRIQUE	36 000
FOYER ASSOCIATIF	8					32 000	MOYENNE PCS - ELECTRIQUE	28 800
POLICE MUNICIPALE	70					69 000	MOYENNE PCS - GAZ	69 000
SALLE DES FETES	72					30 000	MOYENNE PCS - GAZ	30 000
ECOLE	85	112 440	70 780	98 920	109 400	138 900		106 088
ECOLE	45	151 670	126 500	141 970	159 790	171 990		150 384
MAIRIE	27	571 510	580 220	649 480	562 400	712 660		615 254
OFFICE DU TOURISME	33						REPRIS SUR LA MAIRIE	
GROUPE SCOLAIRE	86	463 270	370 790	380 980	378 810	274 520		373 674
ESPACE ASSOCIATIF	30	313 160	315 960	403 440	385 010	405 080		364 530
ATELIERS MUNICIPAUX	22	68 960	69 580	208 200	204 380	116 170		133 458
BEAUX ARTS	87	42 110	31 010	37 670	33 500	41 290		37 116
BIBLIOTHEQUE	88	49 980	40 960	55 280	55 570	55 450		51 448
CENTRE NAUTIQUE	58	50 190	35 770	39 820	42 400	58 950		45 426
CYBER CENTRE	89	68 220	70 760	68 600	61 470	88 420		71 494
ESPACE ASSOCIATIF	42	972 270	697 710	762 830	736 580	897 940		813 466
BIBLIOTHEQUE	43						REPRIS SUR L'ECOLE DESNOS	
INSTITUT D'EDUCATION MOTRICE	44						REPRIS SUR L'ECOLE DESNOS	
BIBLIOTHEQUE	90	24 970	22 200	28 550	23 970	29 940		25 926
SALLE DES SPORTS	21	149 920	144 670	174 200	198 460	185 190		170 488
SERVICE FINANCIER	36	47 300	48 440	51 820	38 660	27 510		42 746
SERVICE JEUNESSE ET SPORTS	91	41 870	34 120	45 460	51 800	57 310		46 112
CHALET ASSOCIATIF	92	14 890	10 880	9 590	8 670	11 560		11 118
TENNIS	54	132 100	105 500	103 150	103 840	117 170		112 352
CENTRE SOCIAL	93	275 280	291 460	281 930	207 780	264 540		264 198
SALLE DES SPORTS	59	95 570	325 710	380 150	298 700	371 270		294 280
SALLE DES SPORTS	53	266 790	303 130	280 600	295 540	396 020		308 416
ECOLE	51	132 570	120 630	140 330	147 420	167 500		141 690
SALLE DES SPORTS	18	117 080	107 120	145 150	114 780	152 020		127 230
SALLE DES SPORTS	52	26 980	65 840	79 010	104 240	108 070		76 828
SALLE DES SPORTS	94	137 560	115 610	92 220	114 010	164 570		124 794
MAIRIE ANNEXE	71	111 350	87 830	106 420	107 430	117 480		106 102
MDA/FOYER	95	69 010	322 120	380 830	341 310	339 130		290 480
FOYER ASSOCIATIF	96	136 440	111 720	143 290	119 300	139 780		130 106
CENTRE ASSOCIATIF	97	111 570	121 790	175 630	183 910	176 660		153 912
ECOLE	79	135 100	129 150	132 170	136 510	154 280		137 442
ECOLE	98	204 250	197 530	232 330	228 040	245 350		221 500
ECOLE	73	137 280	115 500	125 020	104 100	114 100		119 200
SALLE DES SPORTS	99	120 780	95 380	145 290	147 150	155 980		132 916
SALLE DES SPORTS	100	126 610	117 240	110 390	117 450	136 750		121 688
ECOLE	49	371 530	326 060	269 370	286 420	269 360		304 548
HALTE GARDERIE	48						REPRIS SUR L'ECOLE BRASSENS	
ACADEMIE DE MUSIQUE	75	71 270	60 180	69 380	71 650	95 910		73 678
PISCINE	38	726 350	746 160	835 030	861 390	853 280		804 442
ESPACE COMMUNAL DES SOLIDARITES	28					38 550		38 550
ESPACE PREVENTION ET INFO SANTE	29					290 337		290 337
MAISON DE L'EMPLOI	32					71 028		71 028

Tableau 1 : Fichier Excel brut : consommation des sous-stations du futur réseau de chaleur

Si nous zoomons sur quelques lignes :

CHAUFFERIE	Sous-station	CONSOMMATION 2006 - KWH	CONSOMMATION 2007 - KWH	CONSOMMATION 2008 - KWH	CONSOMMATION 2009 - KWH	CONSOMMATION 2010 - KWH	Consommation moyenne annuelle (kWh)
ECOLE	85	112 440	70 780	98 920	109 400	138 900	106 088
ECOLE	45	151 670	126 500	141 970	159 790	171 990	150 384
MAIRIE	27	571 510	580 220	649 480	562 400	712 660	615 254

Nous pouvons voir que nous avons comme informations les noms ou les types de sous-station qui sont toutes situées dans des bâtiments communaux, avec leurs numéros de référence, ainsi que leurs adresses dans certains cas qui nous seront utiles pour la géo-localisation de celles-ci.

Ensuite nous avons les consommations de chaque sous-stations de l'année 2006 jusqu'à l'année 2010 qui nous permettent d'avoir un moyenne sur 4 ans, en kWh.

A l'aide de ces données, nous allons pouvoir dans un premier temps calculer la puissance appelée de chaque sous-station (en kW) et dans un second temps tracer le plan du réseau.

3.2.2. Calcul des puissances des sous-stations

Dans les consommations des bâtiments données par la commune, il y a une part pour le chauffage et une autre pour l'eau chaude sanitaire (ECS). Statistiquement, et d'après l'expérience d'IDEX Energies, la part de chauffage dans la consommation totale est généralement de 95%, la part d'ECS étant donc de 5%.

La configuration des réseaux chauffage et ECS dans uns sous-station est définie selon le schéma de principe suivant (avec une température de sortie ECS de 60°c) :

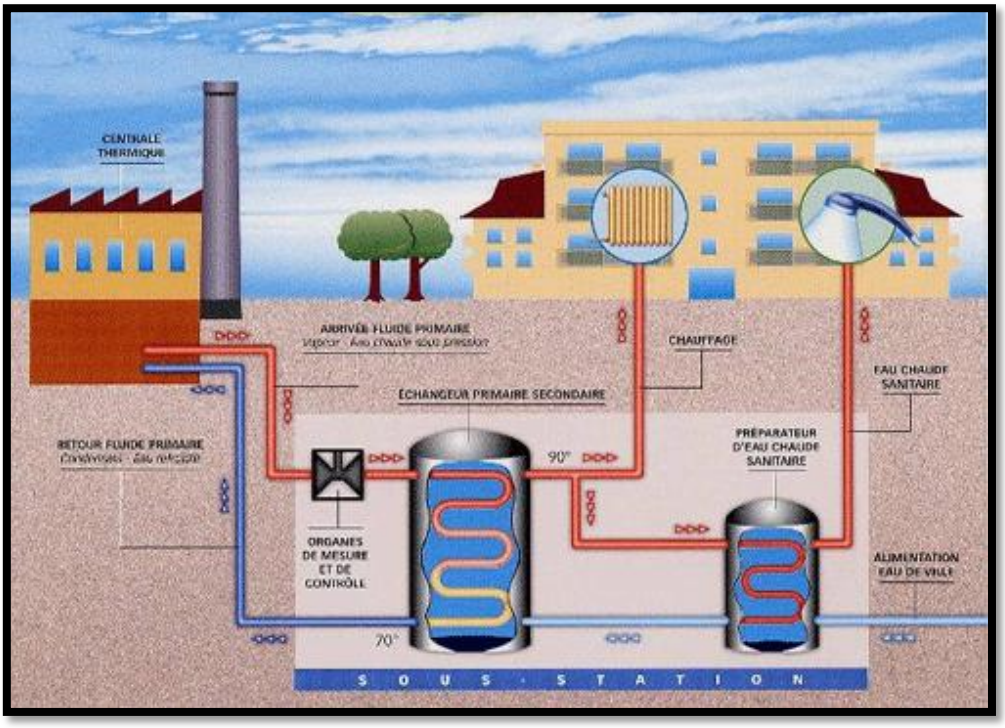


Figure 16 : Réseau chauffage et ECS dans une sous-station

La méthode pour calculer la puissance à partir de la consommation d'énergie n'est pas la même pour le chauffage ou pour la production d'ECS.

Il existe une relation pour calculer la puissance nécessaire afin de chauffer un bâtiment à partir de sa consommation énergétique, et vice-versa. Cette relation fait intervenir plusieurs critères que sont la rigueur climatique, l'intermittence et les températures intérieures et extérieures.

Pour calculer la puissance nécessaire afin de chauffer l'ECS, c'est moins compliquer car la production d'ECS est constante au cours de l'année et ne dépend pas ou très peu de la rigueur climatique.

3.2.2.1. Chauffage

3.2.2.1.1. Rigueur climatique : le Degré Jour Unifié (DJU)

Les degrés jour unifiés ou DJU permettent de réaliser des estimations de consommations d'énergie thermique en fonction de la rigueur climatique.

Il existe deux méthodes de calcul des DJU donnant des résultats différents : une méthode dite « Météo » et une méthode dite « Professionnels de l'énergie » : la méthode COSTIC (conforme à la méthode COSTIC réglementaire pour les marchés d'exploitation chauffage à utiliser pour le suivi).

Par définition, le nombre de degrés jours unifiés (DJU) est déterminé en faisant la différence entre la température de référence (18 °C), et la moyenne entre la température minimale et la température maximale du jour. C'est donc une estimation de la différence entre la température intérieure de référence (hors apports naturels et domestiques) et la température extérieure moyenne de la journée. Cette donnée est utile pour l'estimation des consommations d'énergies de chauffage d'un bâtiment.

$$DJ = \left[T_{\text{référence}} - \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} \right]$$

Par convention, le DJU est égale à 0 si $T_{moyenne\ observée} > T_{référence} = 18°C$

La méthode météo est plus précise car elle utilise les relevés de température toutes les heures et fait une moyenne sur la journée tandis que la méthode COSTIC ne prend que les températures minimales et maximales de la journée. Mais c'est la 2ème méthode qui est pris en compte dans le cadre d'un marché public et qui fait foi dans un contrat d'exploitation de chauffage.

IDEX Energies utilise une banque de données répertoriant les DJU moyens des villes en France, moyenne réalisée sur les 30 dernières années. Pour ce qui est de notre commune, nous avons pris le nombre de DJU d'une grande ville du Nord à proximité, à savoir Dunkerque, qui est de 2334,58.

3.2.2.1.2. *Intermittence*

L'intermittence est définie comme étant le rapport du temps d'utilisation des équipements de chauffage par le temps d'activité d'un établissement.

Une grande partie des réductions de consommation peut être obtenue par ralenti ou arrêt programmé. C'est le cas, en particulier en tertiaire, où les profils de température de nuit, ou de fin de semaine ont souvent une allure suivante :

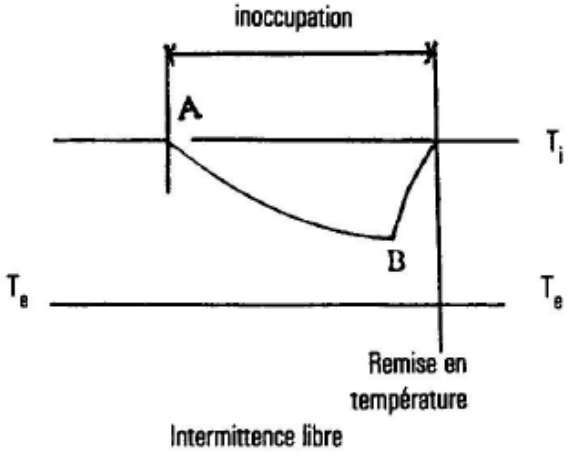


Figure 17 : Modèle d'intermittence

On peut montrer que, si l'intermittence est périodique (ce qui est le cas général), l'économie apportée en chauffage continu est indiquée par l'écart moyen de température (Ti – Te) pendant le cycle.

Des ratios ont été établis par statistiques pour différents types de bâtiments, voici quelques exemples :

	Logements	Bureaux	Scolaire	Hospital
Intermitence	90,00%	50,00%	59,05%	91,00%

L'ensemble des bâtiments alimentés par le réseau de chaleur sont des bâtiments communaux (écoles, salles de sport, administrations,…) et l'intermittence moyenne totale est estimée à 85%.

3.2.2.1.3. *Relation entre Consommation (kWh) et Puissance (kW) pour le chauffage d'un bâtiment*

Voici donc la relation entre la consommation annuelle d'un bâtiment (en kWh) et la puissance qu'il faut lui délivrer pour le chauffer (en kW) :

$$Consommation = \frac{Puissance \times DJU \times Intermittence \times 24}{T_{intérieure} - T_{extérieure\ minimale}}$$

Avec : - Consommation en kWh/an
- Puissance en kW
- Intermittence en %
- Les températures en °C

3.2.2.2. Production d'eau chaude sanitaire

La relation entre la consommation d'énergie en kWh pour la production d'ECS et la puissance qu'il faut fournir est plus simple ici : il suffit juste de diviser la consommation par le nombre d'heure de production d'ECS par année. On peut voir, d'après le graphique suivant, que la production journalière d'ECS, en Europe, est d'environ 6h (nombre d'heure ayant un coefficient horaire supérieur à 1) :

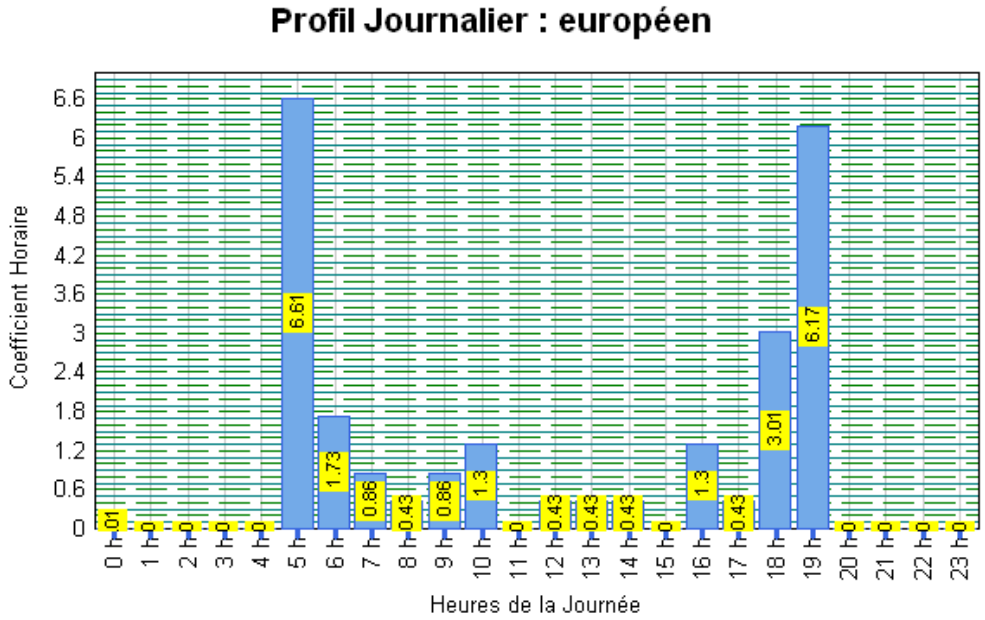


Figure 18 : Profil journalier de production d'ECS en Europe

La relation est donc la suivante :

$$Puissance = \frac{Consommation}{6 \times 365}$$

Avec : - Puissance en kW

- Consommation en kWh
- 6 le nombre d'heure par jour et 365 le nombre de jour dans une année

3.2.2.3. Résultats

Voici donc le tableau suivant répertoriant les puissances calculées à l'aide des relations ci-dessus pour chaque sous-station (puissance chauffage + puissance de production d'ECS) ainsi que la puissance totale souscrite qui correspond à la puissance totale multipliée par un coefficient de sécurité de 1,15. Et enfin la puissance totale de l'ensemble des sous-stations (Case bleu) :

CHAUFFERIE	Sous-station	Consommation moyenne annuelle (kWh)	Puissance totale (kW)	Puissance totale souscrite (kW)
ECOLE	37	365 284	212,4	244,2
ECOLE	34			
CHÂTEAU	1	160 000	93,0	107,0
SALLE DE REMISE EN FORME	6	36 000	20,9	24,07
FOYER ASSOCIATIF	8	28 800	16,7	19,3
POLICE MUNICIPALE	70	62 100	36,3	41,7
SALLE DES FETES	72	27 000	15,8	18,1
ECOLE	85	106 088	61,7	70,9
ECOLE	45	150 384	87,4	100,5
MAIRIE	27	615 254	357,7	411,3
OFFICE DU TOURISME	33			
GROUPE SCOLAIRE	86	373 674	217,2	249,8
ESPACE ASSOCIATIF	30	364 530	211,9	243,7
ATELIERS MUNICIPAUX	22	133 458	77,6	89,2
BEAUX ARTS	87	37 116	21,6	24,8
BIBLIOTHEQUE	88	51 448	29,9	34,4
CENTRE NAUTIQUE	58	45 426	26,4	30,4
CYBER CENTRE	89	71 494	41,6	47,8
ESPACE ASSOCIATIF	42	813 466	472,9	543,9
BIBLIOTHEQUE	43			
INSTITUT D'EDUCATION MOTRICE	44			
BIBLIOTHEQUE	90	25 926	15,1	17,3
SALLE DES SPORTS	21	170 488	99,1	114,0
SERVICE FINANCIER	36	42 746	24,9	28,6
SERVICE JEUNESSE ET SPORTS	91	46 112	26,8	30,8
CHALET ASSOCIATIF	92	11 118	6,5	7,4
TENNIS	54	112 352	65,3	75,1
CENTRE SOCIAL	93	264 198	153,6	176,6
SALLE DES SPORTS	59	294 280	171,1	196,7
SALLE DES SPORTS	53	308 416	179,3	206,2
ECOLE	51	141 690	82,4	94,7
SALLE DES SPORTS	18	127 230	74,0	85,1
SALLE DES SPORTS	52	76 828	44,7	51,4
SALLE DES SPORTS	94	124 794	72,5	83,4
MAIRIE ANNEXE	71	106 102	61,7	70,9
MDA/FOYER	95	290 480	168,9	194,2
FOYER ASSOCIATIF	96	130 106	75,6	87,0
CENTRE ASSOCIATIF	97	153 912	89,5	102,9
ECOLE	79	137 442	79,9	91,9
ECOLE	98	221 500	128,8	148,1
ECOLE	73	119 200	69,3	79,7
SALLE DES SPORTS	99	132 916	77,3	88,9
SALLE DES SPORTS	100	121 688	70,7	81,4
ECOLE	49	304 548	177,1	203,6
HALTE GARDERIE	48			
ACADEMIE DE MUSIQUE	75	73 678	42,8	49,3
PISCINE	38	804 442	467,7	537,8
ESPACE COMMUNAL DES SOLIDARITES	28	38 550	22,4	25,8
ESPACE PREVENTION ET INFO SANTE	29	290 337	168,8	194,1
MAISON DE L'EMPLOI	32	71 028	41,3	47,5
		Total	Total	Total
TOTAL		8 183 629	4 757,8	5 471,5

Tableau 2 : Puissances appelées des sous-stations

3.3. Plan et dimensionnement du réseau de chaleur

Maintenant que nous avons les puissances appelées de toutes les sous-stations, il convient de réaliser un plan du réseau de chaleur qui permettra de les alimenter.

Pour élaborer ce plan, il faut respecter quelques « règles », à savoir :

- Partir de l'endroit où l'implantation de la chaufferie est prévue,
- Relier toutes les sous-stations en prenant soin d'avoir une longueur de réseau minimal afin de limiter les pertes énergétiques et le coût du réseau lui-même,
- Tout en gardant une longueur de réseau minimal, prendre soin à privilégier son passage par des chemins de terre ou d'herbe où les coûts des travaux de terrassement sont sensiblement inférieurs à un passage sous une route ou un trottoir (présence d'une couche de bitume, de canalisations enterrées,…),
- Ne pas hésiter à créer des piquages dans le réseau principal pour créer des branches plus petites, nécessitant moins d'apport d'énergie, et qui utiliseront donc des diamètres de canalisation plus faibles et moins coûteux.

Ces règles sont à appliquer dans le but de faire des économies d'énergie et donc forcement des réductions du coût global du projet.

3.3.1. Localisation des sous-stations

A l'aide des noms et parfois des adresses des sous-stations lorsqu'elles nous sont communiquées, nous pouvons les localiser et les repérer sur une carte à partir du logiciel « Google Earth » afin d'avoir une vue d'ensemble, comme nous pouvons le voir sur la figure suivante :

Figure 19 : Repères de l'ensemble des sous-stations sur une carte du logiciel « Google Earth »

Donc chaque sous-station est repérée par un point rouge, avec son numéro de référence en jaune (voir fichier Excel précédent). La Chaufferie est prévue au sud-ouest de la carte dans l'actuelle friche industrielle, et est repérée par un point jaune. C'est donc à partir de ce point que le réseau de chaleur doit partir, avec ses deux canalisations, aller et retour.

3.3.2. Elaboration du plan du réseau de chaleur

Il convient donc de relier tous ces points synonymes de sous-station au réseau, tout en respectant les règles présentées précédemment.

Voici une des possibilités de plan de réseau de chaleur de la ville, que nous utiliserons pour le reste de l'étude :

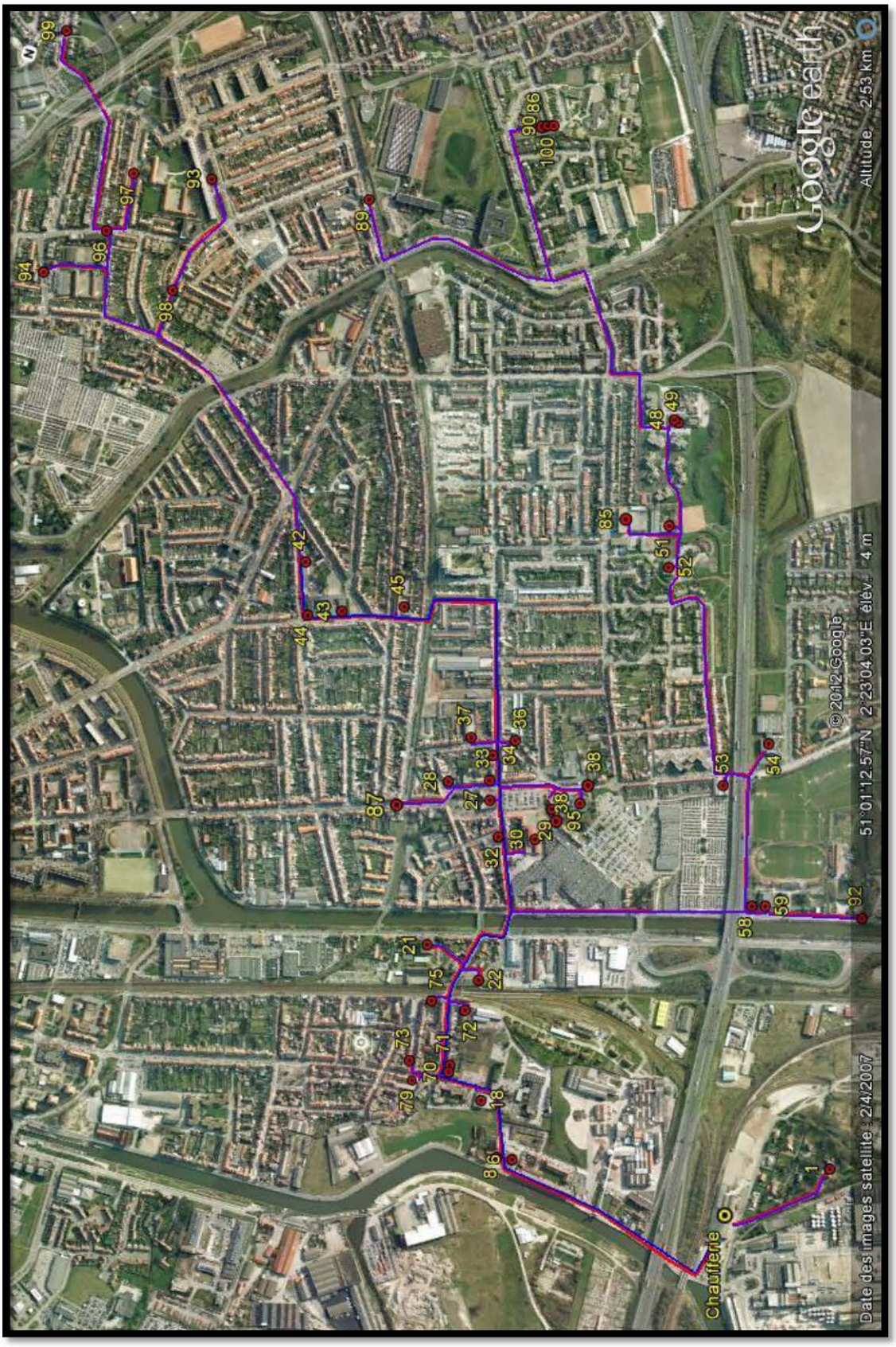


Figure 20 : Plan du réseau de chaleur utilisée pour l'étude

On peut décomposer ce réseau en trois parties, correspondant à de plus petits réseaux.

En effet, nous avons un premier « fractionnement » du réseau dès son entame, au niveau de la chaufferie, comme le montre la figure ci-contre. Les traits rouges représentent le circuit « départ eau chaude » et les traits bleus le circuit « retour eau froide ».

On peut voir qu'une partie sort de la chaufferie pour alimenter la sous-station n°1 – « Le château », d'une puissance totale de 93 kW (puissance calculée et donnée dans le précédent *tableau n°2*), et que l'autre partie alimente tout le reste du réseau.

Figure 21 : Fractionnement n°1 du réseau de chaleur au niveau de la chaufferie

Le 2ème fractionnement s'opère entre les sous-stations n°21/22 et 32, comme le montre la figure ci-contre.

En effet, nous pouvons voir deux groupements assez distincts qui nous permettent de pouvoir scinder le réseau en deux parties afin d'avoir des diamètres de canalisation plus petits, comme expliqué précédemment.

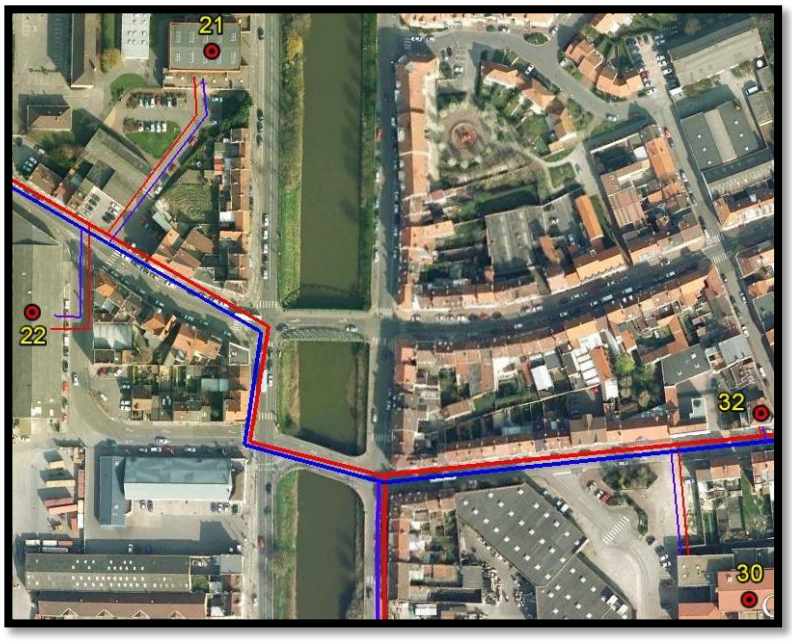


Figure 22 : Fractionnement n°2 du réseau de chaleur

3.3.3. Dimensionnement du réseau de chaleur

Le plan du réseau de chaleur étant réalisé, il convient maintenant de le dimensionner, c'est-à-dire de calculer tous les diamètres et longueurs de canalisations nécessaires aux circuits « départ eau chaude » et « retour eau froide ».

Nous allons donc, dans cette partie, présenter les outils et les méthodes de calcul nécessaires au dimensionnement de ce réseau.

3.3.3.1. Tronçons

En sortie de chaufferie, le circuit « départ eau chaude » commence à desservir les premières sous-stations, et son débit diminue alors au fur et à mesure jusqu'à être minimal et pratiquement nul lorsqu'il atteint la dernière sous-station.

C'est exactement le même cas pour le circuit « retour eau froide ». En effet si on se place au niveau de la dernière sous-station du réseau, son débit est minimal, et au fur et à mesure du retour vers la chaufferie, le circuit récupère les eaux de retour qui ont cédées leurs calories aux différentes sous-stations.

Pour résumer, l'eau chaude arrive dans la sous-station via un piquage dans le circuit « départ eau chaude », passe à travers un échangeur qui transfère les calories du circuit primaire au circuit secondaire, et ressort à une température inférieure pour être rendu au circuit « retour eau froide », comme le montre la figure suivante :

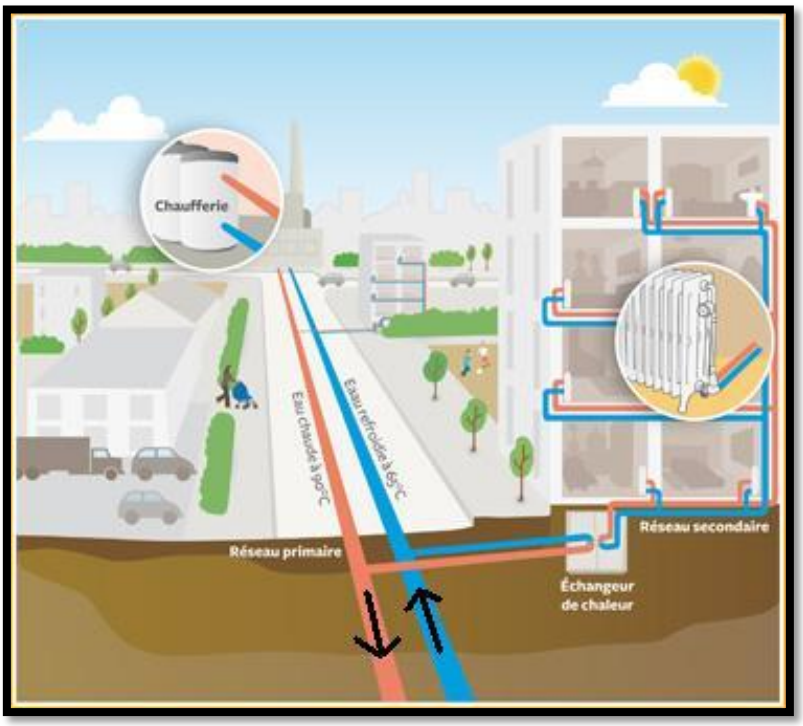


Figure 23 : Schéma montrant les piquages dans les circuits « départ eau chaude » et « retour eau froide »

Donc en définitive, après chaque piquage dans le réseau, c'est-à-dire après chaque sous-station, le débit varie, et donc le diamètre de la canalisation est susceptible de varier également.

Nous allons donc découper le réseau en plusieurs petits tronçons et la méthode est la suivante : dès lors que l'on a un piquage dans le réseau, il faut changer de tronçon.

La finalité est de pouvoir, pour chaque tronçon, calculer un débit d'eau et donc un diamètre de canalisation adéquate. Après cela, nous pourrons répertorier tous les tronçons qui possèdent le même diamètre nominal (DN), et ainsi avoir une longueur totale de tuyauterie pour chaque DN.

Après avoir découpé le réseau, nous obtenons environ 85 tronçons répertoriés par lettre de l'alphabet, chaque piquage est marqué par une lettre.

Par exemple : Tronçon A-B ; Tronçon J-K ; …

Lorsque le réseau se sépare en petites ramifications, des numéros sont rajoutés aux lettres.

Par exemple : Tronçon H-H1 ; Tronçon K81-K82 ; …

La figure suivante montre ces tronçons sur la carte « Google Earth », mais il est difficile de tout discerner en raison de la petite taille des tronçons par rapport au réseau de chaleur entier, ainsi que de leur grande densité par endroit.

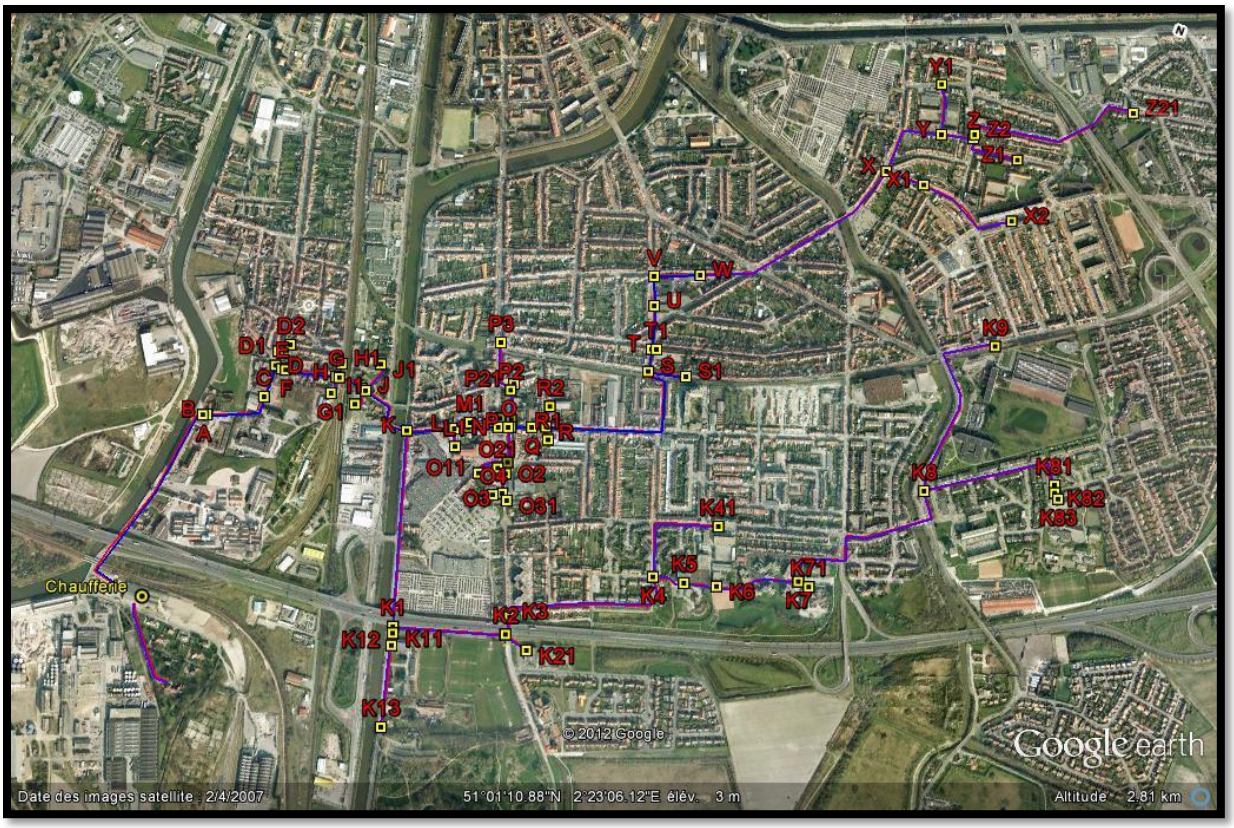


Figure 24 : Différents tronçons du réseau

3.3.3.2. Calcul du débit d'eau dans les tronçons

Afin de pouvoir déterminer le diamètre adéquat de canalisation, il faut d'abord calculer le débit dans chaque tronçon. Pour cela, nous allons nous servir des puissances des sous-stations calculées précédemment.

Mais il ne faut pas oublier qu'ici, nous sommes du point de vue du réseau de chaleur, et non plus des sous-stations. En effet les puissances calculées précédemment sont considérées pour des sous-stations isolées du réseau, il faut donc faire attention ici à ne pas négliger les pertes thermiques du réseau, si bien isolé soit-il.

Les fournisseurs de canalisations pré-isolées garantissent, dans leurs fiches techniques, un rendement moyen du réseau de 95% sur une année. Ce rendement fluctue, en effet, au cours de l'année, il est maximal lorsque le réseau fonctionne à pleine puissance, c'est-à-dire en hiver, et minimal (70 à 80%) en été, puisque le débit d'eau chaude circulant dans les canalisations est plus faible, et de ce fait, cette eau doit chauffer la partie « vide » de la canalisation, laissée vacante. Les pertes thermiques du réseau représentent donc 5% de la quantité d'énergie qui transite dans celui-ci. On peut donc calculer ces pertes de la façon suivante :

$$5\% = \frac{Pertes\ thermique\ (kWh)}{Consommation\ sous-station\ (kWh) + Pertes\ thermique\ (kWh)}$$

$$5\% = \frac{Pertes\ thermique\ (kWh)}{8\ 183\ 629 + Pertes\ thermique\ (kWh)}$$

$$\boxed{\boldsymbol{Pertes\ thermique = 430\ 717\ kWh}}$$

Nous avons donc une consommation totale qui a augmenté de 430 717 kWh, ce qui correspond à une augmentation de la puissance totale de :

$$Puissance = \frac{430\ 717}{(0{,}95 \times 24 * 365) + (0{,}05 * 6 * 365)}$$

$$\boxed{\boldsymbol{Puissance = 51{,}08\ kW}}$$

La puissance totale finale à fournir au réseau de chaleur est donc de 5 530,3 kW, ce qui correspond à l'ajout des 51,08 kW de pertes thermiques à la puissance des sous-stations, le tout multiplié par le coefficient 1,15 :

Puissance totale (kW)	Puissance totale souscrite (kW)	
Total	Total	
4 757,8	5 471,5	5 530,3
Sans perte réseau		Avec perte réseau

La méthode pour calculer le débit dans une canalisation à partir d'une puissance est la suivante :

1) Connaitre la puissance ou la quantité de chaleur potentiellement échangeable à travers un échangeur de chaleur pour un ΔT donné.
2) Connaitre les caractéristiques physiques du fluide, en l'occurrence ici de l'eau, à la température moyenne.
3) Utiliser la relation suivante : $P = Q_{m\,eau} \times C_{p\,eau} \times \Delta T$

$$P = Q_{v\,eau} \times \rho_{v\,eau} \times C_{p\,eau} \times \Delta T$$

Avec : - P = Puissance (kW)

- $Q_{m\,eau}$ = Débit massique de l'eau (kg/sec)
- $Q_{v\,eau}$ = Débit volumique de l'eau (m^3/sec)
- $\rho_{v\,eau}$ = Masse volumique de l'eau (kg/m^3)
- $C_{p\,eau}$ = Chaleur massique (kJ/kg.K)
- ΔT = Différence de température entre le départ eau chaude et le retour eau froide (°C)

Nous avons vu précédemment que le fluide utilisé dans ce réseau de chaleur est de l'eau chaude. Généralement dans ce type de réseau, les températures de l'eau sont de 90°C en départ de chaufferie et de 70°C en retour de chaufferie. Nous avons donc un ΔT de 20°C.

Les caractéristiques de l'eau chaude sont prises à la température moyenne T = 80°C, et sont les suivantes :

	$\rho_{v\,eau}$ (kg/m^3)	$Cp_{\,eau}$ (kJ/kg.K)	$\upsilon_{\,eau}$ (m^2/s)
Eau à 80°C	971,6	4,195	0,375

Tableau 3 : Caractéristiques physiques de l'eau à 80°C

Il ne nous reste maintenant plus qu'à connaitre la puissance qui transite dans chaque tronçon. La méthode pour y parvenir est de partir de la chaufferie avec la puissance totale qui est de 5 530,3 kW

et de parcourir le réseau en soustrayant la puissance de chaque sous-station. Lorsque l'on tombe sur des petites ramifications, il faut suivre la même méthode, c'est-à-dire partir du départ avec la somme des puissances des sous-stations présentes dans la ramification, et soustraire successivement.

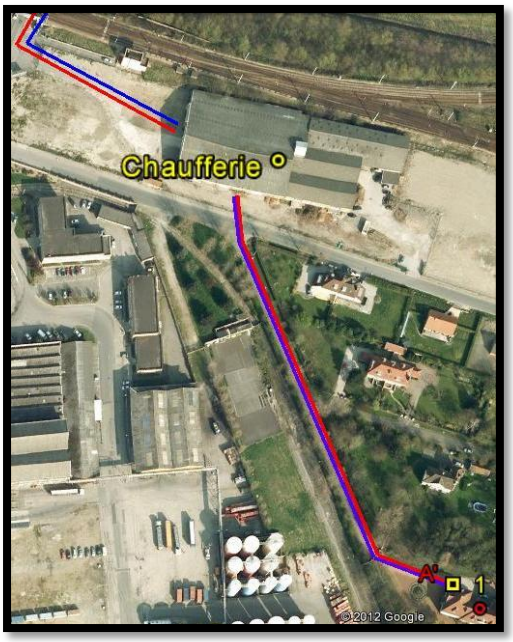


Figure 25 : Tronçon « Chaufferie – A' »

Par exemple, pour commencer au départ de la chaufferie, nous avons ce que nous appelons le 1er fractionnement du réseau, si nous prenons la plus petite partie, c'est-à-dire la canalisation qui part de la chaufferie pour aller à la sous-station 1 et qui correspond au tronçon appelé « Chaufferie – A' » (voir figure ci-contre), nous avons donc une seule sous-station à desservir qui a besoin d'une puissance de 107 kW. Donc la puissance de ce tronçon est de 107 kW.

Pour apporter cette puissance à la sous-station, avec un ΔT de 20°C, il faut le débit suivant :

$$Q_{v\,eau} = \frac{P}{\rho_{v\,eau} \times C_{p\,eau} \times \Delta T}$$

$$Q_{v\,eau} = \frac{107}{971{,}6 \times 4{,}195 \times 20}$$

$$\boldsymbol{Q_{v\,eau} = 1{,}313.10^{-3}\ m^3/s}$$

→ **soit 4,724 $\boldsymbol{m^3/h}$**

Autre exemple, toujours à partir de la chaufferie, si nous prenons cette fois la plus grosse partie, celle qui dessert tout le reste du réseau, nous avons une puissance égale à notre puissance totale de 5 530,3 kW à laquelle nous devons soustraire la puissance du tronçon précédent « Chaufferie – A' » de 107 kW. Cela revient à une puissance de 5 423,3 kW, et donc avec le même calcul que précédemment, à un débit de : $\boldsymbol{6{,}669.10^{-2}\ m^3/s}$ soit $\boldsymbol{240{,}08\ m^3/h}$. Ce qui est le débit maximal du réseau.

Figure 26 : Tronçon « Chaufferie – A »

Il faut donc répéter cette opération à tous les tronçons du réseau de chaleur. Maintenant que nous avons les débits de tous les tronçons, nous pouvons désormais calculer leurs diamètres.

3.3.3.3. Calcul du diamètre des tronçons

Il existe différentes méthodes pour obtenir le diamètre d'une canalisation, par exemple :

- la méthode analytique qui consiste à résoudre des équations,
- la méthode graphique qui utilise des abaques.

En ce qui concerne la méthode analytique, il fait intervenir les relations de pertes de charges suivantes :

- Pertes de charge régulières :

$$\Delta P = \Lambda \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g}$$

- Relation de Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\Lambda}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon}{3{,}71}\right) + \frac{2{,}51}{R_e \times \sqrt{\Lambda}}$$

- Pertes de charge singulières :

$$\Delta P = \xi \times \frac{\rho \times V^2}{2}$$

- Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{V \times \rho \times D}{\mu}$$

Connaissant les caractéristiques physiques de l'eau à 80°C, le débit, la rugosité des canalisations ($\epsilon_{acier} = 0{,}05\ mm$), les pertes de charges qui doivent être comprises entre 10 et 25 mmCE pour garantir un bon fonctionnement du réseau, nous pouvons calculer le diamètre. Mais cette méthode est compliquée et longue.

Il est donc plus simple et plus rapide d'utiliser des abaques, comme celui de Dariès (voir figure 27 ci-après pour illustration, et en annexe pour utilisation), qui connaissant deux éléments (débit et pertes de charge dans notre cas) nous permettent d'obtenir le diamètre de canalisation et la vitesse de l'eau. Cette méthode est moins précise, mais ces imprécisions seront comprises dans le coefficient de sécurité que nous rajoutons.

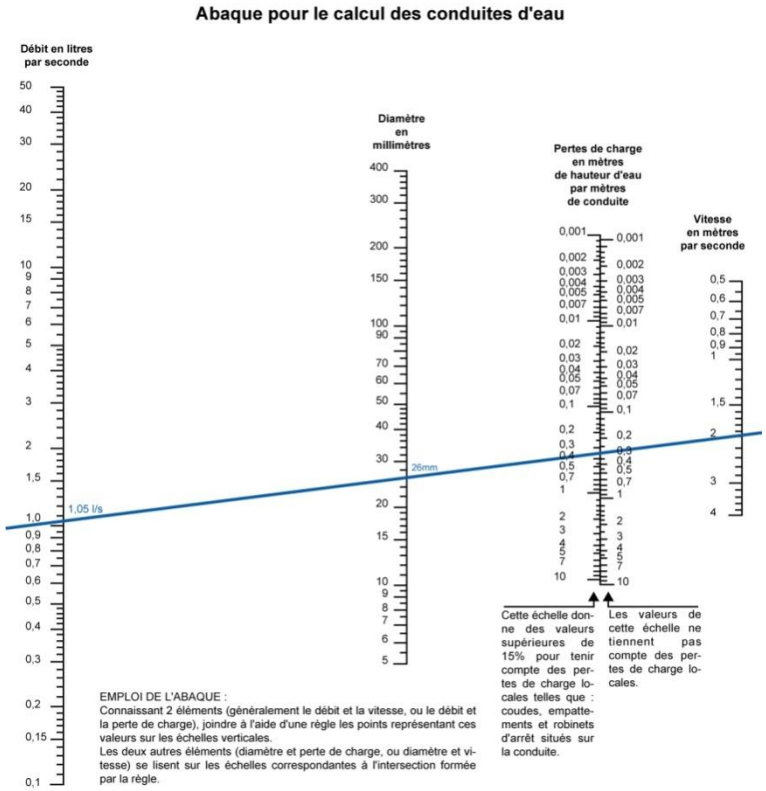


Figure 27 : Abaque de Dariès

Nous avons donc maintenant les diamètres de chaque tronçon, et la dernière étape du dimensionnement est de convertir ces diamètres en DN à partir du tableau ci-contre, puis de mesurer la longueur de chaque tronçon avec l'outil « Google Earth », et enfin de classer dans un tableau (ci-dessous) la longueur de canalisation pour chaque DN afin de pouvoir demander des devis auprès des fournisseurs.

D int	DN
21,7	20
28,5	25
37,2	32
43,1	40
54,5	50
70,3	65
82,5	80
107,1	100
132,5	125
160,3	150
210,1	200
263	250
312,7	300
344,4	350
393,8	400
444,4	450
495,4	500
546,4	550
595,8	600

Tableau 4 : Conversion diamètre intérieur - DN

Diamètre intérieur	DN	Longueur Aller & Retour
(mm)	(mm)	(ml)
210,1	200	2966,2
160,3	150	646,0
132,5	125	243,2
107,1	100	6701,3
82,5	80	932,8
70,3	65	3453,0
54,5	50	1384,8
43,1	40	1296,0
37,2	32	3019,4
28,5	25	2009,4
21,7	20	1068,0
TOTAL		23 720,1

Tableau 5 : Classification et longueur de canalisation du réseau de chaleur

3.4. Chaufferie

3.4.1. Type d'énergie renouvelable

Le réseau de chaleur étant dimensionné, il faut maintenant s'intéresser à la chaufferie, et notamment aux chaudières, à leurs types de combustibles et à leurs puissances.

Nous avons déjà vu précédemment, que la commune souhaitait que le réseau de chaleur soit alimenté par une ou des énergie(s) renouvelable(s). Qui dit énergies renouvelables, dit notamment ressources locales ; et les ressources disponibles dans la région du Nord-Pas-de-Calais, étant en adéquation avec une énergie renouvelable, sont la géothermie et l'utilisation de la biomasse.

3.4.1.1. La géothermie

La géothermie permet d'aller prélever l'énergie sous forme de chaleur contenue dans le sous-sol. Pour arriver à puiser l'énergie géothermique, soit on pompe l'eau contenue dans le sous-sol (à environ 12°C), soit on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre. Pour la 2ème option, le fluide se réchauffe et remonte chargé d'énergie qui peut être transformée en électricité ou utilisée directement pour le chauffage des bâtiments. On distingue trois types de géothermie :

- la géothermie peu profonde à basse température (30 à 100m)
- la géothermie profonde à haute température (profondeur fonction de la température et de la région du globe considérée)
- la géothermie très profonde à très haute température (profondeur fonction de la température et de la région du globe considérée)

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou sur le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne). Elle peut quand même contribuer à un réchauffement local des milieux là où les calories seront valorisées, si elles le sont massivement.

Le principal inconvénient de la géothermie basse température, est justement que l'eau prélevée, ou le fluide caloporteur, est à une température d'environ 12°C, il faut donc utiliser une pompe à chaleur afin d'obtenir des températures jusqu'à 60-65°c. Les émetteurs de chaleurs dans les bâtiments ne fonctionnant que rarement en basse température, les eaux du réseau doivent être réchauffées pour atteindre un niveau de température d'environ 90°C. Le coût d'exploitation de cette géothermie est donc indexé sur le prix de l'électricité (PAC) et du gaz (hausse de la température), qui sont deux énergies dont les prix ont une forte probabilité d'augmentation.

Pour la géothermie haute température, il est impératif de forer bien plus profondément, et alors ce sont les coûts de mise en œuvre de l'installation qui deviennent le principal inconvénient.

Voici un schéma d'un réseau de chaleur géothermique, avec une géothermie profonde à haute température :

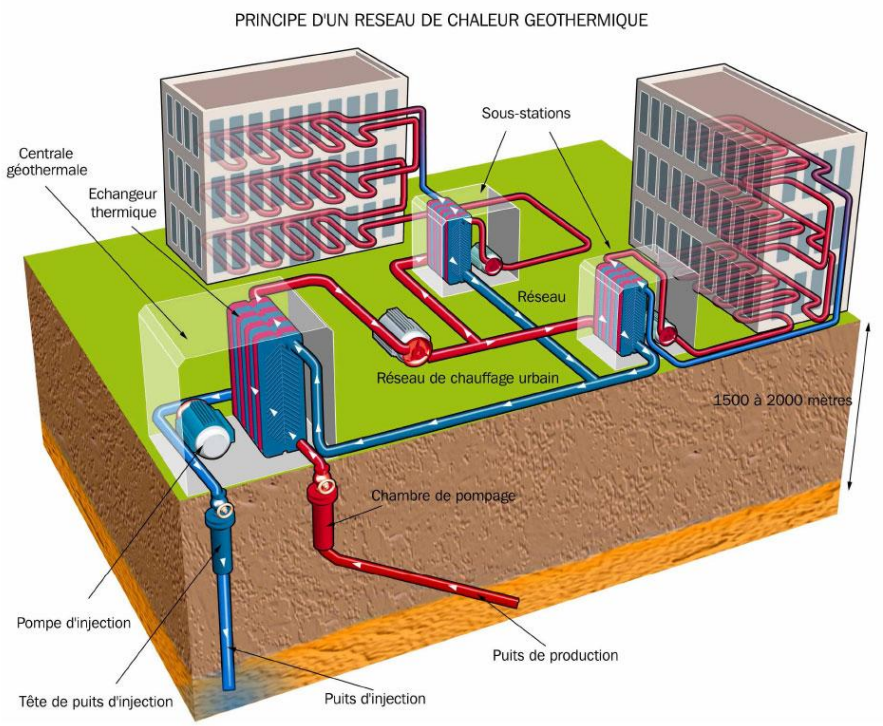


Figure 28 : Schéma d'un réseau de chaleur géothermique

3.4.1.2. La biomasse

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

La biomasse est une ressource renouvelable lorsqu'elle est utilisée et gérée de façon durable.

Elle permet de réduire la quantité de déchets envoyés aux sites d'enfouissement. Grâce à la combustion de matières inutilisables telles l'écorce, les déchets de construction (non traités), on peut produire de l'énergie utile, et il est moins nécessaire d'élargir les sites d'enfouissement locaux. Elle peut apporter des solutions à l'enjeu du changement climatique.

En effet, la solution biomasse aide à la gestion des déchets solides. Chaque jour, des millions de tonnes de déchets solides sont produits, dont notamment les déchets biodégradables. Lorsque les déchets sont utilisés comme biomasse, on répond à deux demandes : la baisse de la pollution et l'augmentation des ressources énergétiques.

L'utilisation de l'énergie biomasse n'augmente pas les émissions atmosphériques de dioxyde de carbone, une des principales sources de gaz à effet de serre, grâce aux cycles de repousse des plantes et des arbres. Elle peut également réduire les émissions de méthane, un autre gaz à effet de serre, qui provient de la décomposition de matière organique.

En revanche, il est nécessaire d'avoir une chaudière gaz en appoint de celles fonctionnant bois, afin de palier au problème des minimums techniques des chaudières bois et aux éventuelles impossibilités de livraison du bois.

Lorsque les matières inutilisables telles que les écorces, déchets de construction …, ne suffisent pas à combler les besoins énergétique de la chaufferie, il faut alors se tourner vers les exploitants forestiers afin de leur acheter du bois. Ce secteur étant en concurrence avec des filières qui utilisent le matériau bois comme matière première, de façon plus noble (menuiserie, ébénisterie, …), le prix du bois peut parfois être assez élevé.

Là où ce projet possède un gros avantage, c'est dans le fait que le président de l'association à l'origine du projet « Eco-Zone », possède aussi une Sociétés Coopératives de Production (SCOP) qui exploite le bois-énergie localement. C'est donc une grosse opportunité, et n'étant pas en concurrence avec d'autres filières, le prix du bois sera très compétitif.

De plus, la société étant très proche géographiquement de la chaufferie, cela permet d'éviter les coûts et l'impact du transport sur l'environnement. La société exploite le bois dans un rayon de 60 km.

En conclusion, les deux solutions sont intéressantes et se valent d'un point de vue de la technique et du développement durable, mais d'un point de vue purement économique, c'est la solution biomasse qui parait être la meilleure, et c'est un argument de taille face à la conjoncture actuelle qui nécessite aux villes et plus globalement au domaine publique à réaliser des économies. Ce sera cette solution que nous retiendrons dans la suite de l'étude.

3.4.2. Description d'une chaufferie bois

3.4.2.1. Le bois, une énergie renouvelable

Le bois est une source d'énergie locale, naturelle et renouvelable par photosynthèse. Le combustible bois est consommé par tous sur la planète et peut être considéré comme inépuisable. Sa consommation raisonnée n'entame pas le patrimoine des générations futures et permet d'économiser les énergies fossiles dont les stocks sont limités (pétrole, gaz, charbon, uranium). La durée de reconstitution du bois est de loin la plus rapide en comparaison avec les autres énergies fossiles.

Energie	Durée de reconstitution
Bois	De 15 à 200 ans
Charbon	De 250 à 300 millions d'années
Pétrole	De 100 à 450 millions d'années

Tableau 6 : Durée de reconstitution de différentes énergies

L'utilisation du bois-énergie contribue aussi fortement à la lutte contre le réchauffement climatique (effet de serre) puisque, à la différence des énergies fossiles, elle recycle dans l'atmosphère le gaz carbonique (CO2) absorbé par les forêts.

Le bois-énergie constitue en outre une excellente valorisation des sous-produits et déchets de la filière bois.

Enfin, cette ressource participe à la gestion rationnelle de nos forêts et donc, à la qualité des paysages et au maintien des équilibres hydrologiques et climatiques.

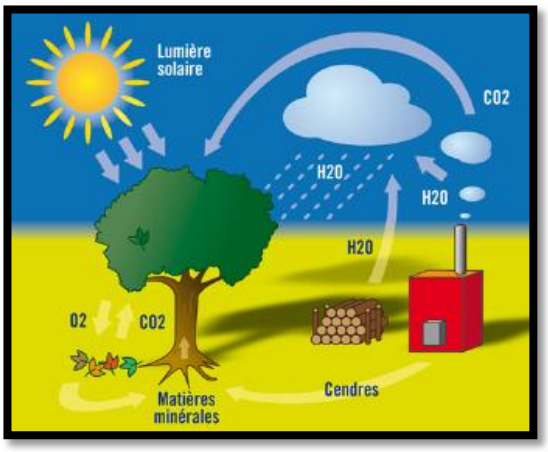


Figure 29 : Cycle du CO2

Voici les différents types de combustibles qui peuvent être utilisés dans les chaudières à bois :

Figure 30 : Différents types de combustibles bois utilisés dans les chaudières

3.4.2.2. PCI du bois

Le PCI du bois énergie varie essentiellement en fonction de son essence et de son taux d'humidité. La formule suivante donne le PCI moyen des feuillus durs en fonction du taux d'humidité :

Formule (en kWh/t) : $$\mathrm{PCI}\ (h\%) = \left[\frac{\mathrm{PCI}\ (0\%)\times(100-h)}{100}\right] - 6\times h$$

Avec : - PCI (0 %) = contenu énergétique moyen du bois sec, soit 5 000 kWh/t.

- h = humidité relative (sur masse brute) du bois en pourcentage.

Humidité (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
PCI (kWh/t)	5 000	4 720	4 440	4 160	3 880	3 600	3 320	3 040	2 760	2 480	2 200	1 920	1 640

Tableau 7 : PCI du bois (kWh/t) en fonction de l'humidité relative (%)

3.4.2.3. Emissions de CO2 évitées

Ci-dessous sont donnés les ratios d'émissions de CO2 évitées grâce à une chaufferie bois selon le combustible remplacé.

Combustible	g CO_2/kWhu
gaz naturel	228
fioul domestique	299
fioul lourd	319
charbon	427
électricité	50

Tableau 8 : Emissions de CO2 évitées

3.4.2.4. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une chaufferie biomasse peut s'expliquer à partir du logigramme suivant :

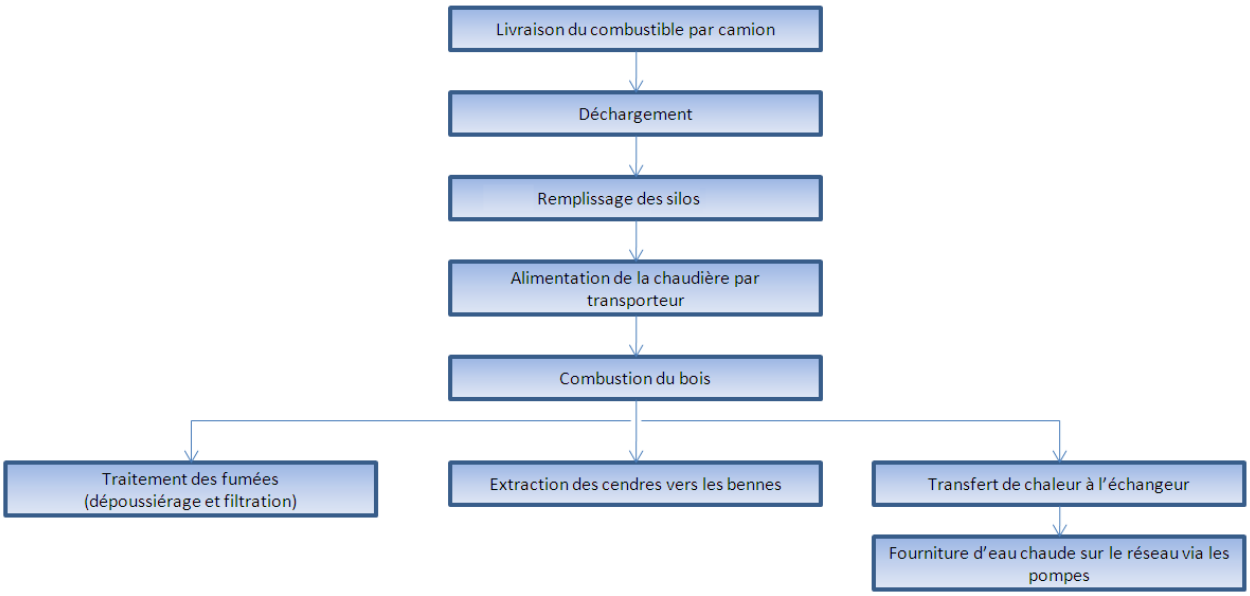


Figure 31 : Logigramme du principe de fonctionnement d'une chaufferie biomasse

Une chaufferie bois comprend cinq éléments :

- un silo de stockage ;
- un système d'extraction et de transfert du combustible vers la chaudière ;
- une chaudière composée d'un foyer et d'un échangeur de chaleur ;
- un système d'épuration des fumées (cyclonique/à manches/électrostatique) ;
- un système d'évacutation des cendres par voie sèche ou humide.

Ces équipements, pilotés par un automate programmable, se sont largement perfectionnés depuis le début des années 90. Ces technologies permettent d'alimenter à partir de combustibles bois fluides (bois déchiquetés, granulés, etc...) des installations de petites, moyennes et fortes puissances, desservant des chaufferies dédiées à un établissement (hôpital, HLM, lycée, ...), des réseaux de chaleur urbains ou des entreprises industrielles.

La figure suivante présente les différents éléments d'un ensemble chaudière bois :

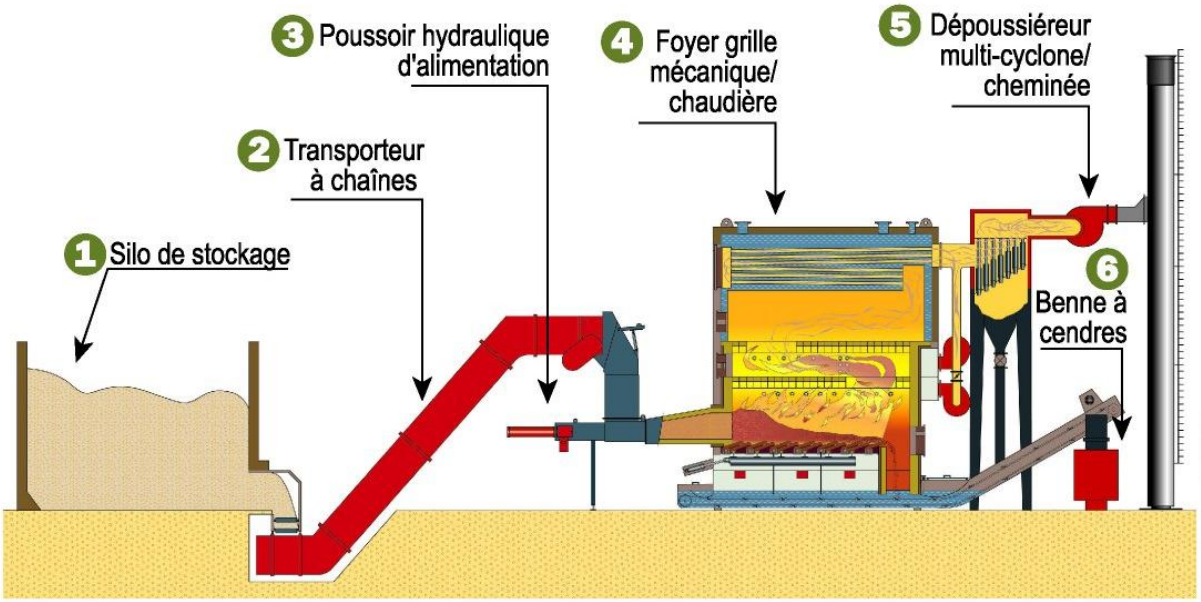


Figure 32 : Schéma d'un ensemble chaudière bois

Nous allons, dans cette étude, seulement dimensionner la ou les chaudière(s), ainsi que le silo de stockage du combustible bois. Le reste des éléments composant la chaufferie bois sera dimensionné et chiffré par des fournisseurs spécialisés dans le domaine au travers de devis qui seront présentés dans une prochaine partie appelée « 3.5. Etude économique ».

La description détaillée du fonctionnement d'un ensemble chaufferie bois est disponible en annexe.

3.4.3. Dimensionnement des chaudières

Pour les professionnels de l'énergie et plus particulièrement du chauffage, l'année est décomposée en deux périodes :

- La période de chauffe, qui correspond à la période pour laquelle la température moyenne extérieure est inférieure à 18°C, et où il est necessaire de chauffer les locaux. Cette période s'étale généralement de mi-septembre à mi-juin pour les régions du nord, et d'octobre à mai pour celles du sud.
- Le reste de l'année, on ne produit généralement que de l'ECS, et la puissance utile appellée en chaufferie est minimale.

3.4.3.1. Puissances appelées en chaufferie

Pour optimiser le mixte énergétique de la futur installation, il est important de prendre en considération certains paramètres techniques intrinsèques à la chaudière biomasse tels que le rendement ou le minimum technique, qui correspond à la puissance minimale de fonctionnement de la chaudière. Généralement, ce paramétre est de 25%, il est du à l'inertie engendrée par le procédé de combustion de la biomasse. Par exemple, une chaudière bois de 1 000 kW ne peut fonctionner pour une puissance inférieure à 250 kW, son rendement deviendrait trop faible.

Durant la période estivale, il est difficile de fonctionner avec une chaudières bois car la puissance appelée sur le réseau est faible (seulement production d'ECS). Nous avons donc recours à des chaudières au gaz naturel ayant un très faible minimum technique et pouvant fonctionner à quasiment n'importe quelle puissance.

Afin de dimensionner ces chaudières, il faut pouvoir connaitre les besoins annuelles en sous-stations et donc calculer les puissances appellées en chaufferie, au cours de l'année. Pour cela, nous allons utiliser une méthode de calcul des puissances (méthode que nous appellerons Phase 1) :

- Dans un premier temps, nous utilisons la base de données Météo France qui nous permet de récuperer les DJU horaires sur une année de référence. Autrement dit, pour chaque température extérieure comprise entre -10°C (température exterieure minimale prise en compte) et 18°C (température de non chauffage) nous disposons de la répartition du nombre d'heures sur une année et pour chaque température exterieure. A l'aide de ces données, nous pouvons calculer les puissances, en fonction des températures extérieures, pour chaque mois de l'année.

T° ext.	Puissances appelées (kW) - Année entière				Puissances appelées (kW) - Octobre			
°C	Chauffage	ECS moyenne	Pertes réseau	Total	Chauffage	ECS moyenne	Pertes réseau	Total
-9,5	4 911	200	50	5 161	0	0	0	0
-8,5	4 732	200	50	4 982	0	0	0	0
-7,5	4 554	200	50	4 804	0	0	0	0
-6,5	4 375	200	50	4 625	0	0	0	0
-5,5	4 196	200	50	4 446	0	0	0	0
-4,5	4 018	200	50	4 268	0	0	0	0
-3,5	3 839	200	50	4 089	0	0	0	0
-2,5	3 661	200	50	3 911	0	0	0	0
-1,5	3 482	200	50	3 732	0	0	0	0
-0,5	3 304	200	50	3 554	3 304	200	50	3 554
0,5	3 125	200	50	3 375	3 125	200	50	3 375
1,5	2 946	200	50	3 196	2 946	200	50	3 196
2,5	2 768	200	50	3 018	2 768	200	50	3 018
3,5	2 589	200	50	2 839	2 589	200	50	2 839
4,5	2 411	200	50	2 661	2 411	200	50	2 661
5,5	2 232	200	50	2 482	2 232	200	50	2 482
6,5	2 054	200	50	2 304	2 054	200	50	2 304

Tableau 10 : Exemple de calcul des puissances appelées annuelles et mensuelles en fonction des températures extérieures moyennes

En prenant l'exemple ici du mois d'octobre, à chaque température extérieure correspond donc une puissance appelée en chaufferie.

- Pour déterminer ces puissances, nous pouvons utiliser la consommation correspondante, en MWh, pour chaque mois et pour chaque température, à l'aide de la relation vue précedemment :

$$Consommation(kWh) = \frac{Puissance(kW) \times DJU \times Intermittence \times 24}{T_{intérieure} - T_{extérieure\ minimale}}$$

Or :

$$DJU = \frac{Nombre\ d'heure\ (T_{ext})}{24} \times (T_{intérieure} - T_{extérieure\ minimale})$$

D'où :

$$Consommation(MWh) = \frac{Puissance(kW) \times Nombre\ d'heure\ (T_{ext})}{1000}$$

- Nous obtenons au final les puissances nécessaires en chaufferie, pour alimenter le réseau de chaleur, les différentes sous-stations, et les bâtiments correspondant. Voici les résultats obtenus :

	Puissance utile (kW)
	Maximale
Chauffage	4 798
ECS	187
Pertes réseaux	115
TOTALE	5 101

Tableau 11 : Puissances utiles maximales en chaufferie

La puissance utile appelée maximale en sortie chaufferie, est de **5 101 kW**.

3.4.3.2. Puissances des chaudières

La deuxième étape du dimensionnement des chaudières (Phase 2) consiste à trouver la puissance et la part optimale de chaque chaudière dans la production totale de chaleur, appelée mixité. Il est techniquement très difficile de fonctionner seulement avec des chaudières bois, en raison de leurs minimums techniques fixés à 25%. En revanche, les chaudières gaz n'ont pas ce type de problème, c'est pourquoi il est nécessaire de les utiliser en appoint. De plus, un arrêt de la chaufferie pour cause de non approvisionnement en combustible bois étant possible, il est préférable de prévoir une chaudière gaz pouvant couvrir la totalité des besoins énergétiques du réseau de chaleur, de 5 101 kW minium.

La méthode pour dimensionner les chaudières est la suivante :

- Répartir la puissance appelée sur plusieurs chaudières en respectant plusieurs critères, comme une mixité bois optimum, ou bien un coût d'investissement minimal :

		Energie 1	Energie 2	Energie 3	Energie 4
Energies		Chaudière Bois 1	Chaudière Bois 2	Chaudière gaz 1	Chaudière gaz 2
Puissance thermique sortie centrale	kW	1 000	1 000	500	5 500
Minimum Technique	%	25,00%	25,00%	0,00%	0,00%
Minimum Technique	kW	250	250	0	0
Rendement moyen kWth/kW PCI combustible	%	85,00%	85,00%	92,00%	92,00%
Disponibilité	%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tableau 12 : Les chaudières et leurs caractéristiques

Les puissances thermiques des chaudières, sont ici prises comme exemple. Une chaudière gaz pouvant couvrir la totalité de la puissance appélée (5100 kW), en chaufferie, est necessaire en cas de panne ou de maintenance d'autres chaudières. L'ordre des chaudière corresponds à leurs degrés de priorité de fonctionnement.

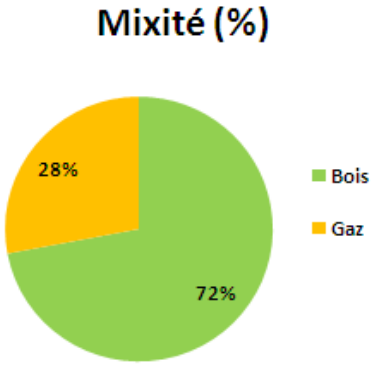
- Répartir les puissances par chaudière, et par mois, pour chaque température extérieure :

T° ext.	Puissance	Total annuel				Octobre				
°C	appelée kW	Chaudière Bois 1	Chaudière Bois 2	Chaudière gaz 1	Chaudière gaz 2	Puissance appelée	Chaudière Bois 1	Chaudière Bois 2	Chaudière gaz 1	Chaudière gaz 2
-9,5	5 015	1 000	1 000	500	2 515	0	0	0	0	0
-8,5	4 844	1 000	1 000	500	2 344	0	0	0	0	0
-7,5	4 672	1 000	1 000	500	2 172	0	0	0	0	0
-6,5	4 501	1 000	1 000	500	2 001	0	0	0	0	0
-5,5	4 329	1 000	1 000	500	1 829	0	0	0	0	0
-4,5	4 158	1 000	1 000	500	1 658	0	0	0	0	0
-3,5	3 987	1 000	1 000	500	1 487	0	0	0	0	0
-2,5	3 815	1 000	1 000	500	1 315	0	0	0	0	0
-1,5	3 644	1 000	1 000	500	1 144	0	0	0	0	0
-0,5	3 473	1 000	1 000	500	973	3 473	1 000	1 000	500	973
0,5	3 301	1 000	1 000	500	801	3 301	1 000	1 000	500	801
1,5	3 130	1 000	1 000	500	630	3 130	1 000	1 000	500	630
2,5	2 959	1 000	1 000	500	459	2 959	1 000	1 000	500	459
3,5	2 787	1 000	1 000	500	287	2 787	1 000	1 000	500	287
4,5	2 616	1 000	1 000	500	116	2 616	1 000	1 000	500	116
5,5	2 444	1 000	1 000	444	0	2 444	1 000	1 000	444	0
6,5	2 273	1 000	1 000	273	0	2 273	1 000	1 000	273	0

Tableau 13 : Appels de puissances des différentes chaudières

- De la même manière que pour la phase 1, nous calculons les consommations correspondant à ces puissances.

- En comparant les consommations (MWh produits) des chaudières bois et des chaudières gaz, on ressort les mixités en pourcentage. Pour les chaudières prises prédédemment, nous avons les mixités suivantes :



	Chaudière Bois 1	Chaudière Bois 2	Chaudière gaz 1	Chaudière gaz 2	TOTAL
Consommation totale (MWh)	4 131	3 005	1 832	939	9908
Mixité (%)	42%	30%	18%	9%	
	Bois		Gaz		
	72%		28%		

Tableau 14 : Mixités obtenues avec les chaudières prises en exemple

- La mixité est un élément important, mais pas suffisant pour déterminer si le dimensionnement des chaudières est convenable. Il est necessaire de regrouper l'ensemble des puissances de chaque chaudière, en fonction des heures de fonctionnement, dans un graphiqueque nous appellerons « Monotone ».
  En effet, dans le tableau 13, nous avons les puissances annuelles de chaque chaudière, en fonction des températures. Pour chacune des températures correspond un nombre d'heures de chauffage, et donc une durée de fonctionnement de la chaufferie. Nous pouvons dès lors, créer un graphique donnant les puissances cumulées des chaudière, en fonction des heures de fonctionnement cumulées (de 0 à 8760 heures, correspondant à une année entière). Nous avons donc l'évolution de la puissance utile appelée en chaufferie, avec la part des différentes chaudières, en fonction des heures de fonctionnement :

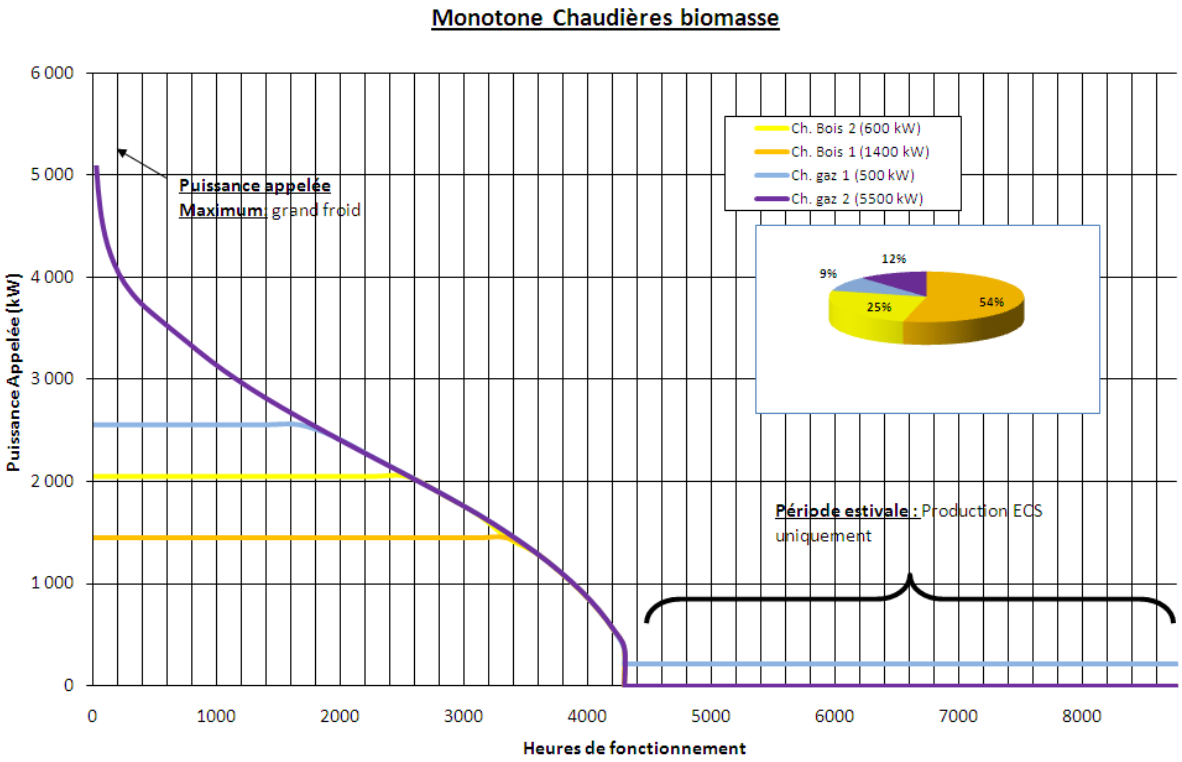


Figure 33 : Evolution de la puissance utile nécessaire en chaufferie

Nous voyons ici la monotone correspondant aux puissances de chaudières données dans la légende du graphique. Les heures de fonctionnement ne sont pas réparties de façon chronologiques, mais en fonction des puissances appelées décroissantes.

Par exemple :

- Par -10°C, la puissance nécessaire est de 5 015 kW pendant une durée cumulée de 6 heures sur l'année.
- Pendant un peu plus de 4 300 heures dans l'année (à Lilles), la température extérieure est supérieure à 18 °C (température de non chauffage) donc la puissance nécessaire de 187 kW représente uniquement la production d'ECS.

Cette monotone nous permet de dire que le dimensionnement des ces chaudières est convenable, et que les minimums techniques des chaudières bois ne sont pas génant. Pour comparer, si nous prenons une configuration avec 2 chaudières bois de 1000 et 3000 kW, et une chaudière gaz de 5500 kW, voici la monotone correspondante :

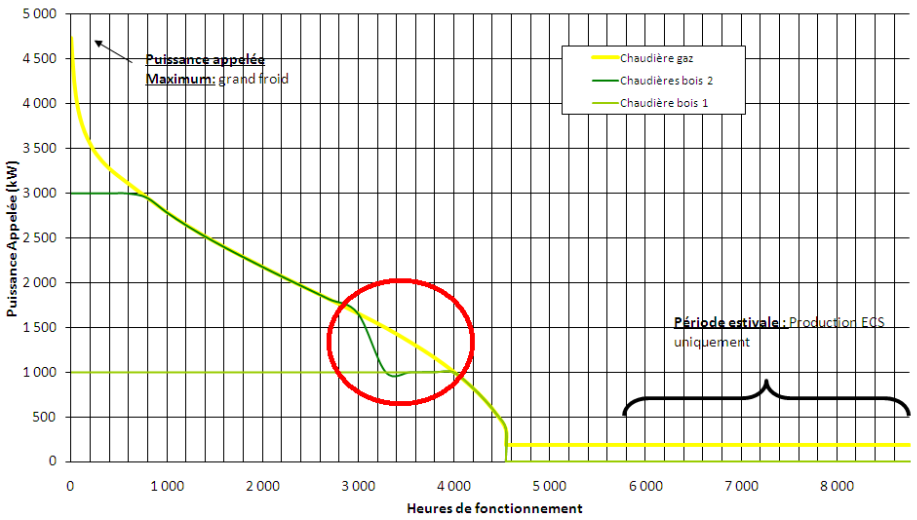


Figure 34 : Graphique montrant un mauvais dimensionnement de chaudières

Nous voyons très bien que, pour une certaine durée (environ 1000 h), la chaudière 2 (courbe verte foncée) s'arrête car elle atteint son minimum technique de 750 kW (cercle rouge). C'est donc la chaudière gaz qui prend le relais, diminuant ansi la mixité bois. Pour éviter ce genre de problème, il est necessaire de prévoir une seconde chaudière bois de plus petite taille.

Au final, pour optimiser le dimensionnement des chaudières, il faut prendre en compte : la monotone, la mixité du bois, et le coût de l'investissement.

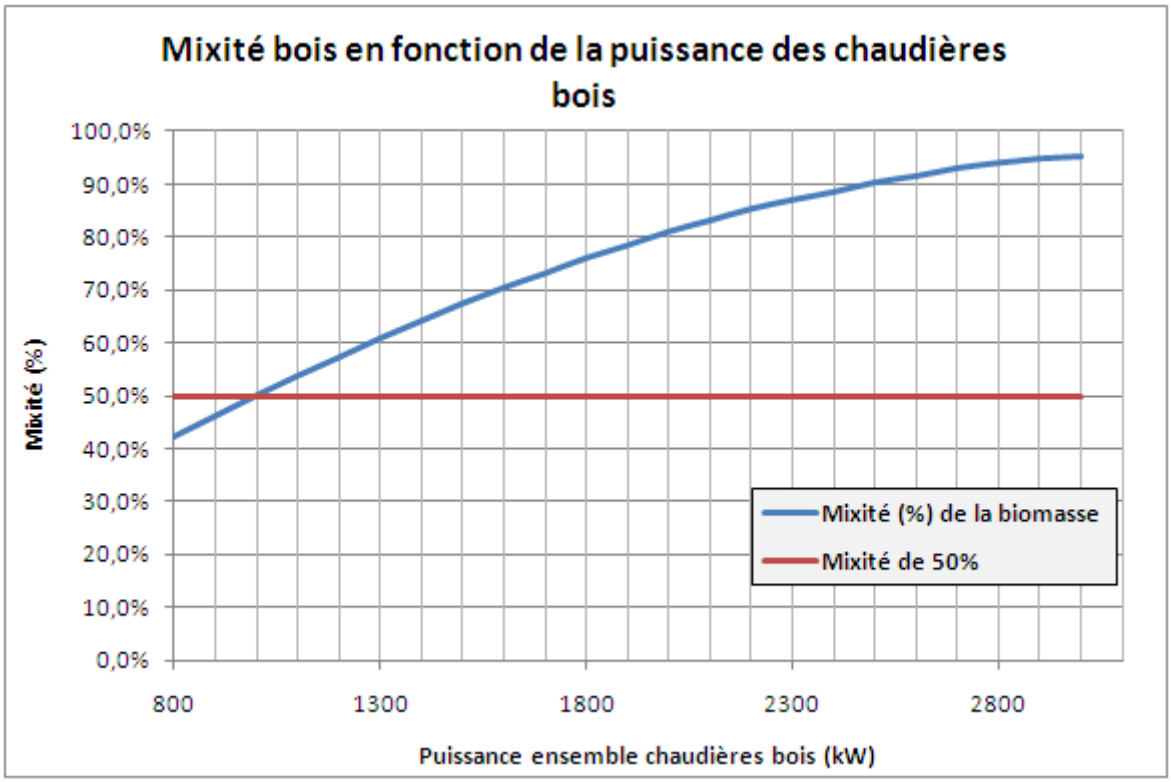


Figure 35 : Mixité du bois en fonction de la puissances des chaudières bois

Nous fixons une chaudière bois à 600 kW, et faisons varier la seconde afin de voir l'évolution de la mixité bois en fonction de la puissance de l'ensemble chaudières bois. La droite rouge (mixité bois de 50%) étant la limite réglementaire pour l'obtention d'aides financières, il est impératif de se trouver au-delà.

Nous constatons que la courbes a tendance à converger horizontalement vers les 100%, cela a pour conséquence une augmentation de la puissance des chaudières bois beaucoup plus rapide que la mixité bois. Pour gagner quelques pourcentages au-delà des 80%, il est nécessaire d'augmenter fortement la puissance des chaudières, et parallèlement le coût des investissements, Un juste milieu est donc à trouver.

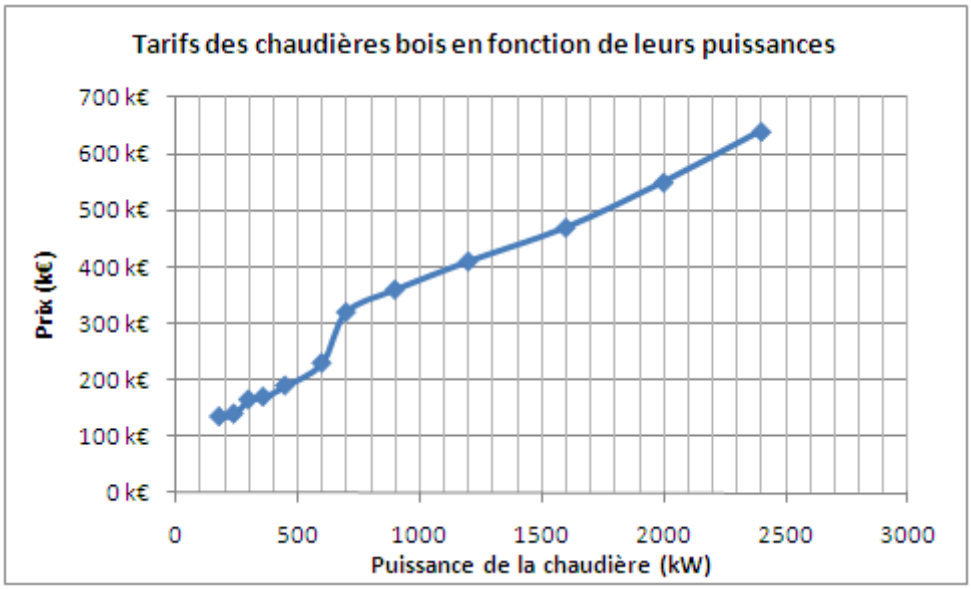


Figure 36 : Tarifs moyen des chaudières bois en fonction de leurs puissances

Ce graphique nous montre que gagner quelques % de mixité bois peut coûter relativement cher. Pour passer de 80 à 85%, il faut augmenter la puissance de la chaudière de 2000 à 2200 kW, cela entraine une augmentation de l'investissement de 50 000€.

Une limite de la mixité bois à 80% parait raisonnable. De plus, nous constatons une brutale augmentation du tarif au-delà de 600 kW, il est donc judicieux de prévoir une petite chaudière bois de 600 kW, et une plus grosse de 1400 kW afin d'atteindre une puissance de 2000 kW pour l'ensemble des 2 chaudière, synonyme d'une mixité bois de 80%.

La monotone présentée en figure 33 représente donc les chaudières que nous retenons pour ce projet, à savoir :

- Chaudière Bois 1 : 1400 kW
- Chaudière Bois 2 : 600 kW
- Chaudière gaz 1 : 500 kW
- Chaudière gaz 2 : 5500 kW

3.4.4. Dimensionnement des silos de stockage

Il s'agit d'un stockage abrité, placé à coté de la chaufferie et équipé d'un système d'extraction du combustible (dessilage). Les silos peuvent être soit enterrés, soit semi enterrés, soit de plain-pied et sont intégrés au bâtiment ou accolés à la chaufferie. Les silos sont habituellement maçonnés.

Pour les petites installations, on peut avoir recours à des trémies métalliques standardisées (jusqu'à 10 m3). Les industries du bois utilisent également des silos métalliques standardisés pour stocker, par exemple, les sciures et les copeaux produits lors de la transformation du bois.

Il existe également des conteneurs à extracteur. Ce système permet d'avoir un silo mobile et de réduire les temps de livraison. Il est composé d'un container et d'un système d'extraction intégré qui se couple au système d'alimentation de la chaufferie. Dès qu'un container est vide, un autre assure le relais. Ce type de système convient pour les plaquettes mais est assez onéreux.

Le volume nécessaire du silo d'alimentation dépend de la puissance de la chaudière, de l'autonomie voulue et du type d'approvisionnement. Il est généralement conseillé d'avoir un silo permettant une autonomie à pleine puissance de 5 à 8 jours.

La formule ci-dessous permet de calculer le volume de combustible à stocker :

$$Volume_{stockage} = \frac{P_{utile}}{\eta . PCI . \rho} . 24 . n$$

Avec : - P_{utile} est la puissance utile de la chaudière en kW

- η est le rendement de la chaudière en %
- PCI est le PCI du combustible en kWh/t
- ρ est la masse volumique du combustible en t/map (Masse Apparente de Plaquettes)
- n est le nombre de jours souhaité d'autonomie

Les puissances utiles des deux chaudières sont de 600 kW et 1500 kW avec un rendement de 85%. La masse volumique du bois est de 0,3667 tonne/map (correspond à 1 m^3 de plaquettes enchevêtrées), pour des plaquettes de longeurs comprises entre 30 et 60 mm. Les fournisseurs de bois vendent généralement des plaquettes avec une humidité relative comprise entre 35 et 40%, et donc avec un PCI de 2760 kWh/tonne minimum.

Nous prendrons une autonomie n de 5 jours.

Chaudière de 600 kW : $Volume_{stockage} = \frac{600}{0{,}85 \times 2760 \times 0{,}3667} \times 24 \times 5 = \mathbf{83{,}7\ m^3}$

Chaudière de 1500 kW : $Volume_{stockage} = \frac{1500}{0{,}85 \times 2760 \times 0{,}3667} \times 24 \times 5 = \mathbf{209{,}3\ m^3}$

Il est préférable de prévoir un seul silo de 300 m^3.

3.5. Etude économique

Après avoir achevé l'étude technique, c'est-à-dire la réalisation du plan du réseau de chaleur, le calcul des puissances des sous-stations, et le dimensionnement du réseau et des chaudières, nous allons nous intéresser maintenant à l'aspect économique du projet.

Pour cela, nous allons avoir besoin des tarifs des matériels qui composent les différents postes du réseau de chaleur, à savoir :

- La chaufferie
- Le réseau de chaleur
- Les sous-stations

Pour ce faire, il nous faut demander des devis auprès de fournisseurs avec lesquels IDEX à l'habitude de traiter.

Les retours que nous avons pu obtenir, après avoir contacter ces fournisseurs, sont présentés ci-dessous :

3.5.1. Chaufferie

3.5.1.1. Chaudières biomasse

Les principaux fournisseurs de chaudières biomasse dans notre secteur sont KOLHBACH, COMPTE-R, SCHMID ou encore VIESSMANN. Après avoir contacté les deux premiers, voici les tarifs proposés :

Pour un ensemble comprenant :

- Deux chaudières eau chaude de 600 kW et 1500 kW
- Deux silos carrossables avec dessileurs et convoyeurs/introducteurs dans la chaudière
- Deux décendrages gravitaires sec avec cendrier sous foyer
- Systéme de traitement des fumées (multicyclone, électrofiltres, …)
- Deux carneaux (cheminées) de fumée avec isolation thermique
- Systéme de régulation et de surveillance automatisé
- Forfait prestation (livraison, grues, montage, mise en service et formation)

	Kolhbach	Compte-R
Tarif HT (€)	649 000,00 €	688 620,00 €

3.5.1.2. Chaudières gaz avec brûleur

Il y énormement de fournisseur de chaudières et bruleurs à gaz sur le marché. Néanmoins IDEX Energies a l'habitude en cette période, et de part son relationnel, de travailler avec ATLANTIC-GUILLOT pour les chaudières, et avec CUENOD pour les brûleurs. Après contact, voici les tarifs proposés :

- Les ensembles chaudières comprennent une chaudière acier à triple parcours des fumées, avec faible rejets de NOx et un tableau de commande (régulation, sécurité, sondes, …).
- Les ensembles brûleurs comprennent le brûleur avec ventilateur et système de sécurité.

	Chaudière Atlantic-Guillot		Brûleurs Cuenod	
	5 400 kW	500 kW	5 400 kW	500 kW
Tarif HT (€)	39 701,40 €	5 889,60 €	14 535,00 €	2 717,96 €

Le coût de ce poste s'élève donc à un total de **62 844 €**.

3.5.1.3. Génie civil

Le génie civil représente la construction du bâtiment qui deviendra la chaufferie. Ce domaine n'est pas la spécialité d'IDEX Energies, néanmoins, grâce aux retours d'expériences de précédentes constructions de chaufferies bois, un ratio a pu être calculé, donnant le prix moyen au m² : il est d'environ 3 900 €.

Pour une chaufferie devant contenir quatres chaudières, dont deux au bois, il faut prévoir environ 300 m², ce qui nous amène à un coût de **1 170 000 €.**

Bien entendu, ce coût n'est que prévisionnel, et il devra être confirmé ou corrigé par un professionnel du génie civil.

3.5.1.4. Fumisterie et hydraulique

De la même manière que précédemment, nous estimons ces coûts à 80 000€ pour la partie fumisterie (cheminées), et à 300 000€ pour la partie hydraulique (Pompes, vannes, sondes, compteurs énergétique, …).

3.5.2. Réseau de chaleur

Les coûts de ce poste sont répartis entre l'achat des canalisations pré-isolées, et le terrassement des tranchées.

Le numéro 1 dans le domaine des tubes pré-isolés est la société INPAL Energie, qui après leur avoir envoyé les longueurs de tube necessaires en fonction des DN, nous a transmis un devis :

Diamètre intérieur	DN	Longueur Aller & Retour	Prix unitaire	Total
mm	mm	ml	€	€
210,1	200	2966,2	92,43	274 165,9 €
160,3	150	646,0	69,03	44 593,4 €
132,5	125	243,2	55,12	13 405,2 €
107,1	100	6701,3	47,19	316 234,3 €
82,5	80	932,8	37,44	34 924,0 €
70,3	65	3453,0	31,85	109 978,1 €
54,5	50	1384,8	30,55	42 305,6 €
43,1	40	1296,0	27,43	35 549,3 €
37,2	32	3019,4	25,48	76 934,3 €
28,5	25	2009,4	28,86	57 991,3 €
21,7	20	1068,0	22,1	23 602,8 €
TOTAL		23 720,1		1 029 684,2 €

Tableau 15 : Longueurs, diamètres, et prix des tubes

En ce qui concerne le terrassement, le coût est calculé grace à des prix unitaires connus par IDEX Energies. Comme par exemple le coût du terrassement d'un mêtre linéaire sous une route, ou sous une pelouse, le coût lorsque l'on doit croiser un réseau électrique, téléphonique ou de gaz, le coût pour la pénétration dans une sous-station, etc…

Après avoir répertorié et chiffré tout cela, nous obtenons un coût pour l'ensemble du réseau de **4 089 483 €.**

Le coût prévisonnel du poste « réseau de chaleur » est donc de **5 119 167,2 €.**

3.5.3. Sous-stations

Le matériel utilisé dans les sous-stations comprend un échangeur de chaleur qui sépare le circuit primaire du circuit secondaire et des éléments du domaine hydraulique (Vannes, compteurs énergétiques, …).

Après avoir consulté des fournisseurs d'échangeurs de chaleur, comme par exemple ATLANTIC-GUILLOT, puis en s'aidant des tarifs connus d'IDEX Energies, nous pouvons estimer le coût moyen d'une sous-station à **15 000 €**.

Le réseau de chaleur compte 45 sous-stations, le coût total prévisionnel de ce poste s'élève donc à **675 000 €.**

3.5.4. Analyses et solutions technico-économiques

Pour reprendre les résultats précédents, nous avons :

Coût du projet "Réseau de chaleur Coudekerque -Branche"	
Chaufferie	
Chaudières biomasse	649 000 €
Chaudière gaz + bruleur	62 844 €
Génie civil	1 170 000 €
Fumisterie	80 000 €
Hydraulique	300 000 €
Total chaufferie	**2 261 844 €**
Réseau de chaleur	
Tuyauterie	**5 119 167 €**
Sous-stations	
Matériel sous-station	**675 000 €**
Total général	8 056 011,2 €

D'après IDEX Energies et son expérience, ce coût total est trop élevé pour un projet de cette envergure, et ne sera donc pas compétitif face aux offres des sociétés concurrentes.

Il faut donc essayer de trouver des solutions techniques pour faire descendre le coût total.

Une première solution serait d'éliminer certaines sous-stations du projet, comme par exemple les sous-stations les plus éloignées et qui ne demande pas une grosse puissance. On peut relier ces deux critéres en un seul que nous appelerons « Densité de flux » et qui représente le nombre de MWh par mètre linéaire que représente un tronçon.

Pour calculer cette densité de flux, il suffit de reprendre la consommation d'une sous-station et de la diviser par la longueur du tronçon qui l'alimente en eau chaude. Nous fixons comme limite que toutes les sous-station présentant une densité de flux inférieur à 3 MWh/ml sont écartées du projet.

Par exemple, si l'on prend le tronçon « Chaufferie – A' » :

Tronçons du réseau	Sous-stations concernées	Densité de flux
Unités		(MWh/m)
Chaufferie - A'	1	0,6

On voit que la densité de flux est inférieure à 3 MWh/m, cela entraine donc l'écartement du projet de la sous-station. Après avoir réitéré ce calcul pour tous les tronçons, nous sommes arrivé aux résultats suivant : 26 sous-stations sont écartées du projet, soit une économie de 33% sur le coût total. Nous descendons donc le coût prévisionnel à **5 414 782 €**.

Une autre solution serait de demander à la commune d'inclure dans le projet des bâtiments de type immeuble qui ont une forte densité de flux et qui sont donc très rentable.

3.5.5. Récapitulatif

Consommation (MWh)	Puissance appelée (kW)	Puissance bois (kW)	Puissance gaz (kW)	Mixité
8 193,5	5 530	2 050	6 000	79%

Chaufferie :

- 2 chaudières biomasse de 1450 et 600 kW avec filtration par électrofiltre et silos carrossables
- 2 chaudières gaz de 5400 et 500 kW avec bruleur

Réseau :

- 23 720 ml aller-retour de tubes pré-isolés avec génie civil

P_{moy}	P_{min}	P_{max}
121,6 kW	7,4 kW	543,9 kW

Sous-stations :

- Sous-stations jusqu'à 3 km autour de la chaufferie
- 45 sous-stations avec échangeur à plaques entre le réseau primaire et secondaire

INITIAL		OPTIMISE	
Chaufferie		**Chaufferie**	
Chaudières biomasse	649 000 €	Chaudières biomasse	649 000 €
Chaudière gaz + bruleur	62 844 €	Chaudière gaz + bruleur	62 844 €
Génie civil	1 170 000 €	Génie civil	1 170 000 €
Fumisterie	80 000 €	Fumisterie	80 000 €
Hydraulique	300 000 €	Hydraulique	300 000 €
Total chaufferie	**2 261 844 €**	**Total chaufferie**	**2 261 844 €**
Réseau de chaleur		**Réseau de chaleur**	
Tuyauterie	**5 119 167 €**	Tuyauterie	**2 867 938 €**
Sous-stations		**Sous-stations**	
Matériel sous-station	**675 000 €**	Matériel sous-station	**285 000 €**
Total général	**8 056 011 €**	**Total général**	**5 414 782 €**
		Avec 26 sous-stations écartées du projet	
		Soit une économie de :	33%

CONCLUSION DE L'ETUDE

Nous avons pu voir, au travers de cette étude, une des réponses possibles aux objectifs lancés par le gouvernement, via le Grenelle de l'Environnement, à savoir la diminution de la production de gaz à effet de serre d'une part et l'augmentation de la part de la production d'énergie d'origine renouvelable d'autre part.

En effet, la centralisation de la production d'énergie à l'echelle d'une collectivité via une importante chaufferie, qui alimente un réseau de chaleur desservant plusieurs bâtiments de la commune, permet d'augmenter l'efficacité énergétique et donc de diminuer la consommation de combustible fossile. De plus, quand la chaufferie est en partie alimentée par une énergie alternative aux énergies fossile, telle que la biomasse comme c'est le cas dans cette étude, cela permet la diminution de près de 80% de la consommation des combustibles fossile courant (Fioul, Gaz, …).

Un des autres avantages liés à cette solution est la diminution du coût de la production d'énergie, car une grosse chaufferie coûtera toujours moins cher que la somme équivalente de plusieurs chaufferies de tailles réduites, mais aussi car des subventions sont accordées par l'état lorsque la part d'énergie renouvelable est assez importante. La sécurité dans l'approvisionnement en chaleur des bâtiments de la collectivité est aussi un point non négligeable.

En 2011, la part des réseaux de chaleur dans la production totale de chaleur en France, représente seulement 5%, alors qu'elle est déjà de 14% en Allemagne. Cette solution doit donc devenir incontournable dès aujourd'hui, et les collectivités l'ont bien comprises puisque la grande majorité des appels d'offres concernant des délégations de service publique (DSP) que reçoit IDEX, en ce qui concerne le renouvellement ou la création de chauffage urbain, propose un réseau de chaleur comme solution.

Pour conclure, j'espère que cette pré-étude sera bénéfique pour IDEX, en espérant qu'elle débouchera sur une éventuelle candidature à un appel d'offre vis-à-vis de la collectivité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

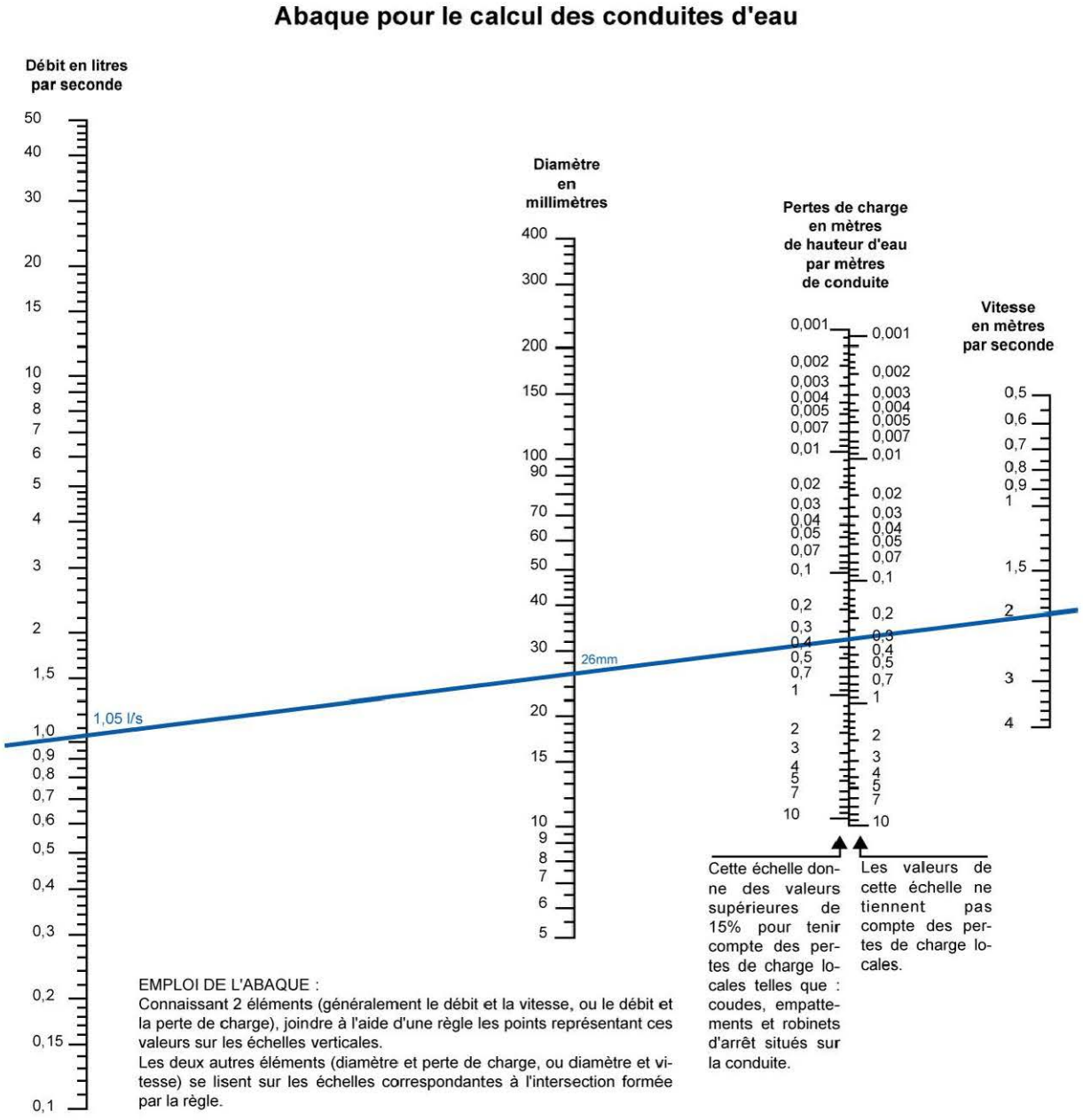
Ce stage de 6 mois de fin d'étude de Master Mécanique Energétique Procédés et Produits, effectué dans la Direction Régionale Normandie Nord-est de la société IDEX à Jarville, m'a permis de mettre en pratique les connaissances théoriques que j'ai pu acquérir tout au long de ma formation universitaire.

Avant ce stage, mes compétences et mes interêts professionnels se situaient en grande partie dans l'ingénierie énergétique, le tout allant dans le sens du développement durable. Cette étude, ainsi que les différentes missions qui m'ont été données au cours de ce stage, ont permis de conforter mes motivations à travailler dans ce secteur.

J'ai pu, grâce à ce stage, acquérir de l'expérience dans le domaine de l'exploitation d'énergie pour chauffage, en découvrant de nouvelles méthodes de travail, en visitant des chaufferies de dernières générations, en discutant avec tout un éventail de professionnels de l'énergie, et pour cela, je remercie IDEX et Mr. Jacques BRUNET. Le fait de m'avoir donné des responsabilités, tout en me laissant une certaine autonomie m'a permis de bien m'intégrer au sein de l'agence.

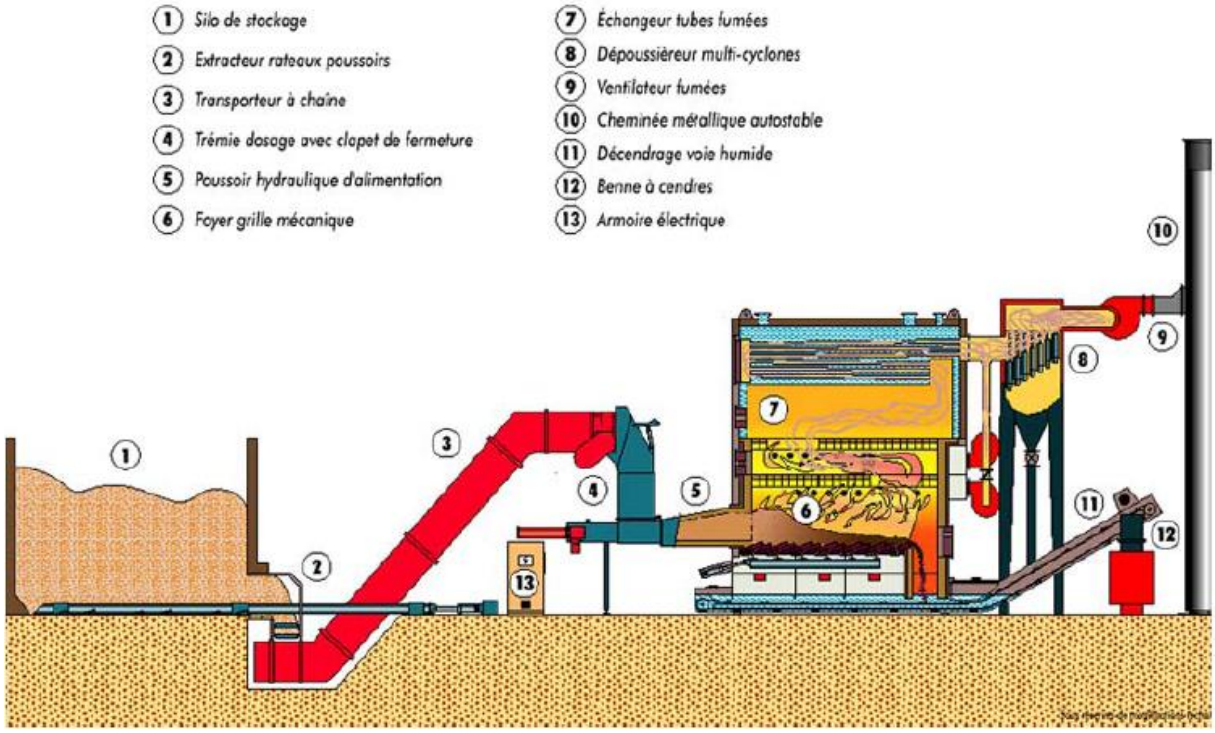
ANNEXES

Annexe 1 - Abaque de DARIES



Annexe 2 – Description du fonctionnement d'un ensemble chaufferie bois

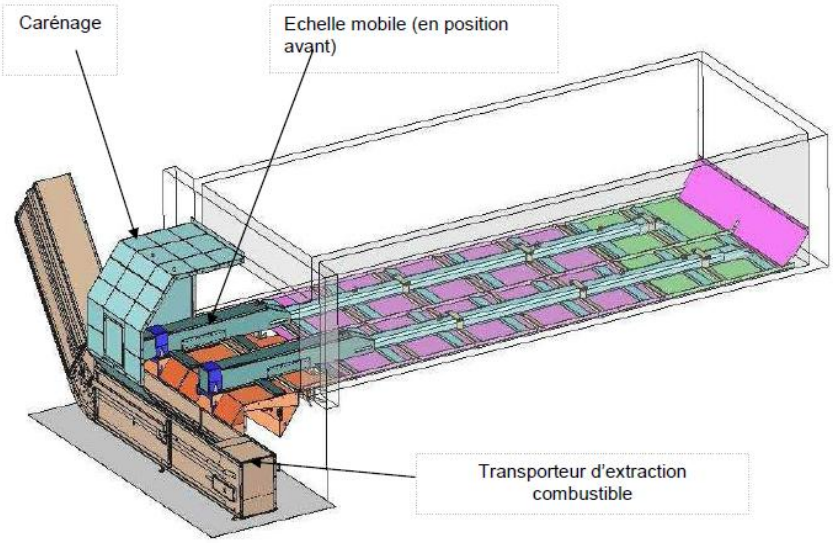
Nous pouvons reprendre la figure 32 du rapport, à savoir le schéma d'un ensemble chaudière bois :



Nous allons décrire le parcours du bois à travers la chaufferie :

2- Livraison du bois dans le silo de stockage par camion benne

3- Extraction du bois à l'aide d'un dessileur ou extracteur avec râteaux poussoir comme le montre le schéma suivant :



Vue en perspective du silo avec le dessileur

4- Le transporteur ou convoyeur à chaine réceptionne le bois en sortie d'extracteur et l'achemine vers l'alimentation de la chaudière :

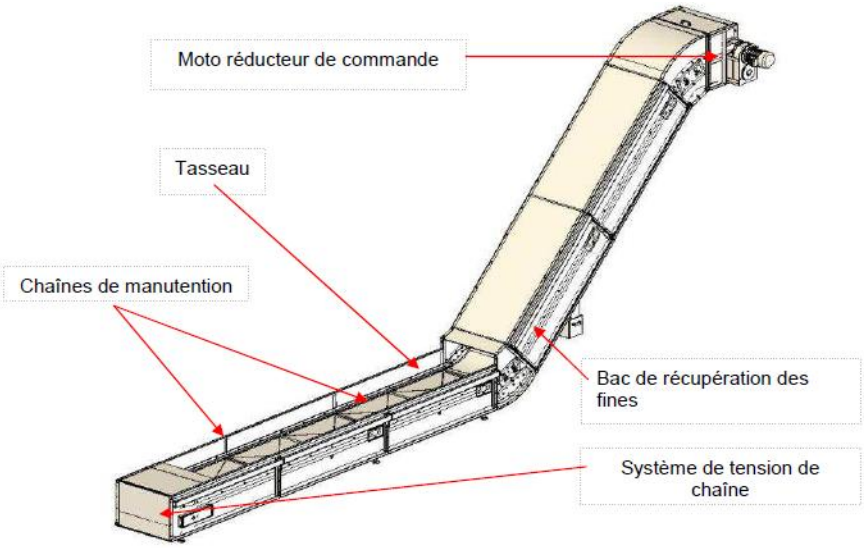
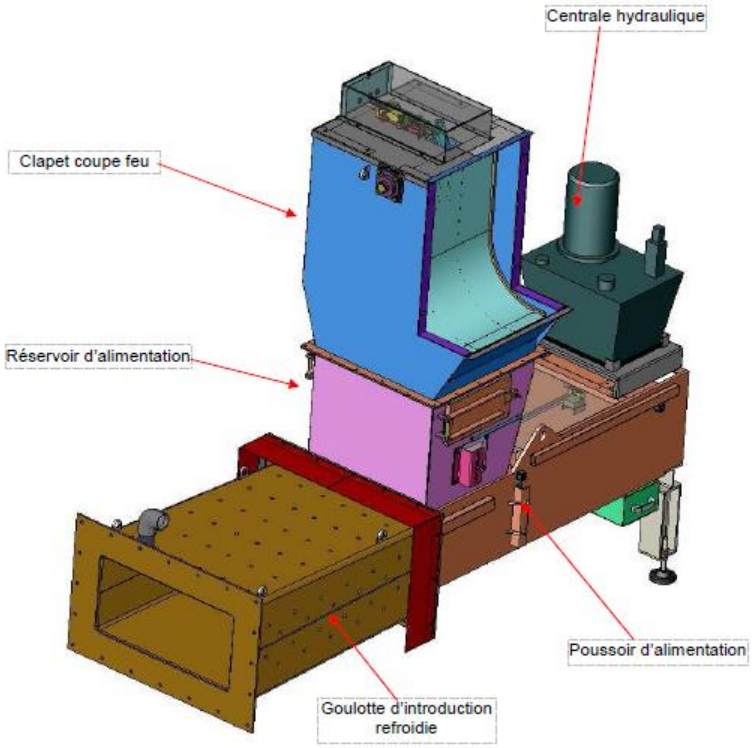


Schéma du convoyeur

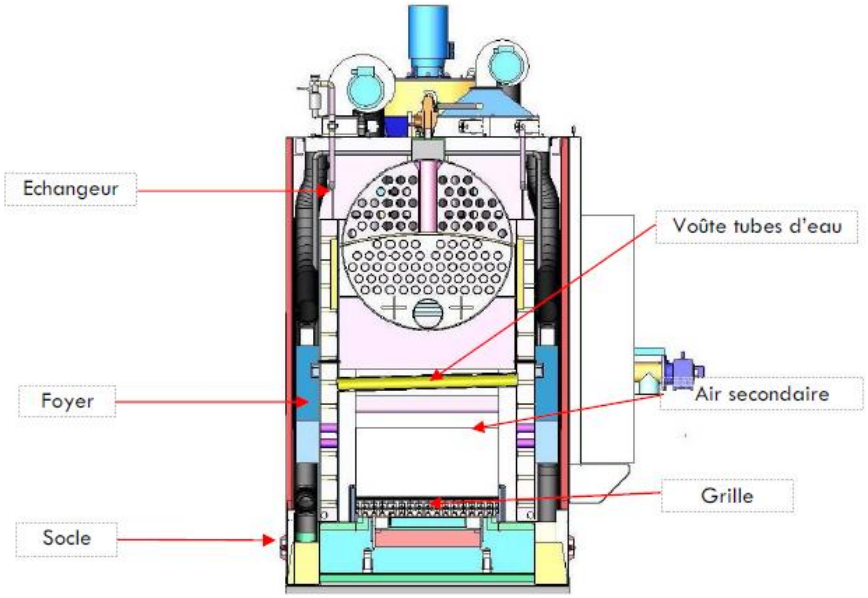
5- Vient ensuite le dispositif d'introduction du combustible (élément 4 et 5 du schéma général de la chaufferie ou figure 28) qui reprend le combustible et l'introduit sur la grille du foyer. Sa fonction est de comprimer le bois et d'éviter une propagation du feu lors des phases d'introduction de combustible :



Dispositif d'introduction du combustible

6- Le bois se trouve donc maintenant à l'intérieur de la chaudière, dans le foyer où il est allumé par un brûleur gaz au démarrage de la chaudière, et est autoalimenter par la suite, avec bien entendu un débit de comburant (air) adéquat. La grille sur laquelle brûle le bois avance et permettra au bois, une fois brûler, de sortir du foyer et d'atterrir dans l'élément 11 qui est un extracteur de cendres.

7- Les fumées de combustion montent dans la chaudière et passe à travers un échangeur tubulaire afin de céder de la chaleur à l'eau qui circule dans les tubes :



Coupe de la chaudière avec vue sur l'échangeur tubulaire

8- Les fumées refroidies passent maintenant dans un multi-cyclone qui va séparer les poussières des fumées :

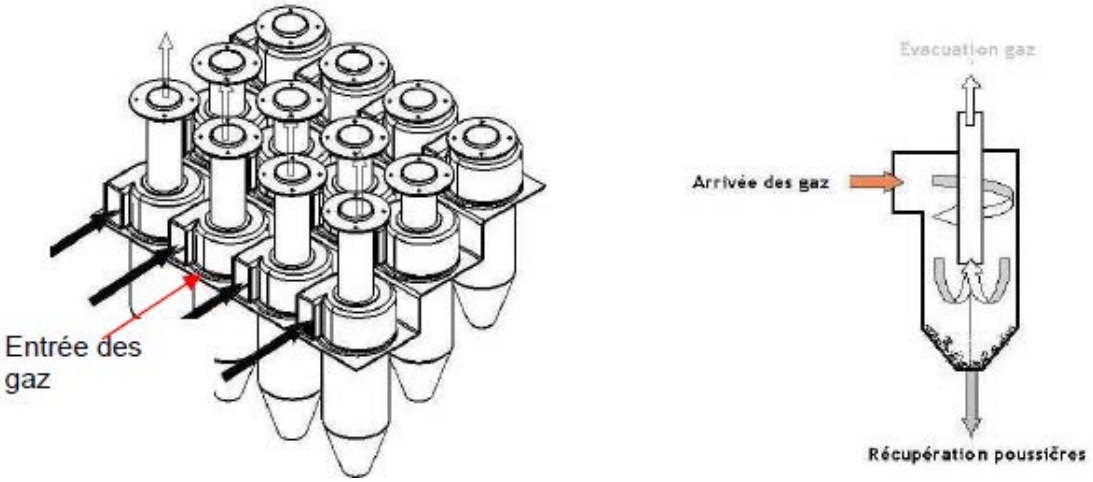
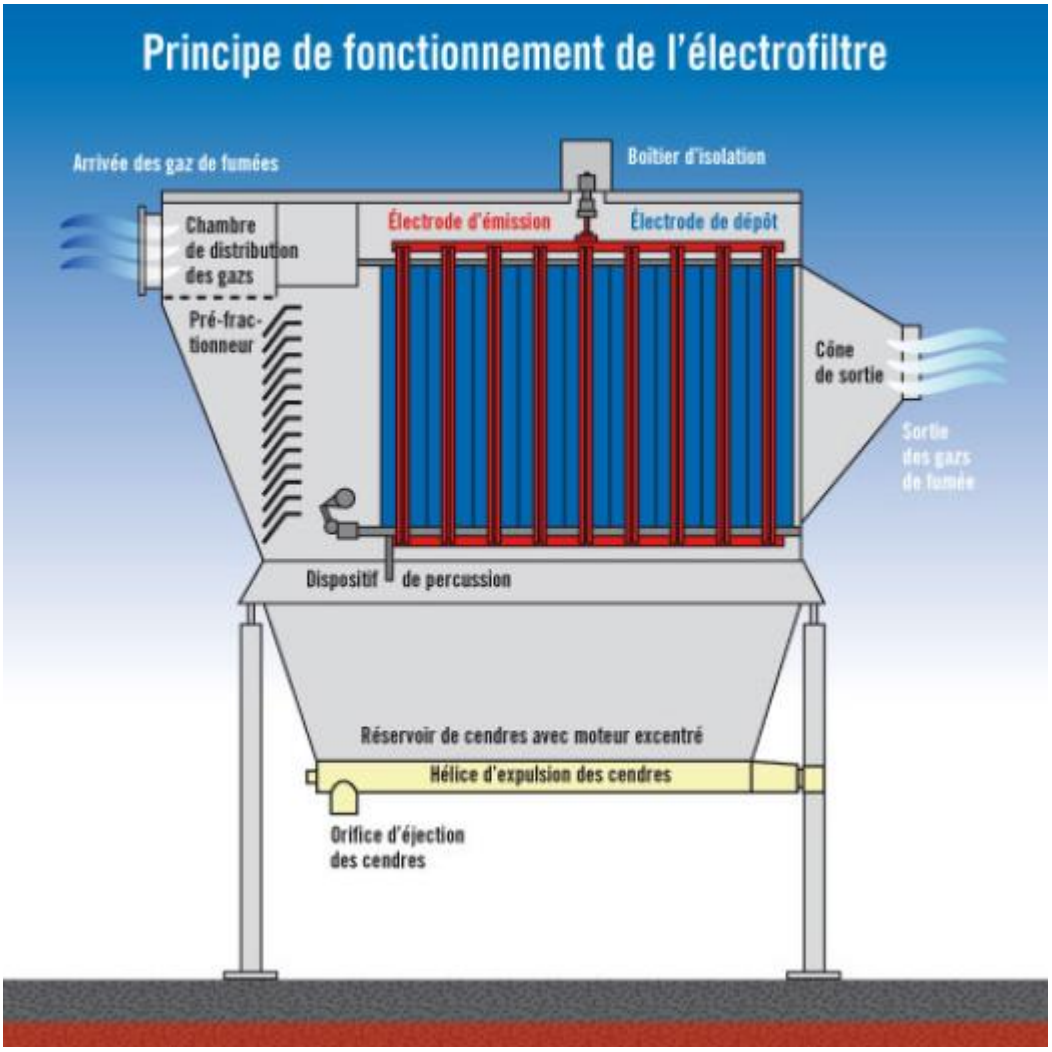


Schéma d'un multi-cyclone

Un électrofiltre peut-être utilisé en plus du multi-cyclone afin de garantir un taux de poussière dans les fumées en sortie de cheminée de 50mg/Nm3 :

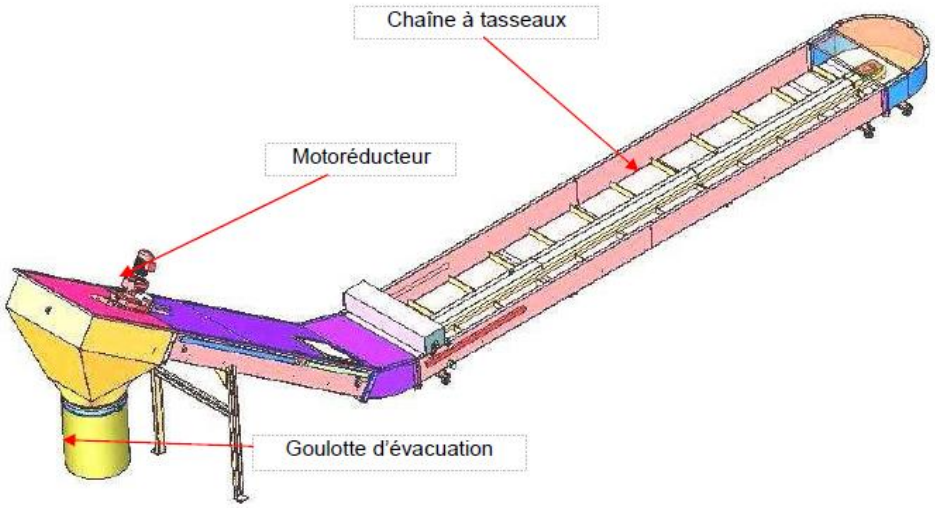


Principe de fonctionnement d'un électrofiltre

9- Un ventilateur est placé en sortie de cyclone afin de créer une aspiration pour permettre aux fumées de vaincre les pertes de charges du process.

10- Les fumées partent dans la cheminée et sortent épurées à l'atmosphère.

11- Les cendres de bois qui sortent de la chaudière atterrissent dans un convoyeur à raclette. Ce convoyeur est composé d'une chaîne, équipée de tasseaux et entrainé par un moto réducteur fonctionnant à faible vitesse. Les cendres récupérées par le multi-cyclone atterrissent aussi dans ce convoyeur :



Convoyeur de cendre

12- Le convoyeur achemine les cendres vers une benne.

Cendres en sortie de convoyeur atterrissant dans une benne

Résumé

Ce mémoire est le résultat d'un travail d'une durée de 6 mois, effectué de Février à Août 2012, au sein du groupe IDEX Energie, à Jarville (54). La problèmatique est la centralisation de la production d'énergie, pour le chauffage des bâtiments d'une collectivité territoriale, afin d'en réduire les coûts. Le tout en utilisant un maximum d'énergies d'origines renouvelables, au détriment d'énergies fossiles, afin de limiter les impacts environnementaux.

Ce rapport présente l'étude de faisabilité et de dimensionnement d'un réseau de chaleur, alimenté par une chaufferie fonctionnant en grande partie avec un combustible de type biomasse. Cela permet de réduire jusqu'à 80% l'utilisation de combustible fossile, et donc de limiter le réchauffement climatique. Cette solution, qui est encore très peu utilisée en France, possède une importante marge de progression, et peut devenir incontournable.

Abstract

Feasibility study and dimensioning of an heating network with biomass boiler room

The work reports the 6 months internship period from February to August 2012, performed within the group IDEX Energie, in Jarville (54). The problem is the centralization of the power production for the heating of the buildings of a territorial community, in order to reduce the costs. While using it a maximum of renewable energies, instead of fossil fuels, to limit the environmental impacts.

This report presents the feasibility study and dimensioning of an heating network, fed by a boiler room working with a large part of biomass. It allows to reduce the use the fossil fuels until 80%, thus to limit the glabal wamring. This solution, which is still little used in France, posseses an important increasing margin, and can become major.

Mots-clé

Réseau de chaleur, Biomasse, Chaufferie, Chauffage, Sous-station, Energie renouvelable, Efficacité énergétique, IDEX.