
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Développement de réseaux de chaleur, énergies
renouvelables et efficacité énergétique des bâtiments

S2T Ingénierie
2 Rue Troyon, Sèvres 92310



Tuteur entreprise :
Anthony Dumoulin
Directeur Département Energie

Tuteur académique :
Mindjid Maizia

Baptiste Berthillot
IUT
2022-2023

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Anthony Dumoulin, mon maître de stage, qui occupe la fonction de Directeur Département Energie au sein de S2T Ingénierie, et qui m'a accueilli comme stagiaire dans son service. Il m'a beaucoup appris sur les enjeux au secteur de l'énergie et sur les missions de son équipe au quotidien.

Durant mon stage, j'ai eu la chance de pouvoir bénéficier des conseils de Matthieu Boucher, Thomas Souverain et Margaux Galliot qui sont tous trois Ingénieurs d'étude énergie/exploitation et je voudrais les remercier pour le temps qu'ils m'ont accordé et leur aide précieuse.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères aux équipes pédagogiques et administratives de Polytech Tours qui ont facilité mes démarches et ont assuré un suivi tout au long de mon stage. Cette attention va particulièrement envers M. Maizia pour son aide lors de mes recherches, son avis éclairé et le suivi qu'il a pu m'apporter au cours de ce stage.

Sommaire

I.	Listes des figures.....	4
II.	Introduction.....	5
III.	Présentation de la structure d'accueil.....	6
1.	Présentation générale	6
2.	Présentation des secteurs d'activité	6
IV.	Présentation de la mission	8
1.	Objectifs généraux du stage	8
2.	Missions confiées	8
V.	Déroulé du stage.....	9
1.	Avant-propos	9
2.	Mission Procter&Gamble (Audit de performance énergétique).....	9
a)	Présentation	9
b)	Objectifs.....	9
c)	Résumé	10
d)	Analyse	13
e)	Bilan	14
3.	Mission SARPI LIMAY (Incinérateur industriel)	15
a)	Présentation	15
b)	Objectifs.....	15
c)	Résumé	15
d)	Analyse	19
e)	Bilan	20
4.	Mission Pont-Sainte-Marie (étude de faisabilité d'un réseau de chaleur)	21
a)	Présentation	21
b)	Objectifs.....	21
c)	Résumé	21
d)	Analyse	27
e)	Bilan	28
VI.	Conclusion	29
VII.	Annexes	30

I. Listes des figures

Figure 1 : Vue aérienne du site de Procter & Gamble

Figure 2 : Valeurs de Ubat et Uref de chaque bâtiment

Figure 3 : Exemple d'une feuille synthèse des déperditions d'un bâtiment

Figure 4 : Synthèse économique des actions de performances énergétiques proposées pour le Magasin 1

Figure 5 : Utilisation actuelle de la chaleur au sein de l'incinérateur de SARPI

Figure 6 : Courbes des débits de vapeur allant vers les aérothermes et le moteur à vapeur

Figure 7 : Courbe des besoins de chaleur du réseau de chaleur à proximité de l'incinérateur

Figure 8 : Exemple de représentation schématique de chaque scénario

Figure 9 : Comparatif des quantités d'énergie récupérées et valorisées pour chaque scénario

Figure 10 : Carte du réseau de chaleur

Figure 11 : Localisation des prospects

Figure 12 : Caractéristiques des prospects

Figure 13 : Localisation des quatre secteurs de prospects

Figure 14 : Exemple des répartitions des consommations et des courbes d'appel de puissance d'un scénario

Figure 15 : Détail des énergies valorisées pour chaque scénario

Figure 16 : Monotone et mix énergétique du scénario 1.1

Figure 17 : Tableau synthèse des scénarios

Figure 18 : Photographie des équipes de S2T lors d'une journée de cohésion

II. Introduction

Au terme de ma dernière année d'étude d'école d'ingénieur à Polytech Tours, j'ai été amené à réaliser un stage de fin d'étude d'une durée de six mois. Mes recherches de stage et mes candidatures m'ont mené à rejoindre le bureau d'étude S2T Ingénierie basé à Sèvres dans le Sud-Ouest de la proche banlieue parisienne. J'ai intégré le service énergie dirigé par Anthony Dumoulin entre le 6 février et le 4 août 2023.

Ce stage assure pleinement la transition entre mon parcours universitaire et mes débuts professionnels. Il fait suite à ma formation en Aménagement et Environnement et plus particulièrement à mon option « Réseaux et Systèmes de l'Environnement et des Aménagements Urbains ». Au sein de cette option, je me suis plutôt tourné vers le domaine de l'énergie et c'est pourquoi ce stage complète bien mon cursus.

Le service énergie de S2T travaille essentiellement sur des missions d'étude de faisabilité et de maîtrise d'œuvre de réseaux de chaleur, d'infrastructures de récupération ou de production de chaleur. S2T Ingénierie est aujourd'hui reconnue dans le domaine de la chaleur par tous les acteurs majeurs de ce secteur. Les missions réalisées sont commandées par des acteurs publics (ville, collectivité, etc.) ou des acteurs privés (opérateurs de réseaux de chaleur).

Au contact de différents ingénieurs, j'ai pu découvrir les méthodologies de réalisation d'études dans les domaines de l'énergie, de la valorisation de chaleur et des réseaux de chaleur. J'ai largement enrichi mes compétences techniques dans chacun de ces domaines et j'ai pu mettre à profit certaines connaissances acquises lors de mon parcours scolaire et de mon précédent stage. Une grande autonomie m'a permis de réaliser des études de la réunion de lancement jusqu'à la restitution finale et d'avoir une vision complète du travail d'ingénieur.

Plus généralement, j'ai aussi découvert le mode de fonctionnement d'un bureau d'étude et les attentes des clients. J'ai pu mesurer la grande diversité des missions avec des échelles (de quelques bâtiments à des agglomérations entières) et des durées (de quelques jours à plusieurs années) très variables. Je retiens qu'un ingénieur travaillant en bureau d'étude doit faire preuve d'une grande adaptabilité et d'une importante souplesse pour satisfaire le client. Il doit également faire preuve de pédagogie lors des présentations finales de l'étude réalisée et d'une certaine créativité afin d'imaginer des solutions innovantes auxquelles le client n'a pas pensé.

Enfin, j'ai pu appréhender les relations professionnelles. J'ai pu mesurer l'importance de la collaboration et de la communication pour cultiver un environnement propice au travail. J'ai eu aussi la chance de prendre part à une journée dite « corporate » où les conférences et les moments de partage ont été très intéressants.

Pour illustrer concrètement tous ces aspects, ce rapport retrace ces six mois passés à S2T Ingénierie. Il débutera par la présentation de la structure d'accueil. Ensuite, nous aborderons la description de certaines tâches que j'ai pu réaliser avant de faire un retour réflexif sur cette expérience.

III. Présentation de la structure d'accueil

1. Présentation générale

S2T est une société d'ingénierie fondée en 1991. Ses principales compétences concernent la conception, la coordination et la maîtrise des spécialités techniques et les enjeux énergétiques urbains. Plus concrètement, les secteurs qui sont traités au sein du bureau d'étude sont :

- L'assistance à Maîtrise d'Ouvrage
- Les fluides/thermiques
- L'électricité
- Les structures béton/métal
- Les structures bois
- Les productions/process
- Les réseaux énergétiques
- Les contrats de performances

Depuis sa création, cette entreprise a été dirigée par différents présidents/directeurs généraux avant d'être définitivement acquise par Marc Fasiolo, Jérôme Mathieu et d'autres partenaires (cercle opérationnel d'ingénieurs et partenaires externes). Aujourd'hui en pleine croissance, le groupe S2T a récemment ouvert une antenne à Nantes. Il s'appuie sur deux mécénats : le pavillon de l'Arsenal et la fondation Palladio. S2T compte également comme partenaires diverses associations professionnelles comme l'ADEME, l'AFPG (Association Française des Professionnels de la Géothermie) ou la BBCE (Bâtiments Bas Carbone) par exemple.

S2T Ingénierie est organisée en différents services pouvant collaborer dans la réalisation de certaines missions. Ces services sont : Electricité, Energie, Structure et CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation). Leurs effectifs sont variables et sont compris entre 3 et 12 personnes. Au total, l'entreprise compte environ 40 salariés et est en constante croissance avec l'objectif de doubler les effectifs d'ici environ trois ans.

2. Présentation des secteurs d'activité

- L'assistance à maîtrise d'ouvrage

L'assistance à maîtrise d'ouvrage peut concerner des projets de Construction comme de Réhabilitation. Elle peut aussi s'accompagner d'audits techniques dans le cadre de VEFA (Vente en Etat Futur d'Achèvement). S2T œuvre pour évaluer la faisabilité technique de projets, estime l'impact financier de remises aux normes, met en place des contrats de performance énergétique ou participe aux contrats de négociation de contrats d'exploitation.

- Les fluides/thermiques

S2T propose différents services autour de cette thématique. Des simulations thermiques dynamiques permettent de trouver des optimums pour réduire les consommations et améliorer les performances énergétiques des enveloppes. Des études sur les énergies renouvelables sont également menées.

- L'électricité

Dans le domaine de l'électricité, le champ de compétences de S2T repose principalement sur la rédaction de programme technique, des audits ou de l'assistance dans le choix des entreprises d'installation.

- Les structures béton/métal

Les ingénieurs en charge des missions qui concernent les structures béton/métal assurent la conception technique et le suivi de réalisation des structures de tous types de bâtiments.

- Les structures bois

Au sein de l'entreprise, les structures bois peuvent faire l'objet d'étude des principes constructifs, de dimensionnement et de réalisation de plans pour les ouvrages techniques.

- Les productions/process

Les productions de chaud et de froid sont deux domaines qui peuvent être traités par S2T. Il peut s'agir de productions calorifiques et de chaufferies collectives gaz/biomasse ou de cogénération. Au travers de simulations numériques, l'entreprise est en mesure d'établir des courbes d'appels de puissance, de déterminer des mix énergétiques et de dimensionner des moyens de production.

- Les réseaux énergétiques

Derrière la thématique des réseaux énergétiques se trouvent différentes propositions de prestations. Parmi elles, il y a le dimensionnement de réseaux vapeur, la mise en place de boucles d'eau chaudes, la modélisation de réseaux d'eau chaude, des schémas directeurs de réseaux de chaleur, etc.

- Les contrats de performance

Les missions qui portent sur les contrats de performance énergétique concernent certaines missions de maîtrise d'œuvre ou les délégations de service public.

IV. Présentation de la mission

1. Objectifs généraux du stage

Durant ce stage, l'objectif central est avant tout l'acquisition de compétences techniques dans les domaines des missions confiées (détaillées ci-après).

Un autre aspect primordial concerne l'apprentissage de la gestion des projets. Au terme des projets, un accent particulier doit être porté sur la valorisation des résultats obtenus dans une communication écrite (rapport) ou orale (présentation). Le dernier objectif est la bonne intégration à un milieu professionnel.

2. Missions confiées

Sous la responsabilité d'un chef de projets, le stagiaire travaille en totale immersion au sein d'une équipe projet constituée d'ingénieurs et techniciens expérimentés. Les missions traitées concernent des audits, études de faisabilité, et maîtrise d'œuvre. Elles peuvent concerner :

- **La participation à la réalisation d'études stratégiques et de maîtrise d'œuvre de développement de réseaux d'énergie,**

Ce volet comprend la participation aux étapes de prospection de points de consommation potentiels, à la modélisation des besoins au cours d'une année, au choix des sources d'énergie valorisées et à l'étude de la viabilité économique du projet global.

- **La mise en place d'énergie renouvelables,**

Dans chaque étude, le choix des sources d'énergie à valoriser fait l'objet d'une priorisation systématique des énergies renouvelables. Elles sont aussi promues lors des conclusions d'études avec des mises en perspectives des prix de l'énergie (prix du gaz très fluctuants par exemple) pour inciter le client à aller vers le renouvelable même si l'investissement initial est souvent plus important.

- **La réalisation d'audits énergétiques et études sur l'efficacité énergétique de bâtiment.**

Pour ce type de mission, les compositions du bâtiment sont référencées lors des visites. Les indicateurs de performance énergétique sont calculés, ce qui permet d'identifier des opportunités d'amélioration. Des actions concrètes pour optimiser l'efficacité énergétique sont ensuite proposées et présentées au client.

V. Déroulé du stage

1. Avant-propos

Au total, j'ai eu l'occasion de travailler sur près de 10 missions différentes. Elles rejoignent toutes les grands types de missions résumés dans la partie précédente. Dans le détail, ces missions sont :

- Audit de performance énergétique de bâtiments industriels sur la commune de Blois,
- Audit de performance énergétique d'une base militaire en région Nouvelle-Aquitaine,
- Etude de faisabilité d'un réseau de chaleur sur une commune en banlieue de Troyes,
- Dimensionnement d'infrastructure de récupération de chaleur sur un incinérateur industriel en région parisienne,
- Dimensionnement et modélisation dynamique des infrastructures de production de chaleur dans le cadre d'une réponse à appel d'offre sur une commune de région parisienne,
- Etude de prospection d'extension de réseau de chaleur sur une agglomération en région parisienne,
- Etude de valorisation de chaleur de Data Center en région parisienne,
- Etude en assistance à maîtrise d'ouvrage auprès d'une commune pour une extension de réseau de chaleur en région parisienne.

Dans un souci de synthèse, l'ensemble de ces missions ne sera pas traité dans ce rapport. Seulement trois d'entre elles seront abordées. Ce choix s'est fait en fonction du niveau d'implication que j'ai pu avoir en leur sein. Elles sont aussi représentatives de l'ensemble des tâches que j'ai pu avoir à réaliser.

A noter que sur l'ensemble des missions développées, j'ai participé à leur réalisation sous l'encadrement d'un ou de plusieurs ingénieurs. J'ai néanmoins largement participé aux études et aux rédactions des rapports et supports de présentation.

Les missions sont détaillées par ordre chronologique.

2. Mission Procter&Gamble (Audit de performance énergétique)

a) Présentation

Cette mission concerne un audit de performance thermique d'un site industriel de Procter&Gamble, une multinationale américaine spécialisée dans la production de biens de consommation (shampoings par exemple). Ce site est localisé à Blois dans le département du Loir-et-Cher. Il est composé de trois entrepôts de conditionnement et de stockage. Au moment du début de mon stage, une visite de terrain venait d'être effectuée.

b) Objectifs

D'après le cahier des charges, cette mission a pour objectifs de :

- Evaluer la performance énergétique actuelle du bâtiment :
 - Analyse thermographique,
 - Calcul des performances énergétiques du bâtiment.
- Comparer la performance énergétique actuelle avec celle des bâtiments de dernière génération :
 - Identification des écarts avec les meilleurs de leur catégorie.

- Cartographier les locaux chauffés en fonction de leur utilisation :
 - Identifier les zones chauffées et comparer aux températures de consignes.
- Prioriser les actions d'amélioration énergétique à entreprendre :
 - Proposition d'actions de performance énergétique (chiffrage investissement, CEE, temps de retour sur investissement, etc...).

c) Résumé

Cette mission a donc pour but d'évaluer les performances thermiques du site de Procter&Gamble et de proposer un certain nombre de solutions d'amélioration de ses performances. Le site se décompose comme suit :

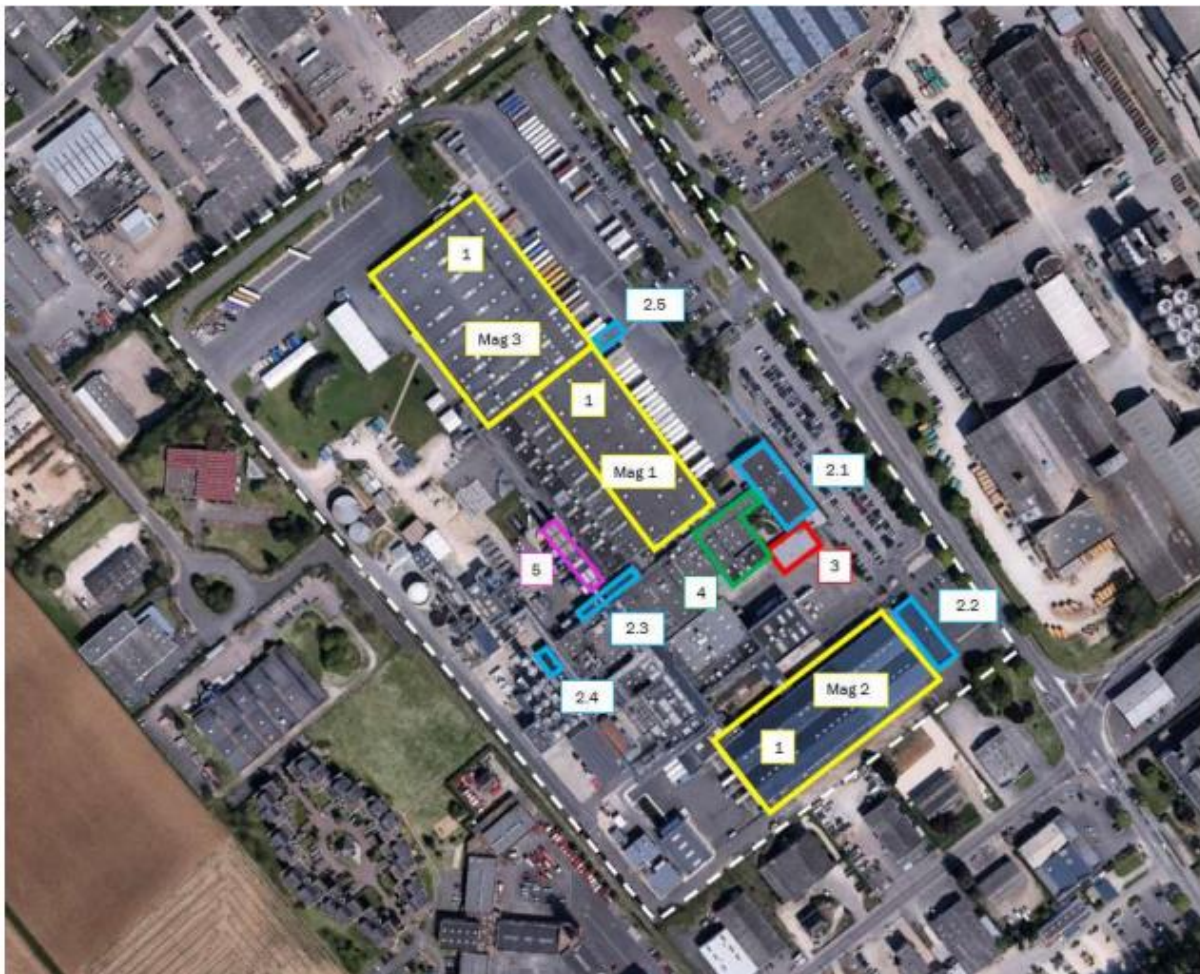


Figure 1 : Vue aérienne du site de Procter & Gamble

Le site est composé de trois grands entrepôts (Mag 1, 2 et 3), de bureaux administratifs et tertiaires (2), d'une cafétéria (3), d'une salle de repos (4) et d'une salle de conditionnement (5).

Cette étude s'appuie sur les données communiquées par son commanditaire et des relevés effectués lors des visites. Ces relevés sont de simples observations et des clichés thermographiques.

A partir de ces données, les déperditions globales des bâtiments ont été modélisées. Cette modélisation prend en compte le détail de la composition et les dimensions de chaque paroi., les heures d'occupation, les menuiseries (portes et fenêtres), les dispositifs de renouvellement d'air mécanique, etc. (Annexe 1)

La modélisation permet d'obtenir un certain nombre d'indicateurs qui seront utiles à l'évaluation des performances des bâtiments. Ces indicateurs sont :

– **Le coefficient de déperdition thermique**

Il permet d'évaluer le niveau d'isolation global d'un bâtiment. Il s'agit de la moyenne des déperditions à travers l'ensemble de ses parois. Il est caractérisé pour chaque paroi par un coefficient U_{paroi} . Les parois déperditives concernées donnent soit sur l'extérieur, soit sur des locaux non chauffés et peuvent être :

- des murs verticaux,
- des toitures (toiture terrasse, combles perdus, rampants),
- des planchers bas (plancher sur terre-plein, plancher sur vide sanitaire),
- des menuiseries (fenêtres, portes-fenêtres et portes).

Sont également considérées les déperditions linéaires par ponts thermiques. Ce coefficient est utilisé dans la réglementation des bâtiments existants (RT globale).

Le calcul du coefficient de déperditions U_{paroi} est :

$$U_{paroi} = \frac{1}{R_{paroi}} [W/m^2.K]$$

Chaque composant de chaque paroi permet de calculer une résistance thermique équivalente de la paroi.

La résistance thermique équivalente d'une paroi composée de plusieurs matériaux est calculée à partir de :

- e : épaisseur des matériaux (en m),
- λ : conductivité thermique des matériaux ($W/m.K$)*,
- h_i : résistance superficielle (coefficient de convection thermique) au voisinage intérieur des parois ($W/m^2.K$)*,
- h_e : résistance superficielle (coefficient de convection thermique) au voisinage extérieur des parois ($W/m^2.K$)*,

Soit n , nombre de matériaux constituant la paroi, la résistance thermique équivalente d'une paroi, notée R_{paroi} est :

$$R_{paroi} = \frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e} [m^2.K/W]$$

Un bâtiment affichant un coefficient U_{bat} faible présente une bonne performance thermique.

* les valeurs de conductivité thermique et des résistances superficielles proviennent de la base de données interne à S2T Ingénierie.

Au final cet indicateur permet de dresser le comparatif suivant :

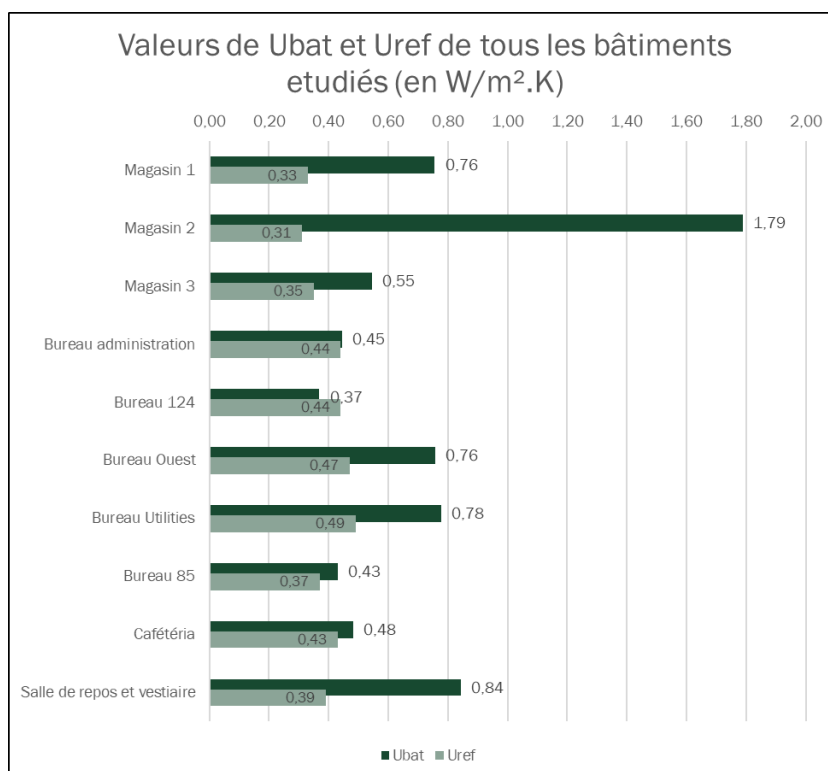


Figure 2 : Valeurs de Ubat et Uref de chaque bâtiment

– Les proportions de chaque source de déperdition sur les déperditions totales

Pour chaque bâtiment est dressée une feuille synthèse qui résume l'importance et les proportions de chaque source de déperdition. Elles sont calculées par le modèle principalement en fonction des compositions et des surfaces des parois. Une feuille synthèse prend la forme suivante :

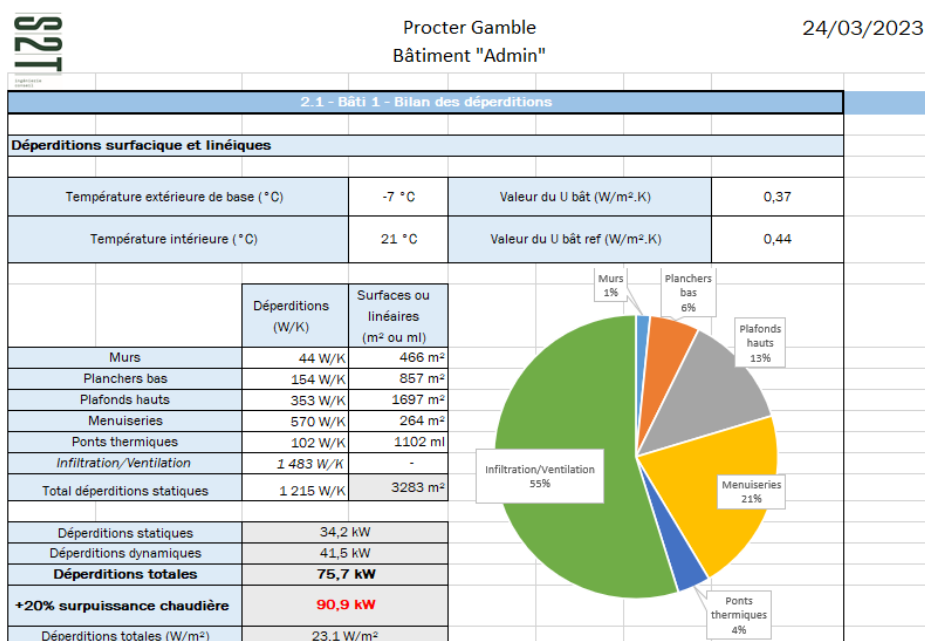


Figure 3 : Exemple d'une feuille synthèse des déperditions d'un bâtiment

– **Les consommations surfaciques (en kWh_{ep}(PCI)/m²SHON)**

Le calcul des consommations surfaciques permet de calculer les consommations de différents bâtiments ayant des surfaces différentes. Dans notre cas, elles sont calculées à partir des données de consommation partagées par l'entreprise. Les rendements de production et le pouvoir calorifique des combustibles sont pris en compte dans ce calcul.

– **Les ratios d'émission de gaz à effet de serre par mètre carré (kg_{eq}.CO₂/m²SHON.an)**

L'indicateur d'émission de gaz à effet de serre par mètre carré est calculé à partir des consommations surfaciques auxquelles on applique un facteur de conversion en fonction de la source d'énergie utilisée par le mode de chauffage de chaque bâtiment. Par exemple, le gaz et l'électricité présentent un facteur de conversion différent.

d) Analyse

A partir de tous ces indicateurs, une analyse est effectuée afin d'évaluer quel bâtiment affiche le plus de déperditions et comment les expliquer. Dans le cas de Procter & Gamble, ce sont principalement les 3 grands entrepôts dont l'analyse est intéressante puisque les quantités d'énergie utilisées pour le chauffage sont importantes. L'analyse des performances thermiques et les propositions d'actions d'améliorations peuvent donc engendrer des économies conséquentes.

Le résumé de l'analyse pourrait être le suivant.

Le magasin 2 parmi les entrepôts étudiés présente une performance énergétique nettement inférieure aux deux autres, malgré des consommations surfaciques de chauffage beaucoup plus faibles. L'analyse des indicateurs calculés et des autres données de consommation a révélé que cette disparité s'explique par les déperditions dynamiques liées au **renouvellement d'air**, contrairement aux déperditions statiques qui dépendent uniquement de la nature de l'enveloppe du bâtiment. Ces déperditions dynamiques sont **bien plus importantes dans les entrepôts 1 et 3, en raison d'un grand nombre de portes sectionnelles** qui accueillent régulièrement des camions. L'ouverture et la fermeture fréquentes de portes aux dimensions importantes entraînent ainsi de considérables pertes de chaleur.

A la suite de ce diagnostic, des actions de performances énergétiques sont proposées pour chaque bâtiment. Chacune de ces actions est présentée et chiffrée (voir annexe 2). On retrouve :

- Isolation des murs,
- Isolation des toitures terrasses,
- Remplacement des fenêtres et portes-fenêtres,
- Isolation des rampants de toiture,
- Remplacement des parois polycarbonate,
- Remplacement des portes opaques pleines,
- Mise en place de déstratificateurs.

Pour chaque bâtiment est dressé un tableau qui récapitule les gains énergétiques possibles pour chaque action sur la durée de vie estimée de cette action. Les coûts d'investissement sont précisés au même titre que les CEE (Certificats d'Economie d'Energie). Les CEE sont des aides financières pouvant être obtenues en cas de mise en place de l'action de performance énergétique concernée. Ils sont calculés selon une méthodologie précise définie par le Ministère de l'Ecologie.

Ce tableau se présente comme suit :

Magasin 1				Consommation initiale Chauffage gaz	Consommation initiale Chauffage électricité
				856	-

Type	Code	Référence	Action de Performance	Gain Chauffage (MWh)	Gain Electricité (MWh)	Investissement	CEE récupérable
Bâti	1.1	BAT11	Isolation des murs par l'intérieur (ITI)	62	-	62 200 €	11 900 €
	1.2	BAT12	Isolation des murs par l'extérieur (ITE)	-	-	- €	-
	1.4	BAT14	Isolation des terrasses	474	-	386 400 €	48 700 €
	1.5	BAT15	Remplacement des fenêtres et portes-fenêtres	-	-	- €	-
	1.7	BAT17	Isolation des rampants de toiture	-	-	- €	-
	1.8	BAT18	Parois polycarbonate	10	-	78 400 €	-
	1.9	BAT19	Remplacement portes pleines opaques	0	-	1 700 €	-
	5.4	EMI4	Mise en place de déstratificateur	30	6	60 700 €	16 500 €
	Total			576	6	589 400 €	

Consommation projeté gaz	Consommation projeté électricité	% Gain
280	6	67%

Figure 4 : Synthèse économique des actions de performances énergétiques proposées pour le Magasin 1

A l'aide de l'analyse des performances, des propositions d'actions et de leur impact économique, le client a tous les éléments utiles pour sa prise de décision sur quelle(s) action(s) il souhaite mettre en place.

e) Bilan

Cette mission a été l'occasion pour moi de découvrir une mission d'audit de performance thermique. J'ai pu appréhender la méthode de décomposition des parois, les habitudes en termes de préconisation, l'analyse et l'interprétation des indicateurs calculés et le cadre légal de la rénovation thermique. Cette mission présente l'avantage d'inclure des bâtiments de différentes typologies (des entrepôts et des bureaux tertiaires).

La principale difficulté rencontrée réside dans le fait de n'avoir pas effectué la visite du site. La compréhension des différents bâtiments et des relevés (thermographies réalisées sur site) a été particulièrement fastidieuse.

J'ai commencé mon stage par cette mission qui m'a permis d'acquérir des notions de thermique de bâtiments.

J'ai apprécié découvrir ce type de mission mais le côté répétitif du remplissage des fiches d'audit m'a par moment un peu déçu. Néanmoins, je mesure bien que cette étape de remplissage des fiches d'audit soit nécessaire pour qu'en découle une analyse construite et fiable.

3. Mission SARPI LIMAY (Incinérateur industriel)

a) Présentation

Cette mission est une étude de faisabilité. Elle a pour but de déterminer le gisement potentiel de chaleur d'un incinérateur de déchets industriels détenu par SARPI filiale du groupe Veolia. Cette chaleur a vocation à être utilisée pour alimenter un réseau de chaleur à proximité.

La mission consiste à proposer différents scénarios avec des dispositifs de valorisation de chaleur fatale. L'énergie valorisable et la rentabilité économique sont estimées pour permettre à SARPI de choisir quel type d'équipements il souhaite installer sur son site.

b) Objectifs

Cette mission a pour objectifs de réaliser :

- Un bilan des consommations possibles du réseau de chaleur.
- Une étude de la capacité de récupération de chaleur sur l'incinérateur :
 - Réalisation de schéma de principe simplifié (description des modes de fonctionnement, régime de température) ;
 - Dimensionnement des installations (puissances, rendement, nombre d'heures de fonctionnement) ;
 - Nature et livraison de la chaleur.

c) Résumé

Schématiquement, la chaleur émise des suites de la combustion des déchets industriels est actuellement utilisée de deux façons différentes. Une partie est valorisée dans un moteur à vapeur et produit de l'électricité et l'autre partie est envoyée vers des aérothermes afin d'y être dissipée.

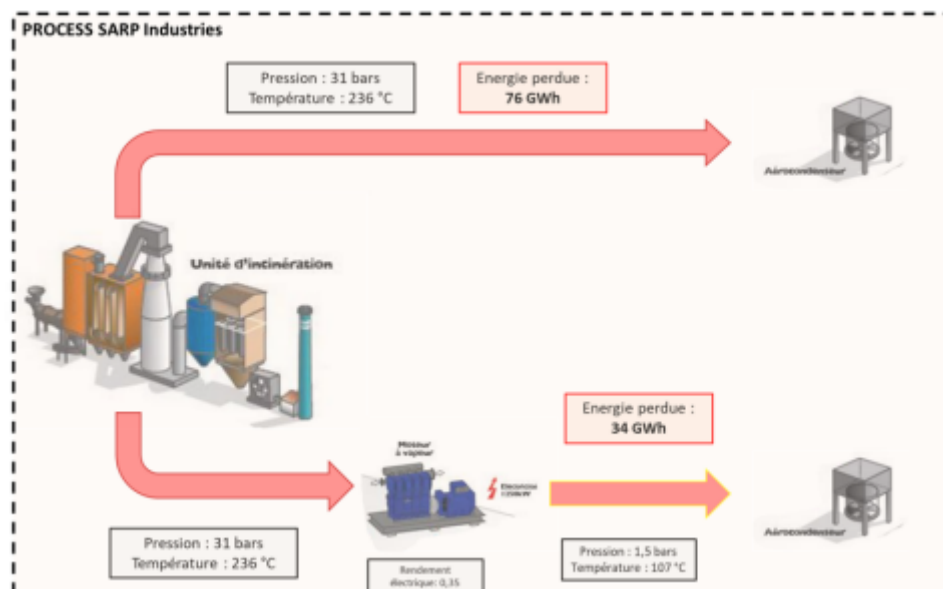


Figure 5 : Utilisation actuelle de la chaleur au sein de l'incinérateur de SARPI

Cette mission s'appuie sur les données de production de vapeur et d'évacuation de vapeur inutilisée (et dissipée). Ces données proviennent de relevés de puissance réalisés sur une année. Les relevés étant incomplets, un certain nombre d'hypothèses doivent être faites. Elles s'appuient sur les témoignages recueillis qui estiment les périodes de panne et les erreurs de mesure.

Les données corrigées permettent d'obtenir les courbes de débit de chaleur fatale en sortie d'incinérateur ainsi que la courbe des besoins de chaleur du réseau de chaleur urbain à proximité.

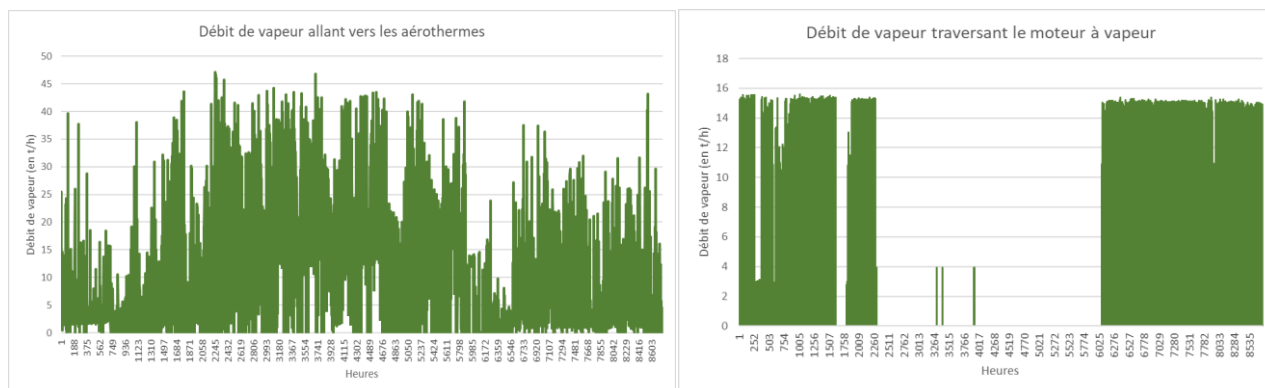


Figure 6 : Courbes des débits de vapeur allant vers les aérothermes et le moteur à vapeur

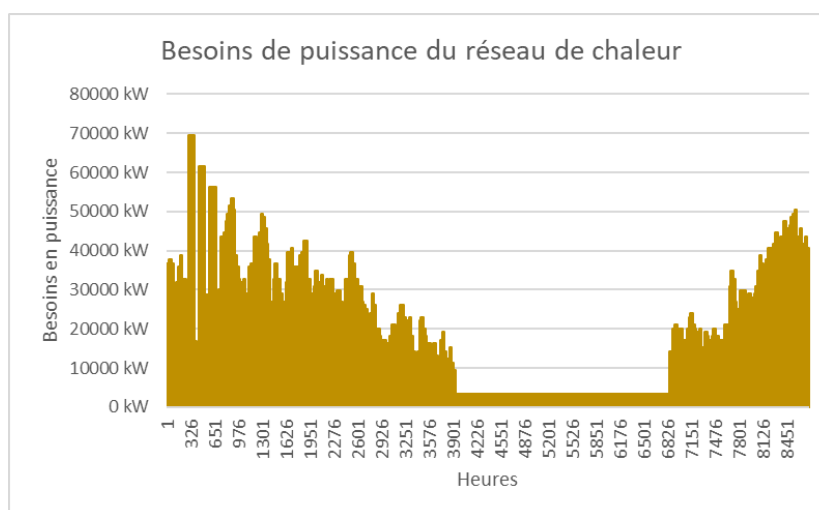


Figure 7 : Courbe des besoins de chaleur du réseau de chaleur à proximité de l'incinérateur

À partir de là, différents scénarios sont imaginés pour valoriser au mieux la vapeur dégagée perdue. Ces scénarios sont en fait différentes propositions incluant différentes combinaisons de dispositifs de valorisation. Synthétiquement, on peut retrouver :

Scénario	Equipement(s) installé(s)	Type d'énergie valorisée/produite
1.1	Echangeur	Chaleur
1.2	Hydrocondenseur	
1.3	Echangeur + Hydrocondenseur	
2	Turbine	Electricité
3.1	Turbine (avec soutirage)	Chaleur et électricité
3.2	Turbine (avec soutirage) + Hydrocondenseur	

Tableau 1 : Synthèse des scénarios

Chacun des équipements proposés est dimensionné de façon à pouvoir fonctionner de manière la plus continue possible par rapport au débit de vapeur disponible. Les quantités d'énergie valorisées sont calculées en prenant en compte l'enthalpie ("En thermodynamique, fonction définie par la somme de l'énergie interne d'un système et du produit de sa pression par son volume." (Le Robert)).

Chaque scénario est également schématisé pour permettre au client de visualiser matériellement les infrastructures installées. Par exemple, le scénario 3.2 est schématisé de la manière suivante :

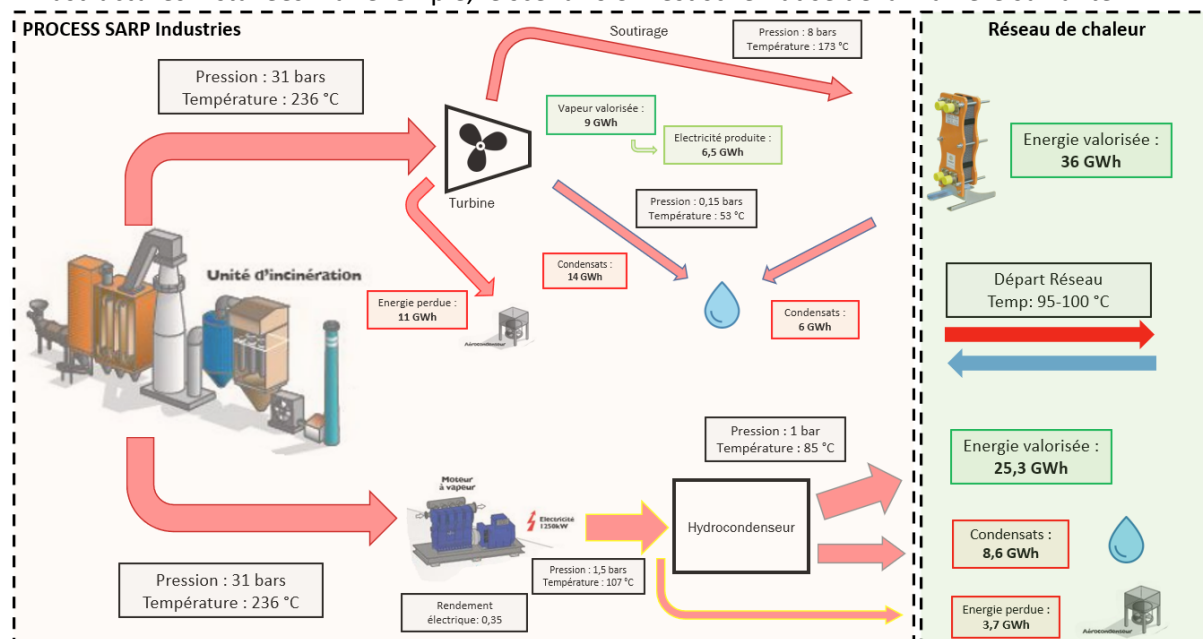


Figure 8 : Exemple de représentation schématique de chaque scénario

La modélisation de ces six scénarios permet d'obtenir une comparaison des valorisations possibles. (voir annexe 3). Cette comparaison est synthétisée dans le graphique ci-dessous :

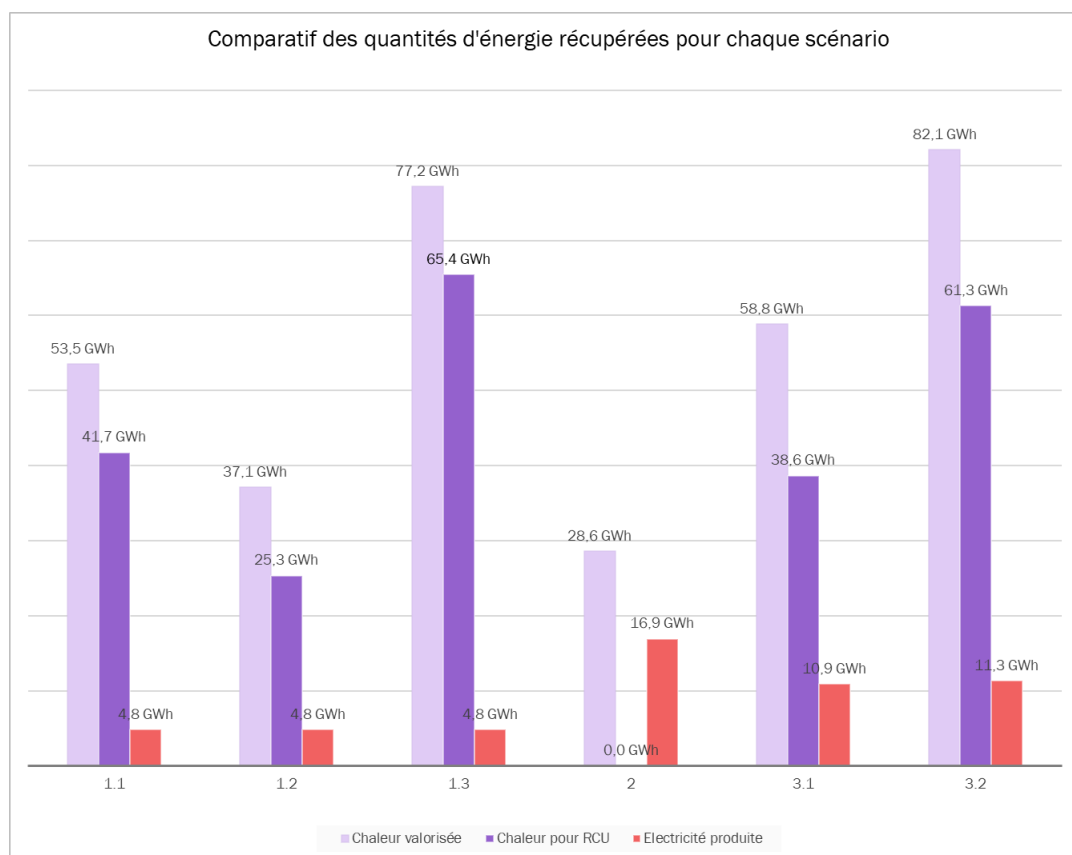


Figure 9 : Comparatif des quantités d'énergie récupérées et valorisées pour chaque scénario

De ce graphique, on peut voir que les scénarios qui présentent les plus grands potentiels de valorisation sont les 1.3 et 3.2 puisqu'ils combinent plusieurs dispositifs de valorisation. A ces

premières observations sont comparées les émissions CO₂ évitées annuellement (puisque une partie des consommations de chauffage émettrices de CO₂ sont supprimées). Elles sont rassemblées dans le tableau suivant :

Scénario	1.1	1.2	1.3	2	3.1	3.2
Emissions CO ₂ évitées par an	9 500 tCO ₂	5 700 tCO ₂	14 800 tCO ₂	800 tCO ₂	9 200 tCO ₂	14 300 tCO ₂

Tableau 2 : Comparatif des émissions de CO₂ évitées par an

Les scénarios sont aussi à mettre en perspective avec les coûts d'investissements et d'entretien impliqués par la mise en place de chaque dispositif. C'est l'objet de la seconde phase de la mission lors de laquelle est réalisée une étude financière des scénarios.

L'étude financière consiste à estimer la rentabilité économique de chaque scénario à l'horizon 2044 (soit 20 ans). Pour ce faire, cette étude prend en compte les coûts d'investissements qui rassemblent l'achat des équipements, les coûts de raccordements hydrauliques, les coûts de génie civil et l'électricité. Ils se présentent sous cette forme :

Scénario	Investissement échangeur vapeur/eau	Investissement hydrocondenseur	Investissement turbine	Hydraulique	Génie Civil	Electricité	Somme
1.1	180 000 €			250 000 €	20 000 €	120 000 €	570 000 €
1.2		200 000 €		150 000 €	20 000 €	120 000 €	490 000 €
1.3	180 000 €	200 000 €		400 000 €	40 000 €	120 000 €	940 000 €
2			3 300 000 €	600 000 €	880 000 €	1 000 000 €	5 780 000 €
3.1	180 000 €		3 000 000 €	850 000 €	900 000 €	1 120 000 €	6 050 000 €
3.2	180 000 €	200 000 €	3 000 000 €	1 000 000 €	920 000 €	1 120 000 €	6 420 000 €

Tableau 3 : Synthèse des investissements de chaque scénario

Sont ensuite considérés les coûts d'entretien des installations (P2), du renouvellement du matériel (P3) et les charges financières (remboursement prêts, etc...).

		Scénario 1.1	Scénario 1.2	Scénario 1.3	Scénario 2	Scénario 3.1	Scénario 3.2
Charges	P1	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
	P2	42 000 €	25 000 €	65 000 €	24 000 €	51 000 €	74 000 €
	P3	7 000 €	6 000 €	12 000 €	72 000 €	76 000 €	80 000 €
	Charges financières	52 150 €	44 900 €	85 500 €	523 700 €	548 300 €	581 600 €
	Redevances potentielles	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
	Charges annuelles	101 200 €	75 900 €	162 500 €	619 700 €	675 300 €	735 600 €

Tableau 4 : Synthèse des charges de chaque scénario

Enfin, deux indicateurs sont calculés : le TRI et le VAN. Ils représentent :

- Le taux de rentabilité interne (TRI) : Il mesure la rentabilité annualisée moyenne d'un investissement constitué de flux négatifs (décaissements) et de flux positifs (encaissements),
- La valeur actuelle nette (VAN) : il mesure la valeur créée par un investissement. Dans notre cas, cet indicateur est calculé avec un taux d'actualisation de 3%.

L'ensemble des éléments de l'étude économiques qui sont détaillés ci-avant aboutissent au tableau synthèse suivant :

	Scénario 1.1	Scénario 1.2	Scénario 1.3	Scénario 2	Scénario 3.1	Scénario 3.2
Investissements	720 000 €	620 000 €	1 180 000 €	7 230 000 €	7 570 000 €	8 030 000 €
Charges annuelles	49 000 €	31 000 €	77 000 €	96 000 €	127 000 €	154 000 €
Recettes annuelles	210 000 €	130 000 €	330 000 €	970 000 €	680 000 €	830 000 €
Somme résultat net sur 20 ans	1 570 000 €	730 000 €	2 410 000 €	4 850 000 €	-340 000 €	940 000 €
TRI	16%	11%	16%	8%	4%	5%
VAN	1 167 000 €	565 000 €	1 790 000 €	4 031 000 €	425 000 €	1 356 000 €

Tableau 5 : Tableau synthèse de l'étude économique

d) Analyse

Comme résumé des nombreuses conclusions tirées de cette étude, les points notables sont :

D'un point de vue technique, **le scénario 1.2** qui ne valorise la chaleur que derrière le MAV **ne paraît pas pertinent** pour alimenter le réseau de chaleur. On peut également **s'interroger sur les scénarios 1.1 et 3.1** qui permettent de valoriser environ 40 GWh de chaleur, ce seuil peut paraître bas par rapport au linéaire de réseau à réaliser pour rejoindre le réseau de chaleur (environ 7 km).

Les **scénarios 1.1 et 3.1 sont rentables**, et permettent de générer un **très bon TRI** tout en limitant les investissements portés. Néanmoins, ils ne permettent pas de valoriser l'ensemble de la chaleur valorisable. Il apparaît que dans cette famille de scénario, **le scénario 1.3 est le plus intéressant**.

Le scénario **2 est rentable**, il permet de générer un très bon TRI, mais nécessite des investissements élevés. De plus, ce scénario permet de **valoriser l'ensemble du gisement de chaleur**.

Le scénario **3.2 est économiquement plus rentable que le 3.1**. Ces scénarios nécessitent des **investissements élevés**. Les recettes de ces scénarios dépendent à la fois du prix de vente de l'électricité qui est variable et du prix de vente de la chaleur qui est stable. Cela permet de **limiter les risques liés à ces investissements**.

De fait, les scénarios qui ressortent à la fois techniquement, énergétiquement, environnementalement et économiquement sont donc les scénarios 1.3 et 3.2, l'avantage du scénario 3.2 étant la valorisation de chaleur et d'électricité, la plus complète possible pour le site.

e) Bilan

Cette mission m'a permis de m'initier à la valorisation de chaleur fatale et de découvrir des notions de thermodynamique (la prise en compte de l'enthalpie par exemple). J'ai pu aussi découvrir en quoi consiste une étude de faisabilité et notamment le degré de précision attendu. Les résultats sont approximatifs à la possibilité la plus défavorable à l'étude pour éviter toute surestimation finale. Le client recherche principalement des ordres de grandeur pour pouvoir évaluer la rentabilité d'un tel projet à court terme.

Un autre aspect intéressant de cette mission a été la manière de rechercher des informations sur les puissances habituelles d'équipements (turbines, hydro condenseur, échangeur, etc...). La première source d'information privilégiée (en cas de manque d'information sur un équipement donné) consiste à consulter les personnes de S2T ayant déjà travaillé sur des projets similaires ou étant spécialisé dans le domaine d'étude (la vapeur en l'occurrence). Néanmoins, certaines informations utiles à l'étude sont parfois manquantes et y accéder se révèle compliqué. Par exemple, certaines informations sur les modèles de turbine à mettre en place se sont révélées inaccessibles en raison du secret industriel des fournisseurs. Pour accéder à certains ordres de grandeur, nous sommes entrés en contact directement avec des fabricants de turbines via le site web général dans les sections de demandes de contact. De cette façon, nous avons pu échanger avec des commerciaux de ces entreprises qui ont ensuite réalisé une rapide étude pour nous renseigner sur quel modèle de turbine pourrait convenir à notre étude et leurs principales caractéristiques techniques.

4. Mission Pont-Sainte-Marie (étude de faisabilité d'un réseau de chaleur)

a) Présentation

Cette mission est une étude de faisabilité d'un réseau de chaleur dans la ville de Pont-Sainte-Marie. A ce stade, elle doit présenter les abonnés potentiels, les besoins énergétiques et le tracé du futur réseau.

La mairie de Pont-Sainte-Marie commande cette étude dans le cadre de son engagement en faveur du développement durable et plus particulièrement de la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre.

b) Objectifs

Cette étude s'attache à cerner le potentiel de bâtiments raccordables et leur besoin. Elle doit aussi approfondir la faisabilité technique du projet et ses bonnes performances économiques.

c) Résumé

Cette mission se déroule en plusieurs étapes :

— Caractérisation des abonnés potentiels

Le repérage des bâtiments qu'il peut être intéressant de raccorder se fait à partir d'indications de la ville et de recherches. La plateforme statistiques.developpement-durable.gouv.fr est notamment utilisée afin de récupérer les données de consommation de gaz des années récentes par bâtiment.

Les typologies de bâtiments retenues sont :

- L'habitat collectif (social et privé),
- Les équipements publics : bâtiments communaux, établissements d'enseignement, gymnases,
- Les principaux consommateurs de gaz,
- Les bâtiments industriels.

A partir de ces bâtiments sélectionnés est imaginé un réseau de chaleur avec différentes branches.

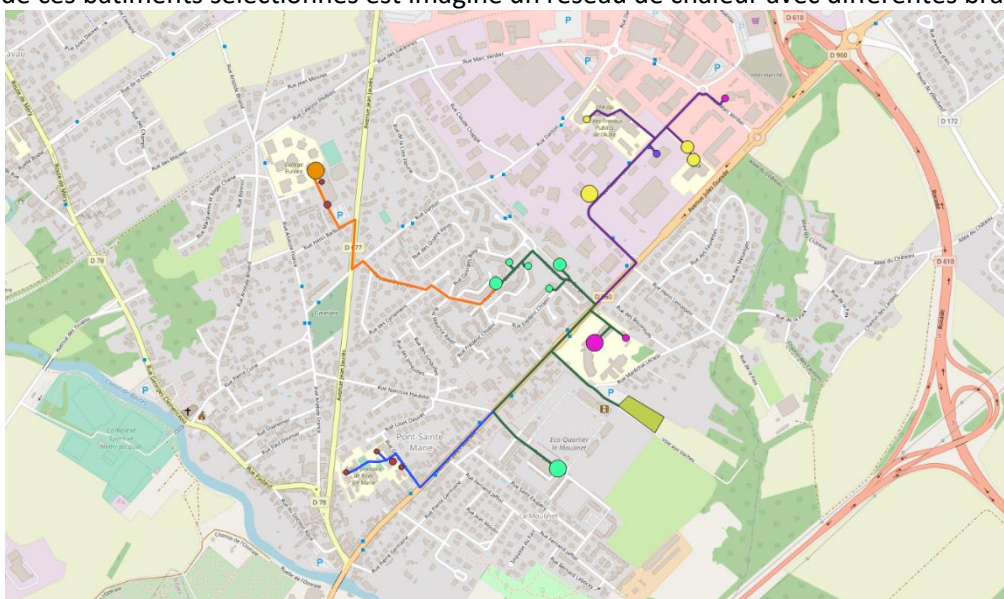


Figure 10 : Carte du réseau de chaleur

Les gestionnaires des bâtiments sélectionnés sont divers :

Bâtiments publics	Logements Sociaux	Logements privés	Divers
Etat	Département de l'Aube	Franck Acosta	Centre hospitalier Troyes
Région Grand-Est	Mon Logis	NC	
Département de l'Aube		CEPHAS Immobilier	
Ville de Pont-Sainte-Marie		ECOLOTIS	

Ces bâtiments sont repérés sur la carte ci-dessous où ils sont coloriés en fonction de leur gestionnaire.



Figure 11 : Localisation des prospects

En termes de consommation, les prospects repérés sont regroupés dans cette liste :

Prospects	Adresse	Conso PCI	Abonnés	Typologie
EHPAD Nazareth	1 Rue du Maréchal Leclerc	1867	Centre Hospitalier Troyes	Santé (que existant)
Extension Nazareth	1 Rue du Maréchal Leclerc	256	Centre Hospitalier Troyes	Equipement neuf / à construire
Ecoquartier Logements	5 Rue du Moulinet	318	Cephas Immobilier	Logements neufs / à construire
Ecoquartier Pavillons	5 Rue du Moulinet	322	Ecolotis	Logements neufs / à construire
Résidence les Acacias	Av. Michel Berger	738	Mon Logis	Logements Existants
Résidence les Sorbiers	Rue Frédéric Chopin	366	Mon Logis	Logements Existants
Résidence les Cèdres	Av. Michel Berger	460	Mon Logis	Logements Existants
Résidence les Ormes	Résidence les Bleuets	369	Mon Logis	Logements Existants
Résidence les Erables	Rue Claude Debussy	475	Mon Logis	Logements Existants
COSEC	4 Rue Henri Barbusse	225	Département de l'Aube	Equipement existant
Salle Gymnase Royer	4 Rue Henri Barbusse	89	Département de l'Aube	Equipement existant
Collège Eureka	50 Rue Anatole France	639	Département de l'Aube	Enseignement public existant
AFPA	7 Rue Robert Keller	963	Région Grand-Est	Enseignement public existant
Rakon/Greenwheel	2 Rue Robert Keller	351	Franck Acosta	Tertiaire existant
CFA Auto/Interpro	9 Rue Robert Keller	1369	Région Grand-Est	Enseignement public existant
CNAMTS Troyes	33 Rue Marc Verdier	300	Etat	Tertiaire existant
CFA BTP	34 Rue Danton	665	Région Grand-Est	Enseignement public existant
Résidence Guesdes	Av. Jules Guesde	57	NC	Logements Existants
Ecole Jean Jaurès Bat 1-2-4	7 Rue du Général Sarrail	74	Ville de Pont-Sainte-Marie	Enseignement public existant
Ecole Jean Jaurès Bat 3 R+2	7 Rue du Général Sarrail	59	Ville de Pont-Sainte-Marie	Enseignement public existant
RASED	7 Rue du Général Sarrail	25	Ville de Pont-Sainte-Marie	Enseignement public existant
Groupe Sarrail	7 Rue du Général Sarrail	336	Ville de Pont-Sainte-Marie	Enseignement public existant

Figure 12 : Caractéristiques des prospects

L'ensemble de ces prospects a été contacté pour qu'ils nous communiquent leur consommation de chauffage, d'ECS et les caractéristiques de leurs chaudières. Sur l'ensemble, près des trois quarts ont répondu. Les besoins des bâtiments restants ont été estimés suivant différentes hypothèses.

Le réseau de chaleur est ensuite dimensionné. Les diamètres nominaux de toutes ses portions sont calculés. (voir annexe 4) Ce dimensionnement sera ensuite utile pour déterminer les pertes du réseau qu'il est nécessaire de prendre en compte dans la production.

– Définitions des scénarios

Dans l'optique de proposer plusieurs possibilités à la commune de Pont-Sainte-Marie, différents scénarios sont imaginés. La différence entre chaque scénario repose sur les secteurs que le réseau de chaleur va couvrir.



Figure 13 : Localisation des quatre secteurs de prospects

Les scénarios 1 couvrent les 4 secteurs.

Le scénario 2 couvre tous les secteurs sauf celui de l'école Sarraill.

Le scénario 3 couvre tous les secteurs sauf celui du collège Eureka

Le scénario 4 couvre uniquement les secteurs dit principal et de la zone industrielle

Le scénario 5 est identique au scénario 1 mais il est divisé en deux phases pour étaler les investissements.

Le scénario 6 est très restreint, il couvre uniquement le secteur principal.

Pour chaque scénario sont détaillés les répartitions des consommations par typologie de bâtiment. La courbe d'appel de puissance et la monotone d'appel de puissance sont également présentées.

Tableau 2. Répartition par typologie de bâtiment (Consommations actuelles)

Typologie	Consommation annuelle (MWh)
Tertiaire existant	651
Logements existants	2465
Logements neufs/à construire	640
Enseignement public existant	4130
Santé (que existant)	1867
Equipement existant	314
Equipement neuf/à construire	256

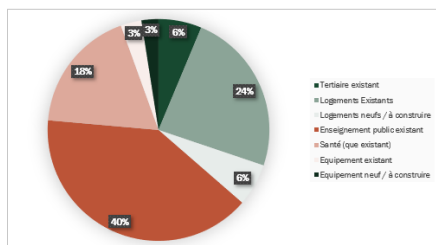


Figure 10. Répartition par typologie de bâtiment (consommations actuelles)

3.4.3. APPELS DE PUISSANCE

Le regroupement des besoins de chauffage de d'ECS sur un même graphique au cours de l'année permet d'observer les appels de puissance heure par heure.

19 / 107

On remarque que le pic de consommation pour le chauffage se produit en hiver. La puissance maximale appelée pour ce premier scénario est 4.5 MW.

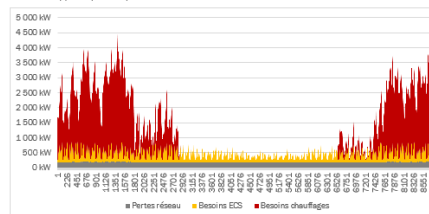


Figure 11. Appels de puissance - Scénario 1

3.4.4. MONOTONE

Le tracé de la monotone des appels de puissance permet de classer les puissances absolues de la plus grande à la plus petite.

La monotone générale pour ce premier scénario est la suivante :

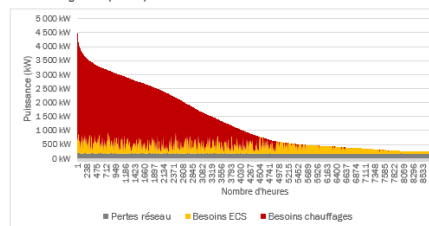


Figure 12. Monotone - Scénario 1

20 / 107

Figure 14 : Exemple des répartitions des consommations et des courbes d'appel de puissance d'un scénario

— Etude des approvisionnements en énergie

L'objectif de cette étape est de déterminer quelles formes d'énergies renouvelables sont exploitables afin d'alimenter en chaleur le réseau. En énergie non délocalisable et déjà existante, il est intéressant de favoriser la récupération de chaleur fatale sur les eaux usées, Datacenter et UIOM. Il vient ensuite, les énergies non délocalisables, à créer telles que la géothermie. Puis les énergies délocalisables comme la création d'une chaufferie biomasse, ou d'un centre de méthanisation.

**** Dans un souci de synthèse, seules les sources exploitables sont détaillées ci-après.**

La géothermie est jugée exploitable. L'outil "Géothermies.fr" a permis de déterminer le potentiel géothermique de surface sur la commune de Pont-Sainte-Marie. Ce potentiel est qualifié de "fort" avec un débit de 100 m³/h et un delta de température de 5°C.

La biomasse est également une source de production de chaleur jugée intéressante. Avec un taux de boisement entre 25 et 35%, le département de l'Aube dispose d'une quantité de biomasse suffisamment importante. Le taux minimal de fonctionnement d'une chaudière biomasse est d'environ 30%. Une source d'énergie d'appoint est donc nécessaire lorsque les besoins sont faibles et peut également servir lors des pics de consommation.

L'exploitation de l'énergie issue de la biomasse a des forces et des faiblesses :

- Avantages :
 - Fait partie des énergies prioritaires par l'EnR'Choix ADEME
 - Stabilité du prix de chaleur
- Inconvénients :
 - Nuisances sonores : Les trajets réguliers des camions, même sur une distance restreinte engendrent l'émission de polluants qui ont un impact carbone non nul.
 - Pollution : Les chaufferies biomasse possèdent l'inconvénient de produire des particules fines lors du processus de combustion et représente ainsi un potentiel risque nocif pour la santé.
 - Problématiques liées au foncier : L'espace doit être suffisant pour que les camions puissent manœuvrer et déposer le bois dans les silos.
 - Perspectives de subvention réduites.

– Présentation des scénarios

A partir des possibilités de production renouvelables de chaleur (géothermie et biomasse), sont proposés 6 scénarios. Les trois premiers sont des déclinaisons du scénario 1. Ces déclinaisons sont différentes du point de vue de la source de production priorisée. L'ensemble des scénarios sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

Scénarii	Energies valorisées
1.0	Biomasse (tous les secteurs raccordés)
1.1	Géothermie + biomasse (tous les secteurs raccordés)
1.2	Géothermie (tous les secteurs raccordés)
2	Biomasse (tous les secteurs sauf école Sarraill raccordés)
3	Biomasse (tous les secteurs sauf collège Eureka)
4	Biomasse (secteur principale et zone industrielle raccordés)

Figure 15 : Détail des énergies valorisées pour chaque scénario

Les scénarios 2, 3 et 4 n'ont pas de déclinaison car on estime que les potentiels avantages/inconvénients de chaque déclinaison par rapport à celle de base (uniquement biomasse) seront proportionnels.

Pour chaque scénario sont présentés la monotone et le mix énergétique.

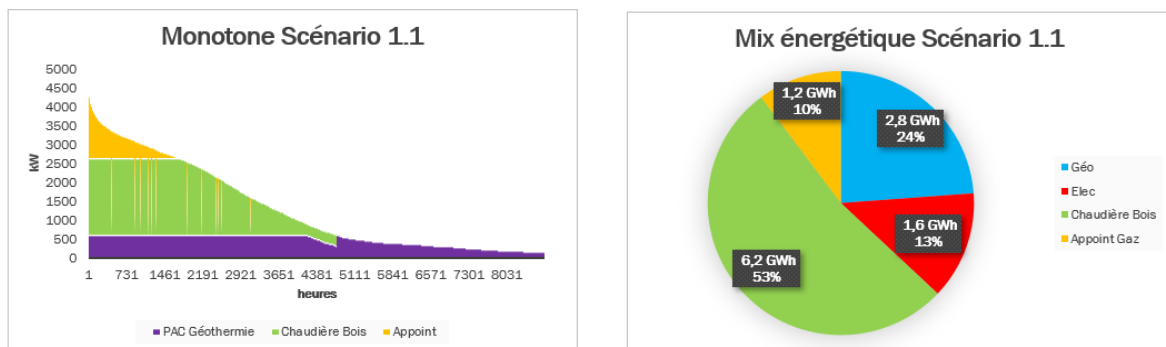


Figure 16 : Monotone et mix énergétique du scénario 1.1

L'étude abouti aux tableaux synthèses suivants :

	Scénario 1			Scénario 2	Scénario 3
	1	1.1	1.2		
Périmètre	Complet	Complet	Complet	Sauf école Sarrail	Sauf collège Eureka
-	Biomasse	Géothermie - Biomasse	Géothermie	Biomasse	Biomasse
Débit	-	79 m³/h	400 m³/h	-	-
Taux ENR	87 %	76 %	63 %	92 %	92 %
Emission de CO2	586 t/CO2	582 t/CO2	466 t/CO2	418 t/CO2	388 t/CO2
Poids CO2	50 g/kWh	38 g/kWh	8 g/kWh	39 g/kWh	37 g/kWh

	Scénario 4	Scénario 5		Scénario 6
		Phase 1	Phase 2	
Périmètre	Principal + Zone industrielle	Uniquement secteur principal	Complet	Uniquement secteur principal
-	Biomasse	Biomasse	Biomasse	Biomasse
Débit	-	-	-	-
Taux ENR	96 %	88 %	87 %	88 %
Emission de CO2	268 t/CO2	254 t/CO2	586 t/CO2	254 t/CO2
Poids CO2	29 g/kWh	49 g/kWh	50 g/kWh	49 g/kWh

Figure 17 : Tableau synthèse des scénarios

Ce tableau permet de synthétiser l'ensemble des scénarios. Dans le cas d'un tel projet, on cherche à atteindre un taux d'énergies renouvelables autour de 90%. Néanmoins le projet est éligible aux subventions de l'ADEME à partir de 65%.

– Bilan économique

Le bilan économique se découpe en trois parties : l'investissement (CAPEX), les coûts d'exploitation (OPEX), les recettes et une étude de sensibilité à différentes variations de prix.

L'investissement englobe différents postes tels que l'aménagement du terrain, la construction de la chaufferie, les équipements du process, la fourniture et la pose de canalisations ou encore les équipements des sous-stations.

Une partie importante de l'investissement concerne aussi l'estimation des subventions que le projet pourra recevoir de la part du fond chaleur mis en place par l'Etat. Il correspond à environ 30-35% de l'investissement. Pour apporter des fonds propres au départ du projet, un droit de raccordement peut être demandé aux propriétaires des bâtiments raccordés. Il permet de réduire la valeur de l'emprunt qui sera contracté et donc les mensualités.

Les coûts d'exploitation sont souvent appelés P1, P2 et P3. Le P1 est l'achat d'énergie donc les tarifs sont fixés selon les prix actuels du marché. Le P2 concerne les coûts d'entretien et de maintenance du réseau et de la chaufferie (électricité, salaires, impôts, etc...). Le P3 représente les gros coûts d'entretien et de renouvellement du matériel lorsqu'il arrive en fin de vie. A cela sont ajoutées d'autres charges et redevances.

Les recettes générées par le réseau de chaleur sont estimées et aboutissent au calcul du prix moyen du MWh que les abonnés auront à déboursier. Ce prix est délivré TTC avec prise en compte de la TVA et est un des éléments de décisions majeurs puisque si le prix de la chaleur est supérieur à celui d'une production au gaz, le projet n'est pas viable économiquement.

Une étude de sensibilité permet d'évaluer la rentabilité des projets en cas de variations des prix du gaz, de l'électricité ou encore des droits de raccordement. Elle est d'autant plus intéressante que le contexte récent a démontré que les prix de l'énergie sont très instables. Plus le prix du gaz augmente et plus l'intérêt de créer un réseau de chaleur augmente. Chaque scénario possède des niveaux de sensibilité différents au prix du gaz en fonction de la part de gaz dans le mix énergétique du scénario.

L'étude de sensibilité au prix du gaz permet d'obtenir le tableau suivant :

Prix du GAZ	Prix de la chaleur (€TTC) (recalculé pour maintenir un TRI de 7%)									
	Ref GAZ	Scénario 1.0	Scénario 1.1	Scénario 1.2	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5 Phase 1	Scénario 5 Phase 2	Scénario 6
60 €	108 €/MWh	137 €/MWh	160 €/MWh	180 €/MWh	133 €/MWh	130 €/MWh	125 €/MWh	128 €/MWh	146 €/MWh	124 €/MWh
90 €*	144 €/MWh	142 €/MWh	164 €/MWh	181 €/MWh	136 €/MWh	134 €/MWh	127 €/MWh	134 €/MWh	151 €/MWh	128 €/MWh
116 €	175 €/MWh	147 €/MWh	168 €/MWh	181 €/MWh	138 €/MWh	136 €/MWh	128 €/MWh	138 €/MWh	156 €/MWh	133 €/MWh

Tableau 6 : Tableau synthèse de l'étude de sensibilité au prix du gaz

L'étude de sensibilité au prix de l'électricité concerne uniquement les scénarios incluant de la géothermie (puisqu'elle est utilisée dans les pompes à chaleur).

Au final, l'ensemble des points développés dans cette étude de faisabilité permet de dresser le tableau synthèse suivant :

	Scénario 1.0	Scénario 1.1	Scénario 1.2	Scénario 2
Taux EnR	87%	77%	63%	92%
Tonnes CO2 émises (méthode ACV)	586 tonnes	582 tonnes	466 tonnes	418 tonnes
Investissements Etudes + aléas	9 720 000 €	10 510 000 €	10 790 000 €	9 290 000 €
Investissements - Subventions	6 860 800 €	7 911 300 €	8 569 800 €	6 470 800 €
Charges annuelles	690 000 €	782 000 €	1 112 000 €	596 000 €
Prix chaleur € TTC	142 €/MWh	164 €/MWh	181 €/MWh	136 €/MWh
Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5 Phase 1	Scénario 5 Phase 2	Scénario 6
92%	96%	88%	87%	88%
388 tonnes	268 tonnes	230 tonnes	480 tonnes	230 tonnes
9 030 000 €	8 050 000 €	5 260 000 €	5 270 000 €	4 180 000 €
6 218 800 €	5 302 800 €	4 147 680 €	3 523 120 €	3 067 680 €
580 000 €	488 000 €	339 000 €	700 000 €	329 000 €
134 €/MWh	127 €/MWh	134 €/MWh	151 €/MWh	128 €/MWh

Tableau 7 : Tableau synthèse de l'étude de faisabilité

d) Analyse

En résumé, les principaux points de l'analyse partagée au client sont les suivants :

La faisabilité d'un réseau de chaleur sur la commune de Pont-Sainte-Marie est démontrée.

Les scénarios incluant de la **géothermie paraissent assez peu intéressants** (du fait des coûts importants de la chaleur qu'ils permettent d'atteindre). Ils sont également **incertains** techniquement et réglementairement parlant,

Le **scénario 4** est le scénario proposant un **coût de la chaleur minimum**. Cependant, ce scénario n'intègre **aucun bâtiment détenu par la commune** (ce qui peut être problématique car la commune est à l'initiative du projet).

Le **scénario 6** présente un **coût de la chaleur faible** par rapport aux autres scénarios mais ne couvre **que le secteur principal** (soit seulement 50% des bâtiments potentiellement raccordables).

Les **scénarios 1.0, 2 et 3** semblent être **intéressants** puisqu'ils affichent une densité linéaire et un coût final de la chaleur sensiblement proche.

Le **scénario 5** permet de **réduire les risques** en cas de refus de raccordement de certains prospects. En revanche, ce phasage augmente le coût final de la chaleur par rapport au scénario 1.0 (+9 €/MWh),

Finalement, la nature et la typologie peuvent être des éléments de décision pour la mairie de Pont-Sainte-Marie.

e) Bilan

Cette mission a été l'occasion de réaliser une étude de faisabilité en totalité. Elle m'a permis de comprendre l'origine et les premières étapes d'un projet de réseau de chaleur. Un certain nombre de données seront plus finement calculées dans des étapes futures dans le cas où le projet est amené à continuer. Néanmoins, une étude faisabilité conditionne toute la suite du projet. Elle fixe les prospects, imagine le tracé du réseau ou fixe le site d'implantation de la chaufferie par exemple. Si l'étude évalue qu'un projet n'est pas viable, le projet peut être définitivement abandonné. Ainsi, il est essentiel d'avoir un niveau de précision suffisamment important pour ne pas enterrer un projet viable ou au contraire poursuivre un projet qu'il ne serait pas intéressant de réaliser.

La démarche utilisée est habituelle chez S2T. Elle peut se décomposer de la façon suivante :

- Identification des prospects,
- Tracé du réseau,
- Tracé des monotones,
- Calcul des pertes du réseau,
- Définition des mix énergétiques,
- Calcul du bilan économique,
- Rédaction des mémoires techniques et préparation des supports de présentation.

La partie rédactionnelle doit être à la fois précise et pédagogique puisqu'elle s'adresse à des autorités publiques possédant des niveaux de connaissances techniques variables.

Une piste d'amélioration pour ce genre d'étude peut se situer au niveau des rendus. L'analyse de sensibilité telle qu'elle a été réalisée présente comme défaut de ne pouvoir cumuler les variations de prix du gaz avec l'électricité ou les droits de raccordement. Par exemple, lorsque le prix de l'électricité varie, les coûts de la chaleur calculés le sont pour un prix du gaz fixe. Cette partie pourrait être remplacée par un petit module graphique avec différents curseurs. Le commanditaire de l'étude pourrait alors déterminer les coûts de la chaleur selon ses propres critères.

VI. Conclusion

Je tire un bilan très positif de ce stage, car il a été professionnellement enrichissant à bien des égards. Intégrer ce bureau d'étude m'a permis de côtoyer des professionnels hautement compétents et désireux de partager leurs connaissances avec moi. La diversité des missions et des sujets abordés a suscité mon intérêt et a nourri ma curiosité tout au long du stage. Passionné par les enjeux de la sobriété énergétique, j'ai été ravi de pouvoir approfondir mes connaissances techniques au-delà de ce qui avait été vu pendant ma formation.

J'ai aussi mesuré l'impact que peut avoir un ingénieur sur les projets sur lesquels il travaille. J'ai pu voir qu'il est par exemple extrêmement important de prospecter suffisamment sur le nombre de bâtiments qui peuvent être raccordés à un réseau de chaleur ou sur les énergies qui peuvent être valorisées. La viabilité économique du réseau de chaleur étant directement corrélée à ces données, toute négligence peut être la cause d'un abandon total du projet pour de nombreuses années. Au-delà de l'aspect économique, il y a donc une responsabilité écologique.

En outre, j'ai beaucoup appris sur le fonctionnement d'un bureau d'étude, notamment sur la communication avec les clients commanditaires d'études et l'importance de la collaboration dans l'exécution des missions. J'ai également acquis des compétences relationnelles indispensables à un ingénieur, comprenant l'importance de l'entente et de la satisfaction du client pour le succès d'une entreprise. Dans le domaine des réseaux de chaleur où le nombre d'acteurs est relativement restreint, la réputation d'un bureau d'étude joue un rôle décisif dans le nombre et la qualité des projets remportés.

Travailler en région parisienne a été une expérience enrichissante, car les enjeux liés à la sobriété énergétique sont décuplés dans cette agglomération densément peuplée de près de 12 millions d'habitants. Chaque réseau de chaleur représente des dizaines de GWh d'énergie pouvant être économisés en évitant le recours aux énergies fossiles. De plus, cette région abrite de grands data centers et des usines de traitement des eaux usées qui sont des exemples de grands potentiels d'énergie valorisable.

Ce stage a renforcé ma motivation à poursuivre une carrière dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Je suis profondément reconnaissant envers l'équipe du bureau d'étude pour leur accueil chaleureux, leur encadrement attentif et leurs conseils précieux qui ont largement contribué à mon développement professionnel. Je garde un souvenir très positif de cette expérience, et je suis convaincu qu'elle sera un atout précieux dans la suite de ma carrière professionnelle. Je suis déterminé à contribuer activement à la transition énergétique et à œuvrer pour un avenir plus durable.



Figure 18 : Photographie des équipes de S2T lors d'une journée de cohésion

[illegible]

				GAZ		ELECTRICITE		TOTAL		INVESTISSEMENT		CEE
Bat	ref	code	APE	Gain sur gaz (MWh PCI par an)	Gain sur gaz (t/an)	Gain sur électricité (MWhcf)	Gain sur électricité (t/an)	Somme des gains (des gains)	Somme des gains (t/an)	Investissement brut (I)	TRI brut (années)	CEE
Magasin 1	1.1	BAT11	Isolation des murs par l'intérieur (ITI)	56,4 MWh	1128 t	, MWh	0 t	56,4 MWh	1128 t	62 200 t	55,1 ans	11900 t
Magasin 1	1.2	BAT12	Isolation des murs par l'extérieur (ITE)	, MWh	0 t	, MWh	0 t	, MWh	0 t	- t	0,0 ans	
Magasin 1	1.3	BAT13	Isolation des combles perdus	, MWh	0 t	, MWh	0 t	, MWh	0 t	- t	0,0 ans	
Magasin 1	1.4	BAT14	Isolation des terrasses	433,6 MWh	8672 t	, MWh	0 t	433,6 MWh	8672 t	386 400 t	44,6 ans	48 700 t
Magasin 1	1.5	BAT15	Remplacement des fenêtres et portes-fenêtres	, MWh	0 t	, MWh	0 t	, MWh	0 t	- t	0,0 ans	
Magasin 1	1.6	BAT16	Isolation des planchers bas sur extérieur	, MWh	0 t	, MWh	0 t	, MWh	0 t	- t	0,0 ans	
Magasin 1	1.7	BAT17	Isolation des rampants de toiture	, MWh	0 t	, MWh	0 t	, MWh	0 t	- t	0,0 ans	
Magasin 1	1.8	BAT18	Parois polycarbonate	9,1 MWh	183 t	, MWh	0 t	9,1 MWh	183 t	78 400 t	423,5 ans	
Magasin 1	1.9	BAT19	Remplacement portes pleines opaques	,1 MWh	2 t	, MWh	0 t	,1 MWh	2 t	17 000 t	861,5 ans	
Magasin 1	1.3	EMI4	Mise en place de déstratificateur	29,9 MWh	599 t	-6,4 MWh	-356 t	23,6 MWh	243 t	60 700 t	249,7 ans	16 500 t

Energie totale valorisable															Moteur à vapeur				Sortie MAV				Vapeur partie non-à-vapeur valorifiée		Vapeur partie non-à-vapeur non valorifiée	
Débit	Pression	Température	Enthalpie		Production	Débit	Pression	Température	Enthalpie		Consommation	Débit	Pression	Température	Enthalpie											
Mil	0 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	0 k/h	0 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	0 k/h	0 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	0 k/h	0 k/h	0 k/h						
Max	62 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	46556 k/h	16 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1765 k/h	16 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	8740 k/h	3026 k/h	120 k/h						
Somme	160855 t/h				121 GWh	60666 t/h				46 GWh		60666 t/h					34 GWh	12 GWh	4,6							
19/12/2021 15:00	34 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	25422 k/h	8 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	6288 k/h	8 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	4617 k/h	1617 k/h							
19/12/2021 16:00	17 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	12687 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1455 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5434 k/h	2341 k/h							
19/12/2021 17:00	17 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	12866 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1455 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5508 k/h	2245 k/h							
19/12/2021 18:00	9 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	6779 k/h	3 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	876 k/h	3 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	4536 k/h	1570 k/h							
19/12/2021 19:00	16 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	12407 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1445 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5531 k/h	2354 k/h							
19/12/2021 20:00	16 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	12389 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1500 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5543 k/h	2357 k/h							
19/12/2021 21:00	16 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	12000 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1113 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5274 k/h	2385 k/h							
19/12/2021 22:00	16 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	12055 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1124 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5337 k/h	2386 k/h							
19/12/2021 23:00	19 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	14161 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	1133 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5264 k/h	2381 k/h							
20/12/2021 00:00	24 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	18053 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	14173 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5522 k/h	2350 k/h							
20/12/2021 01:00	24 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	17953 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	14422 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5484 k/h	2357 k/h							
20/12/2021 02:00	27 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	20360 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	15336 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5465 k/h	2331 k/h							
20/12/2021 03:00	26 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	19748 k/h	5 t/h	31 bar	236 °C	2710 kJ/kg	754 kJ/h	14602 k/h	5 t/h	15 bar	107 °C	2015 kJ/kg	560 kJ/h	5470 k/h	2332 k/h							
20/12/2021 04:00																										

30

Pont Sainte Marie - Dimensionnement			Delta T primaire							mode	
on le fichier : "Tracé de réseau_XXX"			30							fonctionnement	
sens ALLER			sens ALLER								
Nom Sous-Station (Quartier) / Nom Tronçon	Nœud amont (ou nœud de raccordement si bâtiment)	Nœud aval	Puissance maximale appelée [kW]	Puissance [W]	Débit hors foisonnement [m3/h]	Débit hors foisonnement [l/s]	Facteur de foisonnement	Débit max [L/s] (par NIVEAU de bâtiment)	Débit foisonné [m3/h]	Débit max par bâtiment = BRANCHEMENTS	DN suggéré
CNAMTS Troyes	B1N1		170	170 073	4,9	1,36	1,00	1,36	4,9	1,36	DN 50
CFA Auto/Interpro	B1N1		678	678 015	19,5	5,41	1,00	5,41	19,5	5,41	DN 100
			0	0	0,0	0,00	0	0,00	0,0	0,00	7
3	B1N2	B1N1	848	848 088	24,4	7	0,95	6,43	23,2	6,43	DN 100
CFA BTP	B1N2		330	329 553	9,5	2,63	1,00	2,63	9,5	2,63	DN 65
			0	0	0,0	0,00	0	0,00	0,0	0,00	7
5	B1N3	B1N2	1178	1177 641	33,8	9	0,95	8,93	32,1	8,93	DN 100
Rakon/Greenwheel	B1N3		199	198 821	5,7	1,59	1,00	1,59	5,7	1,59	DN 50
			0	0	0,0	0,00	0	0,00	0,0	0,00	7
7	B1N4	B1N3	1376	1376 462	39,6	11	0,95	10,44	37,6	10,44	DN 100
AFPA	B1N4		477	476 883	13,7	3,81	1,00	3,81	13,7	3,81	DN 80
			0	0	0,0	0,00	0	0,00	0,0	0,00	7
9	B1N12	B1N4	1853	1853 344	53,3	15	0,95	14,05	50,6	14,05	DN 125
			0	0	0,0	0,00	0	0,00	0,0	0,00	7
						0,70					

Annexe 4 : Fichier de dimensionnement de chaque portion du réseau de chaleur



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Baptiste Berthillot
2022-2023

Intitulé : Développement de réseaux de chaleur, énergies renouvelables et efficacité énergétique des bâtiments

Résumé :

Au sein du département énergie d'un bureau d'étude de région parisienne, j'ai réalisé mon stage de fin d'étude dans le domaine des performances énergétiques des bâtiments et des réseaux de chaleur. Directement intégré à des missions dans leur totalité, j'ai pu bénéficier d'une grande autonomie avec l'appui et les conseils d'ingénieurs qualifiés. Les missions auxquelles j'ai pu contribuer portent sur des infrastructures de grande dimension avec des gisements d'énergie fatale importants. Les sujets abordés ont été variés mais j'ai pu pleinement voir toutes les étapes de la phase étude de la création d'un réseau de chaleur. De l'étude d'opportunité jusqu'au dimensionnement dynamique d'une centrale de production de chaleur, la transversalité des missions s'est révélée particulièrement intéressante.

Mots Clés : Réseaux de chaleur, performances énergétiques, valorisation de chaleur fatale, étude de faisabilité, énergies renouvelables

S2T Ingénierie
2 Rue de Troyon, Sèvres 92310

Tuteur entreprise :
Anthony Dumoulin, Directeur Département Energie

Tuteur académique :
Mindjid Maizia