
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Stage Ingénieur en efficacité énergétique industrielle et ENR et réseaux de chaleur

Ferest Energies

199 rue Colbert, Bâtiment Namur, 3^{ème} étage, 59000 Lille



Tuteur entreprise :
Laurent Delannoy
Responsable de production

Tuteur académique :
Mindjid Maizia

Raphaël Reichman
IUT
2024-2025

Remerciements

Je souhaite débiter ce rapport en adressant mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont accompagné tout au long de ce stage de fin d'étude. Leur soutien et leur disponibilité ont été essentiels à la réussite de cette expérience.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à M. Laurent Delannoy, responsable de production chez Ferest Énergies et tuteur de mon stage. Son accueil chaleureux et son implication ont grandement facilité mon intégration au sein de l'entreprise. Dès les premiers jours, il m'a accordé sa confiance, me confiant progressivement des responsabilités plus importantes sur différents projets. Grâce à sa disponibilité et à ses conseils avisés, j'ai pu développer mes compétences professionnelles tout en contribuant activement aux missions qui m'étaient confiées. Cette progression encadrée et bienveillante a été pour moi une source de motivation et d'apprentissage.

Je tiens également à remercier M. Titouan Devermeille, ingénieur d'études chez Ferest Énergies, pour sa générosité dans le partage de ses connaissances techniques et sa capacité à m'orienter efficacement dans mon travail. Il m'a intégré pleinement dans l'organisation et la répartition des tâches des projets dont il assurait la responsabilité, me considérant au même titre que les autres ingénieurs d'études. Cette reconnaissance professionnelle m'a permis de mieux comprendre le fonctionnement concret de la gestion de projet et de m'impliquer pleinement dans les différentes missions.

Mes remerciements vont aussi à Mme Cassandra Hénin, ingénieure diplômée de Polytech et ingénieure d'études chez Ferest Énergies. J'ai eu l'opportunité de collaborer étroitement avec elle sur un projet central à mon stage, ce qui m'a permis de bénéficier de son expertise technique et de son sens du travail en équipe. Elle a consacré un temps conséquent à travailler avec moi en coopération, répondant à mes interrogations et me guidant dans la réalisation de nos tâches communes. Sa confiance et la montée en responsabilités qu'elle m'a offerte au fil du stage ont largement contribué à mon apprentissage et à mon autonomie.

Enfin, je souhaite remercier l'ensemble des ingénieurs de Ferest Énergies pour leur disponibilité, leur esprit d'entraide et la coopération constante qui règne au sein de l'équipe. Leur ouverture et leur volonté de partager leurs connaissances ont créé un environnement de travail motivant et constructif, dans lequel j'ai pu évoluer sereinement et apprendre chaque jour.

Table des matières

I - Glossaire.....	5
II - Introduction	6
III - Présentation de l'entreprise	7
IV - Présentation des missions	9
A) Résumé des tâches réalisées.....	9
B) Présentation du déroulé de la mission	10
1) Etude de faisabilité de mise en œuvre d'ENR.....	10
2) Schéma directeur de réseau de chaleur	22
V - Retour réflexif sur le stage.....	28
VI - Bibliographie	29

Table des Figures

Figure 1 : Cartobulle de la Mairie et de l'Ecole de Bouvines	12
Figure 2 : Monotone horaire de la Mairie et de l'Ecole de Bouvines	14
Figure 3: Dimensionnement d'une production de chaleur ENR	15
Figure 4 : Couverture d'une pompe à chaleur géothermique	17
Figure 5 : Couverture de deux pompes à chaleur géothermiques en parallèle	17
Figure 6 : Schéma de principe de l'installation géothermique	18
Figure 7 : Schéma hydraulique du local PAC	19
Figure 8 : Réseau de chaleur existant de Béthune	22
Figure 9 : Cartobulle de la commune de Bruay-la-Buissière	24
Figure 10 : Tableau des gisements basse température de la commune de Lillers	26
Figure 11 : Tableau des gisements haute température de la commune de Lillers	26

I - Glossaire

ENR&R = Energies Renouvelables et de Récupération

RCU = Réseau de Chaleur Urbain

ACT = Assistance à la passation des Contrats de Travaux

MEL = Métropole Européenne de Lille

CHG = Chauffage

ECS = Eau Chaude Sanitaire

W = Watt

Wh = Wattheure

PAC = Pompe A Chaleur

PID = Piping and Instrumentation Diagram

TRI = Temps de Retour sur Investissement

CABBALR = Communauté d'Agglomération de Béthune Bruay Artois Lys Romane

ml = mètre linéaire

SDIS = Service Départemental d'Incendie et Secours

II - Introduction

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment est responsable de 39 % des émissions mondiales de carbone liées à l'énergie : 28 % proviennent des émissions opérationnelles, c'est-à-dire de l'énergie nécessaire pour les chauffer, les refroidir et les alimenter en électricité (World Green Building Council, 2025). En France, le bâtiment représentait environ 23 % des émissions totales en 2022, principalement liées à la consommation énergétique des bâtiments (Ministères Aménagement du Territoire Transition Écologique, 2022). Ces chiffres soulignent à quel point ce secteur est un levier essentiel pour réduire les émissions à l'échelle mondiale.

D'après l'ONU, « les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous » (United Nations, 2025). Elles regroupent des sources de production durable et décarbonée telles que la géothermie, la biomasse ou le solaire thermique. Elles incluent également les énergies de récupération : « Énergie récupérée lors d'un processus dont la fonction principale n'est pas la production de cette énergie » (Ministère de la Culture, 2023). La chaleur produite, par exemple, par les data centers ou certains procédés industriels peut être récupérée et réutilisée. Cette valorisation d'une énergie qui serait autrement perdue contribue directement à l'efficacité énergétique, tout en évitant la production d'émissions supplémentaires.

Parallèlement, « un réseau de chaleur est un système de distribution de chaleur produite de façon centralisée, permettant de desservir plusieurs usagers. Il comprend une ou plusieurs unités de production de chaleur, un réseau de distribution primaire dans lequel la chaleur est transportée par un fluide caloporteur, et un ensemble de sous-stations d'échange, à partir desquelles les bâtiments sont desservis par un réseau de distribution secondaire » (Ministères Aménagement du Territoire Transition Écologique, 2025).

Ces solutions sont complémentaires et particulièrement pertinentes, puisqu'elles permettent de remplacer les énergies fossiles par des sources locales et renouvelables, tout en assurant une distribution optimisée grâce à la mutualisation de la production. Elles contribuent ainsi à réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre, tout en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments, qu'ils soient tertiaires, résidentiels ou industriels.

Les bureaux d'études en énergétique jouent un rôle central dans la conception et la mise en œuvre de ce type de projets de transition énergétique. Leur expertise permet d'évaluer la faisabilité technique et économique des installations ENR&R, de dimensionner les équipements, d'intégrer les contraintes réglementaires et économiques, d'assister les maîtres d'ouvrage dans les décisions, et de garantir la pertinence et la rentabilité des projets. Leur posture technique, neutre et objective est un gage de confiance pour les collectivités et les entreprises.

Ce stage a été réalisé au sein du pôle Industrie / ENR&R et réseaux de chaleur du bureau d'études Ferest Énergies, et m'a permis de participer activement à des missions concrètes de déploiement de solutions durables dans des contextes industriels et territoriaux.

III - Présentation de l'entreprise

Ferest Energies est un bureau d'études et de conseil en ingénierie énergétique, fondé en 1999, œuvrant dans le domaine de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Basée sur une expertise technique solide et une approche transversale des problématiques énergétiques, l'entreprise intervient auprès d'une clientèle variée — collectivités, établissements de santé, acteurs industriels, bailleurs sociaux, entreprises tertiaires — afin de concevoir, optimiser et piloter des solutions sur mesure. Organisée en trois pôles complémentaires, Ferest Energies s'appuie sur une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs d'étude, d'assistants juridiques et d'un dessinateur projeteur pour assurer un accompagnement complet, de l'étude préliminaire jusqu'au suivi opérationnel des projets.

Le pôle Bâtiment & Santé concentre ses activités sur l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, qu'il s'agisse de constructions neuves, de rénovations lourdes ou d'optimisations ciblées. Dans ce cadre, l'équipe prend en charge des missions allant de l'audit énergétique initial à la maîtrise d'œuvre complète des travaux, en passant par l'assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO). Les projets menés visent souvent des objectifs ambitieux en matière de performance environnementale, tels que la conformité aux labels BBC, HQE, Bâtiment Passif ou encore Bâtiment à Énergie Positive. Une part importante des interventions concerne les établissements de santé, où la maîtrise de la consommation énergétique se combine à des exigences de continuité de service et de confort pour les usagers. Dans ce contexte, les ingénieurs du pôle réalisent des audits détaillés, identifient des pistes d'amélioration techniques et financières, et conçoivent des solutions adaptées aux contraintes spécifiques du milieu hospitalier. Les projets peuvent ainsi inclure la modernisation des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC), la mise en place d'équipements de production d'énergie renouvelable, ou encore l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments. L'accompagnement se poursuit généralement jusqu'à la phase de suivi de chantier, garantissant la conformité des travaux aux prescriptions initiales et l'atteinte des performances visées.

Le pôle Industrie / ENR & Réseaux de Chaleur occupe une place centrale dans l'offre de Ferest Energies, en intervenant sur des projets d'envergure technique élevée. L'équipe réalise des diagnostics énergétiques approfondis dans le secteur industriel, élabore des schémas directeurs et conduit des études de faisabilité intégrant les dimensions technico-économiques, réglementaires et environnementales.

L'expertise couvre un large spectre de solutions : réseaux urbains de chaleur et de froid, chaufferies biomasse, géothermie, hydrothermie, thalassothermie, méthanisation, cogénération, solaire thermique ou encore valorisation de chaleur fatale. L'objectif est d'identifier, dimensionner et mettre en œuvre des installations optimisées, fiables et durables.

Pour les réseaux de chaleur, Ferest Energies prend en charge toutes les étapes : analyse des besoins thermiques, conception du réseau, choix des équipements, planification de l'implantation, consultation des entreprises, suivi de la réalisation et mise en service. L'intégration des énergies renouvelables et de récupération est au cœur de cette démarche, afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer l'indépendance énergétique des territoires. Cette capacité à combiner compétences industrielles, connaissances des ENR et maîtrise des réseaux en fait un pôle stratégique pour la transition énergétique de clients publics et privés.

Le pôle Commercial joue un rôle essentiel dans le développement et la pérennité de l'activité de Ferest Energies. Composé de profils à la fois techniques tels que des ingénieurs d'affaires et orientés relation client, ce pôle est chargé d'identifier de nouvelles opportunités de mission, de construire des partenariats durables et de répondre aux appels d'offres. Sa mission ne se limite pas à la prospection : il s'agit également de comprendre en profondeur les besoins des clients, d'évaluer la faisabilité des projets en amont et de définir les contours des prestations proposées.

Le pôle assure le lien entre les attentes du client et les capacités techniques de l'entreprise. Il prépare et structure les premières phases de mission — étude d'opportunité, étude de faisabilité, avant-projet sommaire (APS) et avant-projet détaillé (APD) — en collaboration avec les équipes d'ingénierie. Cette interface garantit que chaque projet est lancé sur des bases solides, avec un dimensionnement adapté aux objectifs et aux contraintes. Une fois les études validées, le pôle Commercial accompagne également la passation des contrats de travaux, en veillant à ce que le choix des prestataires réponde aux critères techniques, budgétaires et calendaires fixés par le client. Cette approche intégrée permet à Ferest Energies de rester réactif, compétitif et orienté vers la satisfaction client, tout en alimentant en continu le portefeuille de projets de l'entreprise.

L'organisation en trois pôles permet à Ferest Energies de couvrir l'ensemble de la chaîne de valeur d'un projet énergétique, depuis l'idée initiale jusqu'à la réalisation et au suivi de l'ouvrage. Cette transversalité favorise les échanges de compétences en interne, crée des synergies entre les expertises bâtiment, industrie et commerciale, et permet d'offrir aux clients des solutions globales et cohérentes. Grâce à cette structuration et à un savoir-faire accumulé depuis plus de vingt ans, Ferest Energies s'impose comme un partenaire fiable et innovant pour accompagner la transition énergétique des bâtiments, des industries et des territoires.

IV - Présentation des missions

A) Résumé des tâches réalisées

Parmi l'ensemble des prestations proposées par Ferest Énergies, deux missions principales ont marqué ce stage : l'étude de faisabilité pour la mise en œuvre d'énergies renouvelables (ENR), et l'élaboration d'un schéma directeur de réseau de chaleur. Ces missions, menées en équipe avec différents ingénieurs et chefs de projet, ont permis d'aborder des problématiques variées, allant de la phase de conception stratégique jusqu'aux aspects organisationnels et économiques. Elles ont constitué une opportunité d'acquérir à la fois une vision globale des projets énergétiques et une compréhension fine de certaines étapes clés de leur développement.

L'étude de faisabilité de mise en œuvre d'ENR est une phase essentielle dans la préparation d'un projet visant à intégrer des énergies renouvelables dans un bâtiment, un site industriel ou un territoire. Elle consiste à analyser de manière approfondie les différentes solutions techniques possibles (biomasse, géothermie, solaire photovoltaïque ou thermique, méthanisation, etc.) et à en évaluer la pertinence en fonction du contexte. Cette analyse prend en compte de nombreux paramètres : disponibilité et accessibilité des ressources locales, contraintes d'implantation, compatibilité avec les installations existantes, estimation des coûts d'investissement et d'exploitation, potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que les aides financières mobilisables. Elle permet de calculer les coûts d'investissements, les charges d'exploitation et d'en déduire le temps de retour sur investissement pour différents scénarios. Le résultat de l'étude permet de déterminer la solution la plus adaptée, de dimensionner les équipements nécessaires et de valider la viabilité économique et environnementale du projet avant d'engager des investissements.

Le schéma directeur de réseau de chaleur est un outil stratégique qui joue un rôle clé dans l'aménagement énergétique d'un territoire. Il permet de planifier, sur le moyen et le long terme, le développement, l'optimisation et la modernisation d'un réseau de chaleur en tenant compte à la fois des besoins énergétiques et des contraintes locales. Ce document ne se limite pas à un simple état des lieux technique : il s'inscrit dans une véritable démarche d'aménagement du territoire, en identifiant les zones prioritaires à raccorder, les perspectives d'extension vers de nouveaux quartiers ou zones d'activités, et les opportunités de valorisation des ressources énergétiques locales, qu'elles soient renouvelables ou de récupération (géothermie, biomasse, chaleur fatale industrielle, etc.).

Dans cette optique, le schéma directeur constitue un support de décision pour les collectivités et les maîtres d'ouvrage, qui peuvent ainsi intégrer la dimension énergétique dans leurs politiques urbaines et leurs plans d'urbanisme. Il favorise la cohérence entre les projets de construction ou de rénovation et les infrastructures énergétiques existantes, tout en maximisant la part d'énergies renouvelables et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. La méthodologie de réalisation d'un tel schéma inclut des relevés et inventaires des consommateurs actuels et futurs, des simulations de fonctionnement hydraulique et thermique, ainsi que l'évaluation technico-économique de différents scénarios de développement. En ce sens, il s'agit d'un outil de pilotage territorial, qui relie directement les choix techniques aux objectifs environnementaux et aux orientations d'aménagement à long terme.

B) Présentation du déroulé de la mission

1) Etude de faisabilité de mise en œuvre d'ENR

a) Contexte du projet

Pour illustrer de manière concrète le déroulement d'une mission d'étude de faisabilité technico-économique réalisée au cours de ce stage, il est pertinent de présenter le cas de l'étude menée pour la commune de Bouvines. Cette mission avait pour objet d'évaluer la possibilité de mettre en œuvre une installation géothermique destinée à assurer le chauffage de deux bâtiments municipaux : la mairie de Bouvines et l'école primaire Léonard de Vinci, située à proximité immédiate.

Bouvines est une petite commune intégrée à la Métropole Européenne de Lille (MEL), territoire sur lequel est également implanté le siège du bureau d'études Ferest Energies. Cette proximité géographique facilitait les échanges et les visites de site. La demande de la municipalité est née d'un besoin concret : la chaudière gaz de la mairie, vieillissante et défaillante, nécessitait un remplacement à court terme. Dans ce contexte, les élus ont souhaité envisager une alternative plus durable et moins émettrice de gaz à effet de serre que la simple installation d'une nouvelle chaudière fossile.

L'étude a donc porté sur l'opportunité de créer un système de géothermie capable de desservir à la fois la mairie et l'école primaire, reliées par un **réseau technique**. Ce type de réseau se distingue d'un réseau de chaleur public par le fait qu'il relie uniquement des bâtiments appartenant à un même maître d'ouvrage ; dans ce cas précis, la commune. Il ne s'agit donc pas d'un service public de distribution de chaleur avec facturation aux différents usagers, mais d'un réseau interne exploité directement par le propriétaire des bâtiments, pour sa propre consommation. Ce mode de fonctionnement simplifie la gestion, en mutualisant la production.

De plus, la mission comprend également un volet consacré aux propositions de rénovation énergétique des deux bâtiments concernés, la mairie et l'école primaire Léonard de Vinci, afin de répondre aux exigences réglementaires du **décret tertiaire**. Ce dispositif, issu de la loi ÉLAN et entré en vigueur en octobre 2019, impose à l'ensemble des bâtiments tertiaires de plus de 1 000 m² de surface de plancher de réduire progressivement leur consommation énergétique finale : -40 % d'ici 2030, -50 % d'ici 2040 et -60 % d'ici 2050, par rapport à une année de référence située entre 2010 et 2019.

Dans le cadre de cette mission, l'intégration de travaux de rénovation énergétique poursuit un double objectif. D'une part, elle permet d'aligner les performances des bâtiments avec les obligations réglementaires et les politiques publiques de transition énergétique. D'autre part, elle contribue à réduire de manière significative les consommations de chauffage, ce qui a un impact direct sur le dimensionnement des futures installations de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables (ENR). En effet, moins les besoins en énergie sont élevés, plus la puissance requise de l'installation est faible, ce qui permet de réduire le coût d'investissement initial tout en optimisant les performances globales du système.

Ce projet mobilise donc deux compétences distinctes au sein de Ferest Énergies : le pôle Bâtiment et Santé, en charge de l'analyse des performances énergétiques actuelles et de la définition des travaux de rénovation nécessaires, et le pôle Industrie/ENR/Réseaux de chaleur, qui se concentre sur l'étude technique et économique de la solution géothermique. Ce travail en parallèle assure une

cohérence entre la réduction des besoins énergétiques et la conception de l'outil de production, garantissant ainsi la pertinence et la viabilité du projet à long terme.

Chaque projet débute systématiquement par une réunion de démarrage couplée à une **visite technique sur site**. Cette étape initiale revêt une importance particulière car elle conditionne la bonne orientation de l'ensemble de l'étude. La réunion de démarrage a pour objectif principal de présenter au maître d'ouvrage la méthodologie de travail qui sera appliquée tout au long du projet. C'est également le moment d'établir un planning prévisionnel précisant les dates clés et les échéances de remise des différents livrables (notes intermédiaires, rapport final, présentations orales). Enfin, cette réunion permet surtout de clarifier et de comprendre précisément les attentes du client, ses priorités, ses contraintes techniques ou budgétaires, et ses éventuelles orientations stratégiques. Un échange approfondi à ce stade permet de prévenir tout risque de mauvaise interprétation et d'éviter que l'étude ne s'écarte des objectifs fixés.

La visite sur site qui suit la réunion est consacrée à un relevé d'informations techniques indispensable à la fiabilité de l'étude. Une attention particulière est portée aux circuits hydrauliques des chaufferies afin d'identifier les modalités techniques pour raccorder un futur système de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables (ENR) telles que la géothermie ou la biomasse. L'examen porte également sur le type d'émetteurs de chaleur en place (radiateurs haute ou basse température, planchers chauffants, ventilo-convecteurs) car certaines technologies ENR, en particulier la géothermie, imposent des contraintes de régime de température qui doivent être compatibles avec les systèmes existants. De manière plus générale, la visite a pour but de collecter un maximum de données complémentaires à celles déjà transmises par le client : dimensions des locaux techniques, état du bâti, performances énergétiques des équipements, conditions d'implantation, ou encore éventuelles contraintes réglementaires. Ces observations directes, croisées avec les documents fournis, constituent la base solide sur laquelle sera construite l'analyse technico-économique du projet.

b) Phase 1 du projet

Chez Ferest Énergies, la réalisation d'une étude de faisabilité est organisée en deux phases distinctes, chacune ayant des objectifs précis et complémentaires.

La phase 1 consiste à établir un diagnostic initial permettant de déterminer la pertinence technique et économique d'un projet de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables. Cette première étape commence par l'analyse des besoins en chauffage des bâtiments concernés. Dans le cas étudié ici, la mairie et l'école primaire de Bouvines étaient toutes deux chauffées au gaz naturel. L'évaluation des besoins a donc été réalisée à partir de l'analyse des factures de gaz pour chacun des bâtiments. Ces besoins de chauffage sont représentés à l'aide d'une cartographie QGIS pour pouvoir être présentés lors des réunions clients.

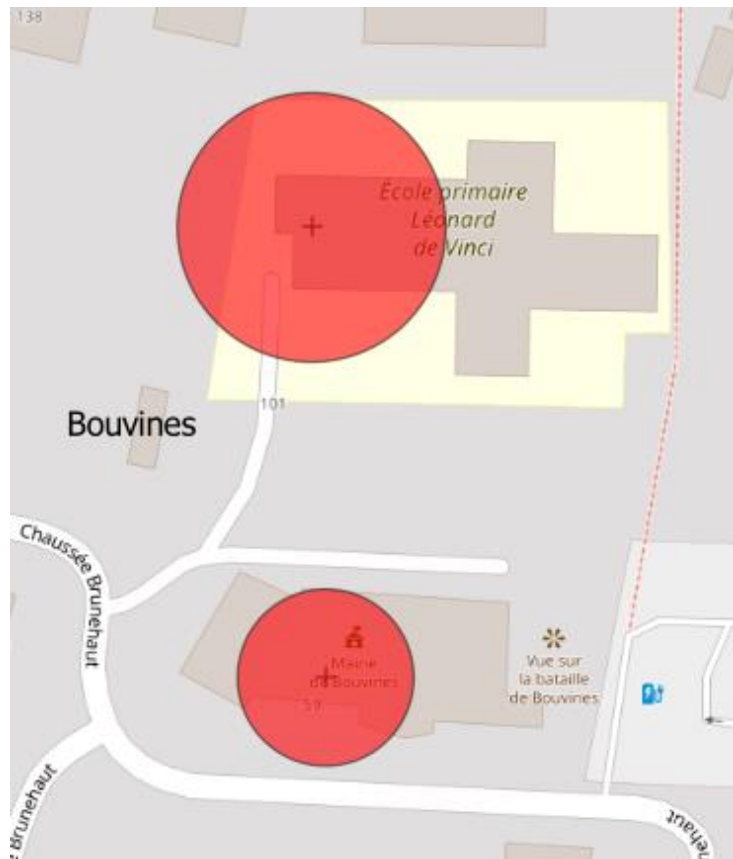


Figure 1 : Cartobulle de la Mairie et de l'Ecole de Bouvines

Une cartobulle est un outil de représentation cartographique qui permet de visualiser les consommations énergétiques des bâtiments étudiés. Chaque bulle correspond à un bâtiment, son centre étant positionné sur l'emplacement exact de la chaufferie, tandis que son rayon est proportionnel à la consommation annuelle d'énergie du bâtiment concerné. Plus la bulle est grande, plus la consommation est élevée. Dans l'exemple présent, le projet ne concerne que deux bâtiments : la mairie et l'école primaire de Bouvines qui possèdent respectivement une consommation annuelle de 43 MWh et de 56 MWh. Cette différence s'explique principalement par un taux d'occupation plus important dans l'école, impliquant une utilisation plus élevée du chauffage.

Cette cartobulle est ici relativement simple compte tenu du faible nombre de bâtiments. En revanche, sur des projets d'envergure plus importante, par exemple à l'échelle d'un quartier ou d'une ville entière, les bulles permettent d'identifier les zones à forte densité énergétique. Ces zones constituent des cibles prioritaires pour le raccordement à un futur réseau de chaleur, car elles offrent un potentiel de mutualisation des besoins. Plus loin dans ce rapport, nous présenterons un exemple de cartobulle appliqué à l'échelle d'une ville entière, illustrant son utilité dans la planification énergétique territoriale.

En parallèle, la phase 1 comprend également une étude de gisement propre au territoire où se situe le projet. L'objectif est de déterminer quelles ressources énergétiques renouvelables disponibles localement (géothermie, biomasse, solaire thermique, récupération de chaleur fatale) sont les plus adaptées pour répondre aux besoins énergétiques identifiés. Dans le cadre du projet de Bouvines, l'orientation vers la géothermie avait été précisée dès le début par le maître d'ouvrage, ce qui a limité la nécessité d'examiner de manière approfondie les autres filières énergétiques. Nous présenterons plus tard dans ce rapport une étude de gisement plus exhaustive et détaillée pour un autre projet.

L'étude géothermique a été confiée au cabinet d'hydro-géologie EGEE – STRATEGEO, un bureau d'études indépendant spécialisé dans l'exploration et l'exploitation des ressources en eau souterraine et en énergie géothermique avec qui Ferest travaille en partenariat sur de nombreux projets de géothermie. Ce cabinet intervient sur l'ensemble du territoire national pour évaluer le potentiel géologique et hydrogéologique d'un site en s'appuyant sur des données disponibles issues de bases de données publiques, d'anciens forages et d'analyses cartographiques. Dans le cas présent, EGEE – STRATEGEO a étudié la faisabilité de la mise en place d'un système géothermique en fonction des caractéristiques du sous-sol local. Si les résultats de l'étude technico-économique s'avèrent positifs et que la commune valide la solution, un forage d'essai sera réalisé pour confirmer la viabilité du projet.

Enfin, la phase 1 intègre une étude macro des différents scénarios techniques envisageables. L'objectif est de proposer au client plusieurs options, avec une estimation préliminaire de leurs coûts d'investissement et de fonctionnement, ainsi que de leurs performances énergétiques. Sur la base de cette analyse, le maître d'ouvrage peut sélectionner les scénarios les plus pertinents et les plus conformes à ses attentes. Ces scénarios retenus font alors l'objet d'une phase 2 plus détaillée, au cours de laquelle une étude technico-économique approfondie est réalisée afin de définir précisément la solution à retenir. Pour ce projet, l'arbitrage de phase 1 a porté sur le choix des scénarios de rénovation des bâtis afin de déterminer la consommation future qui permettra de dimensionner les équipements de production de chaleur.

Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Peu coûteux, faible réduction de la consommation.	Moyennement coûteux, réduction moyenne de la consommation.	Très coûteux, forte réduction de la consommation.

Le choix du scénario de rénovation, guidé par la présentation des résultats de l'étude macro-économique, permet d'engager la phase 2, laquelle aboutira aux résultats technico-économiques détaillés du projet.

c) Phase 2 du projet

La première étape de la phase 2 consiste à affiner de manière plus précise l'analyse des besoins en chauffage des bâtiments étudiés. Cette étape est cruciale, car la viabilité technico-économique d'un projet utilisant des énergies renouvelables (ENR) ne se mesure pas uniquement en fonction de la quantité totale d'énergie produite sur l'année, mais surtout en fonction du taux de couverture dans le temps. En effet, dans la majorité des projets de grande envergure, notamment lorsqu'ils concernent plusieurs bâtiments, il est rare que l'ENR puisse couvrir 100 % des besoins de chauffage tout au long de l'année. L'objectif n'est donc pas de maximiser la production annuelle, mais plutôt d'optimiser la correspondance entre la production et la demande à chaque instant, afin d'assurer un approvisionnement le plus constant possible.

Pour évaluer ce taux de couverture, on modélise les appels de puissance de chauffage en kW heure par heure sur une année complète. Le résultat de cette modélisation prend la forme d'un profil de consommation appelé "monotone horaire". Ce concept fait écho aux méthodes étudiées dans le cadre du module RESEAU en quatrième année d'école d'ingénieur : dans un premier temps, on estimait seulement la consommation énergétique annuelle, puis on la dynamisait en répartissant cette consommation sur chaque heure de l'année afin d'obtenir une vision temporelle des besoins.

Dans le cadre du présent projet, la monotone horaire a été établie à partir de la moyenne des températures extérieures observées sur les dix dernières années, soit de 2013 à 2023 (les données horaires de température n'étant disponibles que jusqu'à cette dernière année au moment de l'étude). L'utilisation de cette moyenne permet de créer une année de référence climatique, servant de base pour répartir la consommation annuelle connue, déterminée au préalable grâce à l'analyse des factures de gaz, sur les différentes heures de l'année.

Cette répartition prend également en compte les profils types de consommation en fonction de la nature et de l'usage des bâtiments. Par exemple, la mairie est assimilée à un bâtiment de type "bureaux", tandis que l'école présente un profil particulier, intégrant notamment les périodes d'inoccupation liées aux vacances scolaires. Cette approche garantit que la modélisation reflète fidèlement la réalité des usages, et permet ainsi de déterminer un profil horaire représentatif.

Le résultat final de ce travail est un profil de consommation détaillé qui servira de base à la suite de l'étude, et notamment au dimensionnement de l'installation ENR pour atteindre le meilleur compromis entre performance énergétique et viabilité économique.

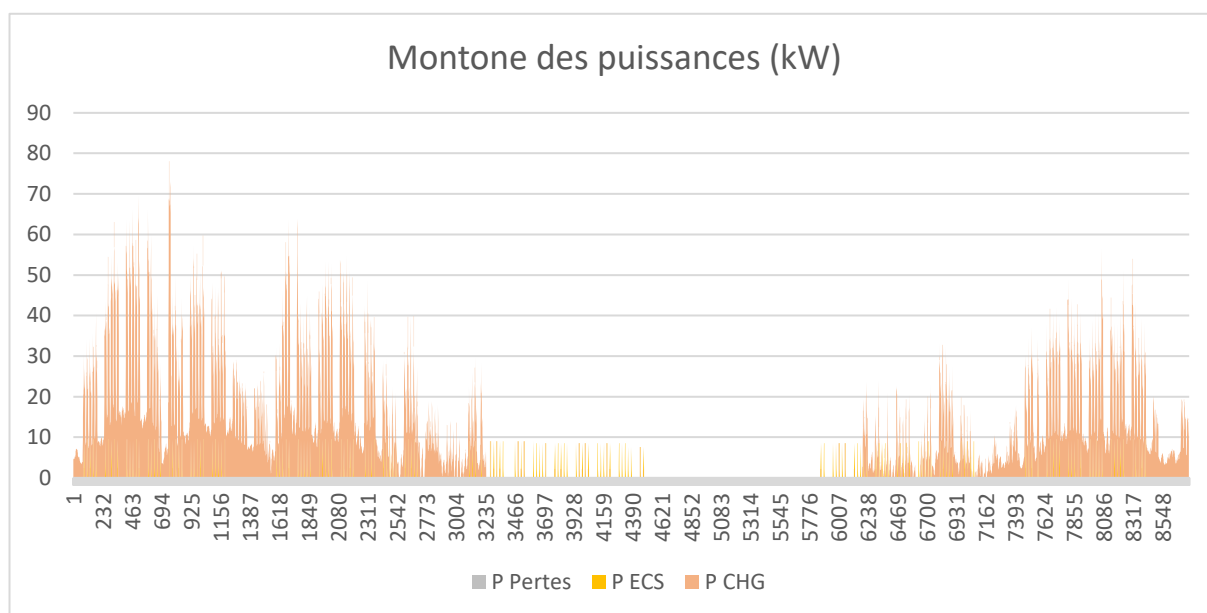


Figure 2 : Monotone horaire de la Mairie et de l'Ecole de Bouvines

Ce profil de consommation reflète la somme des besoins en chauffage de la mairie de Bouvines et de l'école Léonard de Vinci en temps réel. On constate que la demande est maximale en hiver, en particulier en janvier et février, et inexistante en été. Même durant les périodes de chauffe, on observe des creux sur la monotone, notamment au tout début et à la toute fin de l'année qui devrait correspondre au cœur de l'hiver. Ceux-ci correspondent aux vacances scolaires, durant lesquelles seuls les bureaux de la mairie sont chauffés et l'école très peu.

Les pics jaunes visibles sur le graphique correspondent à la production d'eau chaude sanitaire (ECS). La mairie dispose d'un ballon d'ECS électrique, dont le remplacement n'est pas prévu dans le cadre de ce projet. Sa consommation n'est donc pas intégrée dans la modélisation. En revanche, l'école produit son ECS via sa chaudière gaz existante, consommation qui sera remplacée par la géothermie. L'ECS visible sur le graphique correspond donc uniquement à celle de l'école. Elle constitue également les seuls besoins estivaux, notamment au mois de juin, période durant laquelle l'école est encore occupée. Sa fermeture en juillet et août explique l'absence de consommation sur cette période.

Enfin, les appels de puissance indiqués comme « pertes » représentent les déperditions thermiques dans les canalisations du réseau reliant la mairie et l'école. Elles sont proportionnelles à la longueur de ce réseau et restent faibles dans ce cas précis, les deux bâtiments étant proches.

La réalisation de cette monotone constitue une étape clé pour le dimensionnement de la future installation de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables (ENR). En effet, ce profil de consommation permet de déterminer la puissance optimale que devra fournir l'équipement ENR. Lors du projet d'énergétique urbaine réalisés à l'école au cours de RESEAU, le dimensionnement se faisait souvent sans contraintes économiques réelles. Par exemple, nous avons dimensionné une centrale biomasse capable de couvrir 100 % des besoins en chauffage de plus de 2 200 bâtiments d'un quartier, ce qui impliquait une puissance installée très importante. Cependant, dans un projet concret tel que celui de Bouvines, l'aspect économique déterminé par le budget de la commune devient un facteur déterminant. Le budget disponible impose de trouver un compromis entre le taux de couverture énergétique et le coût d'investissement.

Pour bien comprendre cette logique, il faut rappeler qu'une puissance nominale correspond à la puissance maximale qu'une installation de production peut fournir en continu dans des conditions optimales de fonctionnement. Dans notre cas, dimensionner l'installation à une puissance nominale équivalente à 50 % de la puissance maximale appelée sur l'année permet de couvrir environ 85 % de la consommation annuelle totale. Ce choix réduit considérablement les coûts d'investissement par rapport à un dimensionnement à 100 %, tout en permettant de réaliser une réduction très significative de la consommation de gaz, et donc des émissions de CO₂.

Le graphique suivant illustre cette logique : il ne présente plus la monotone dans l'ordre temporel de l'année, mais selon un classement par appels de puissance décroissants. Ce type de représentation permet de visualiser immédiatement le pourcentage des besoins couverts en fonction de la puissance installée, ici dans le cas d'une chaudière biomasse, et de justifier techniquement le dimensionnement retenu.

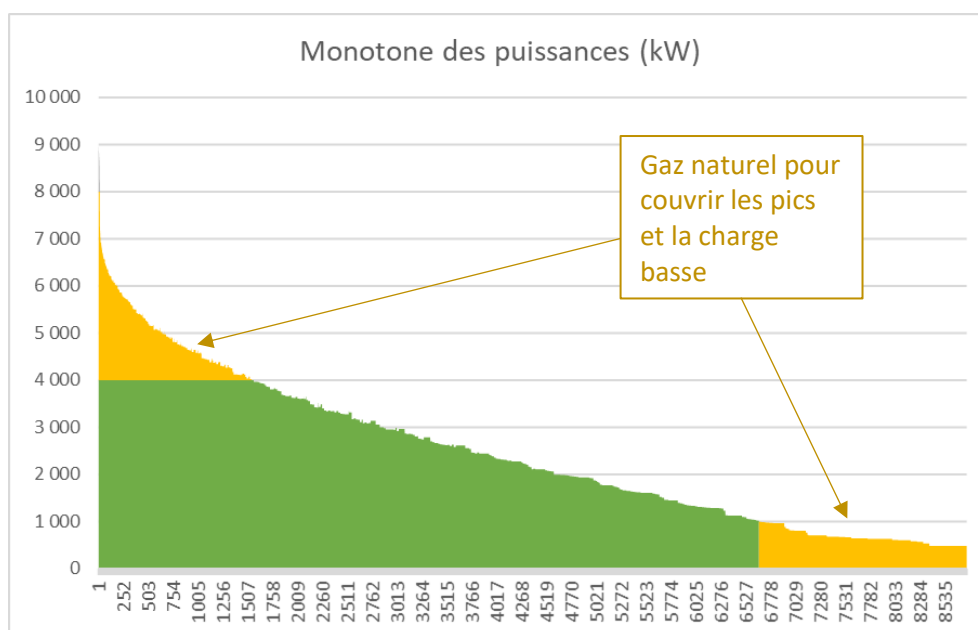


Figure 3: Dimensionnement d'une production de chaleur ENR

Comme on peut le voir sur cette monotone, les périodes où la puissance appelée dépasse 50 % de la puissance maximale sont relativement rares dans l'année. Pour satisfaire la demande lors de ces pics, généralement concentrés au cœur de l'hiver, et afin de préserver l'équilibre économique du projet, la chaudière gaz existante est conservée et utilisée en appoint.

On remarque également que les très faibles appels de puissance sont eux aussi assurés par la chaudière gaz. Cela s'explique par le fonctionnement technique d'une chaudière biomasse : en dessous d'environ 25 % de sa puissance nominale, la combustion devient instable, ce qui entraîne un rendement très faible et favorise l'encrassement de l'équipement, pouvant aller jusqu'à l'endommager à long terme. Pour éviter ce fonctionnement en régime trop bas, il est donc préférable de confier ces faibles charges à la chaudière gaz qui est beaucoup plus facilement modulable. Par ailleurs, cette dernière reste mobilisable en secours en cas de défaillance de l'équipement ENR.

Pour toutes ces raisons, il est rarement pertinent de démanteler totalement la chaudière fossile existante : l'objectif est plutôt de réduire drastiquement sa consommation tout en conservant sa fonction d'appoint et de secours.

Pour en revenir à notre projet de Bouvines, la géothermie a un fonctionnement similaire à celui d'une chaudière biomasse. D'après notre cabinet d'hydrogéologie partenaire, le scénario privilégié est la mise en œuvre d'une géothermie sur nappe. Celle-ci repose sur l'exploitation de la chaleur naturellement présente dans l'eau souterraine d'une nappe phréatique. Le principe consiste à prélever cette eau, dont la température est relativement constante toute l'année (souvent comprise entre 10 °C et 20 °C selon la profondeur et la région), via un forage dit « puits de production ». L'eau est ensuite acheminée vers une pompe à chaleur (PAC) géothermique qui en extrait l'énergie thermique : la PAC élève cette chaleur à une température suffisante pour alimenter un réseau de chauffage (planchers chauffants, radiateurs basse température, réseaux de chaleur). Une fois cette énergie prélevée, l'eau refroidie est réinjectée dans la nappe par un second forage, appelé « puits de réinjection », afin de préserver l'équilibre hydraulique et thermique du milieu. Ce système est particulièrement performant car il bénéficie d'une ressource renouvelable, stable et abondante.

Il est important de noter que l'eau prélevée dans la nappe, située généralement entre 20 et 200 m de profondeur, n'est pas à une température suffisante pour alimenter directement un réseau de chauffage. Sa chaleur doit être valorisée et portée à un niveau adapté grâce à une pompe à chaleur (PAC). Comme pour une chaudière biomasse, une PAC possède un minimum technique de 25 % de sa puissance nominale, en dessous duquel elle ne peut fonctionner sous peine de dégrader ses performances ou d'endommager le compresseur. L'optimum technico-économique consiste donc à dimensionner cette puissance nominale à environ 50 % de la puissance maximale appelée sur l'année, ce qui permet de couvrir une large part des besoins tout en maîtrisant les coûts. Toutefois, contrairement à une chaudière biomasse, la PAC présente une contrainte supplémentaire : lors de périodes de grand froid, la température de l'eau de nappe et celle de l'air extérieur peuvent être trop basses pour permettre à la PAC d'atteindre seule la température de confort, même si la demande reste inférieure à sa puissance nominale. Dans ces situations, la chaudière fossile d'appoint reste indispensable pour assurer le complément. La monotone suivante illustre la part de couverture assurée par la pompe à chaleur géothermique au fil de l'année.

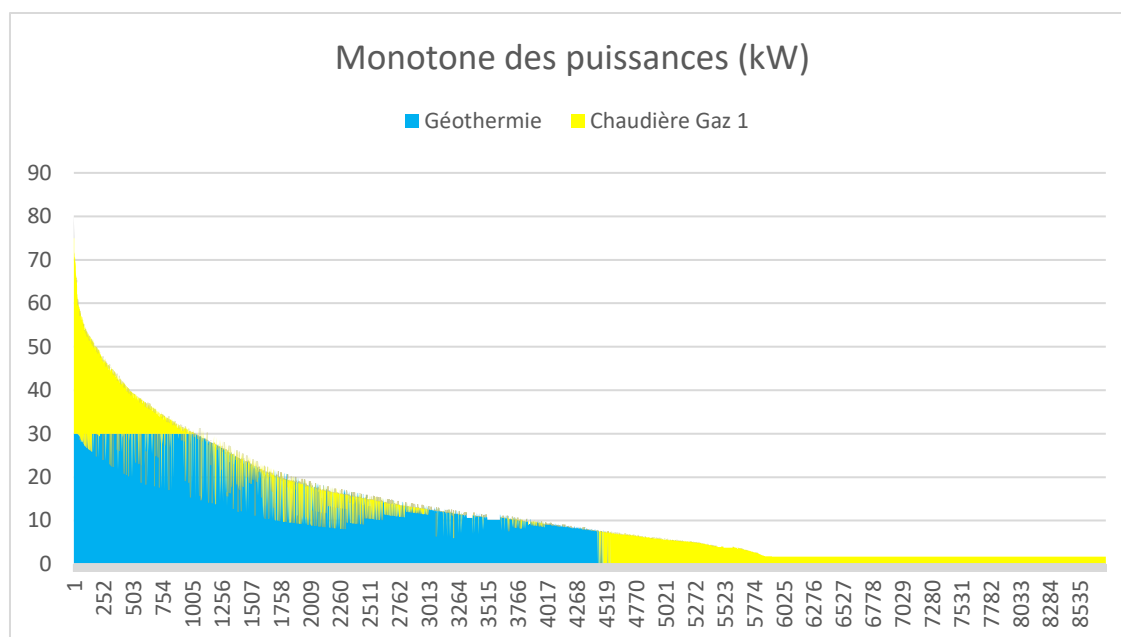


Figure 4 : Couverture d'une pompe à chaleur géothermique

On constate que, même dans la plage de puissance normalement couverte par la PAC, la chaudière gaz doit encore intervenir en appoint. Cela impacte directement le taux d'ENR, un indicateur clé pour évaluer la viabilité technique du projet. Sur cette monotone, ce taux atteint environ 70 %, ce qui reste en deçà de l'objectif visé de 85 %. Il est donc nécessaire de l'améliorer afin d'atteindre cet objectif. La solution retenue consiste à installer deux PAC en parallèle : ce dispositif, représenté sur la monotone suivante, permet de réduire le minimum technique de fonctionnement.

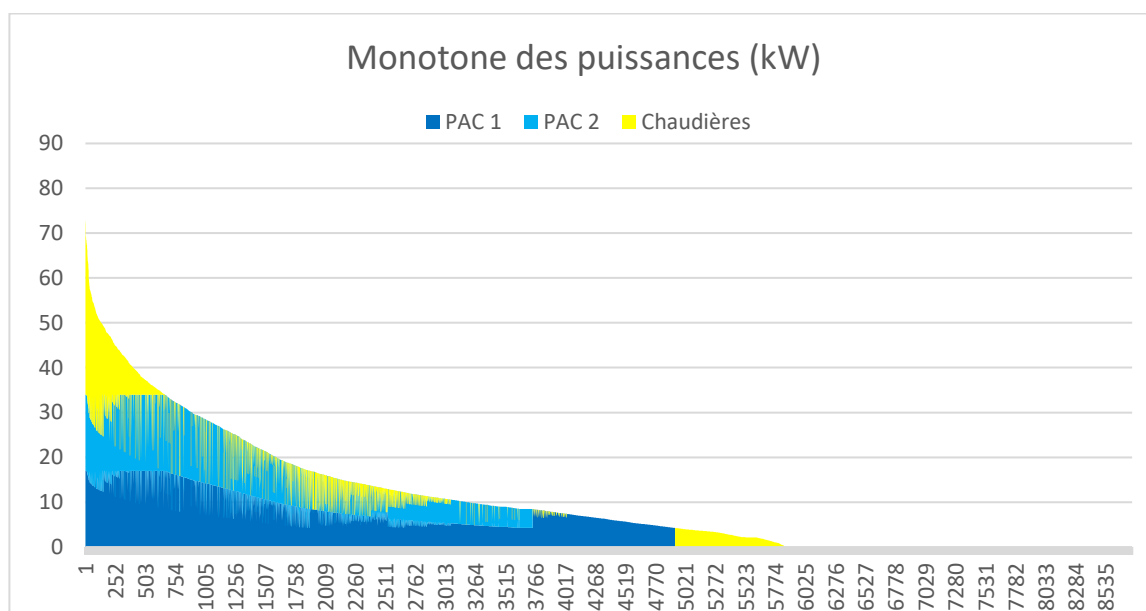


Figure 5 : Couverture de deux pompes à chaleur géothermiques en parallèle

Dans cette configuration, les deux PAC sont chacune dimensionnées à environ 50 % de la puissance nominale de la PAC unique du scénario précédent. Ainsi, lors des faibles besoins de chauffage, une seule PAC peut fonctionner, ce qui abaisse le minimum technique global : on passe d'un

seuil de 25 % (pour une PAC unique) à seulement 12,5 % de la puissance nominale totale lorsque les deux PAC fonctionnent ensemble en pleine charge. Ce découpage de la production permet donc de maintenir un fonctionnement optimal même lors des périodes de faible demande, limitant le recours à la chaudière gaz et augmentant le taux d'ENR. Avec cette stratégie, on atteint environ 85 % de couverture par les énergies renouvelables, ce qui correspond à l'objectif fixé.

Une fois les équipements ENR dimensionnés, il reste à prévoir leur intégration au circuit de chauffage existant dans chacun des bâtiments. Les informations nécessaires au bon raccordement de la géothermie ont été relevées soigneusement lors de la visite sur site, grâce à l'observation du circuit hydraulique en place. L'un des livrables de la mission est un schéma de principe illustrant cette implantation.

Schéma de principe géothermie sur nappe

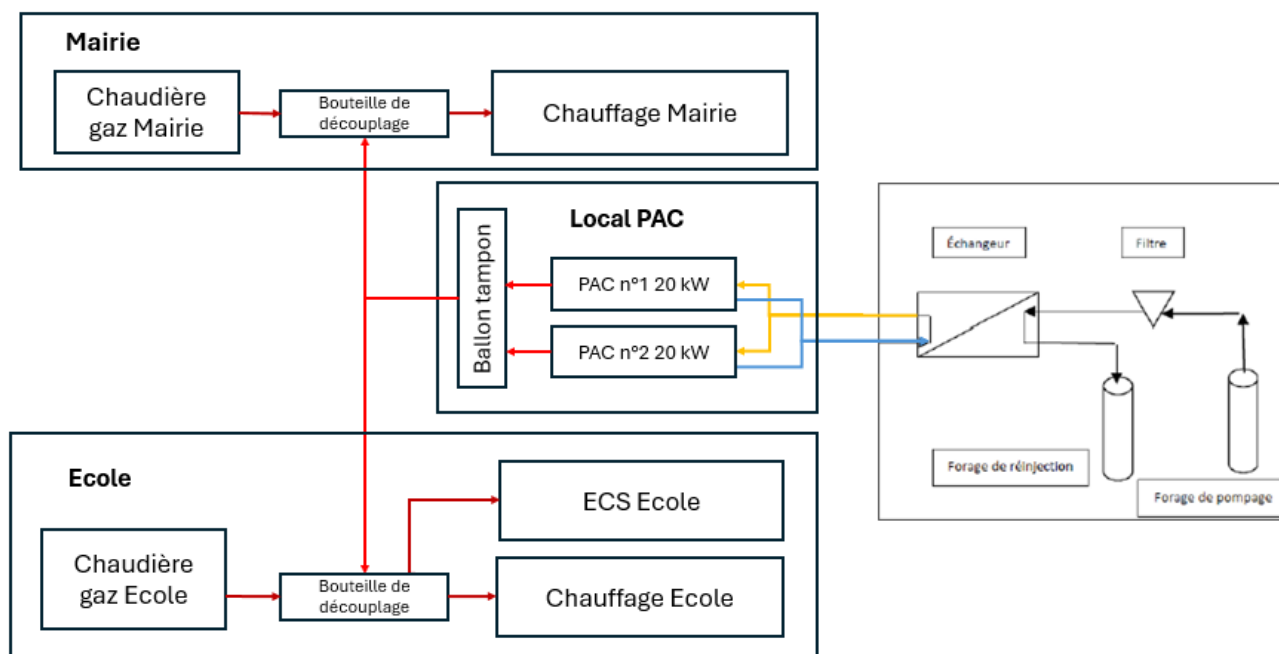


Figure 6 : Schéma de principe de l'installation géothermique

L'eau de la nappe phréatique, généralement à une température d'environ 12 °C, est prélevée grâce à un forage de pompage. Elle passe ensuite dans un échangeur thermique dit « barrage », où elle transmet ses calories à un circuit secondaire. Après cet échange, l'intégralité de l'eau prélevée est réinjectée dans la nappe, ce qui garantit que l'exploitation de la géothermie ne diminue pas la ressource en eau au fil du temps.

Sur le circuit secondaire, l'eau chauffée par l'échangeur est envoyée vers deux pompes à chaleur (PAC) fonctionnant en parallèle, comme expliqué précédemment. Ces PAC élèvent la température de l'eau jusqu'à environ 60 °C, avant de l'acheminer vers un ballon d'hydroaccumulation. Ce ballon joue un rôle tampon : il stocke l'eau chaude et évite que les PAC ne démarrent et ne s'arrêtent trop fréquemment, ce qui optimise leur durée de vie et leur rendement.

Depuis le ballon, l'eau chaude est distribuée dans un réseau reliant la mairie et l'école. Dans chaque bâtiment, elle passe par une bouteille de découplage hydraulique : cet équipement permet de mélanger l'eau issue de la PAC avec celle réchauffée par la chaudière gaz d'appoint. Cette dernière peut porter la température à 70 °C lorsque cela est nécessaire, notamment en plein hiver pour garantir un confort optimal. L'eau est alors prête à alimenter les émetteurs de chauffage (radiateurs, planchers chauffants, etc.).

Enfin, pour l'école, qui a également des besoins en eau chaude sanitaire (ECS), un ballon d'ECS est chauffé grâce au circuit issu de la bouteille de découplage. À noter que, sur ce schéma de principe, seules les conduites aller sont représentées pour plus de clarté. Le retour existe bel et bien mais n'apparaît pas ici afin de ne pas surcharger la représentation.

Une fois le schéma de principe établi, nous pouvons passer à la réalisation du deuxième livrable de la mission : le schéma hydraulique détaillé, appelé PID (Piping and Instrumentation Diagram). Dans le contexte du chauffage, un PID est un plan technique précis qui représente l'ensemble des canalisations, vannes, pompes, échangeurs, instruments de mesure et organes de régulation nécessaires au fonctionnement de l'installation.

Ce document permet de recenser tous les équipements hydrauliques indispensables à la future installation géothermique, d'identifier ceux déjà présents qui peuvent être conservés, et de déterminer ceux qui devront être remplacés ou achetés. Il constitue donc une base essentielle pour préparer la phase d'exécution, optimiser les coûts et anticiper les raccordements sur site.

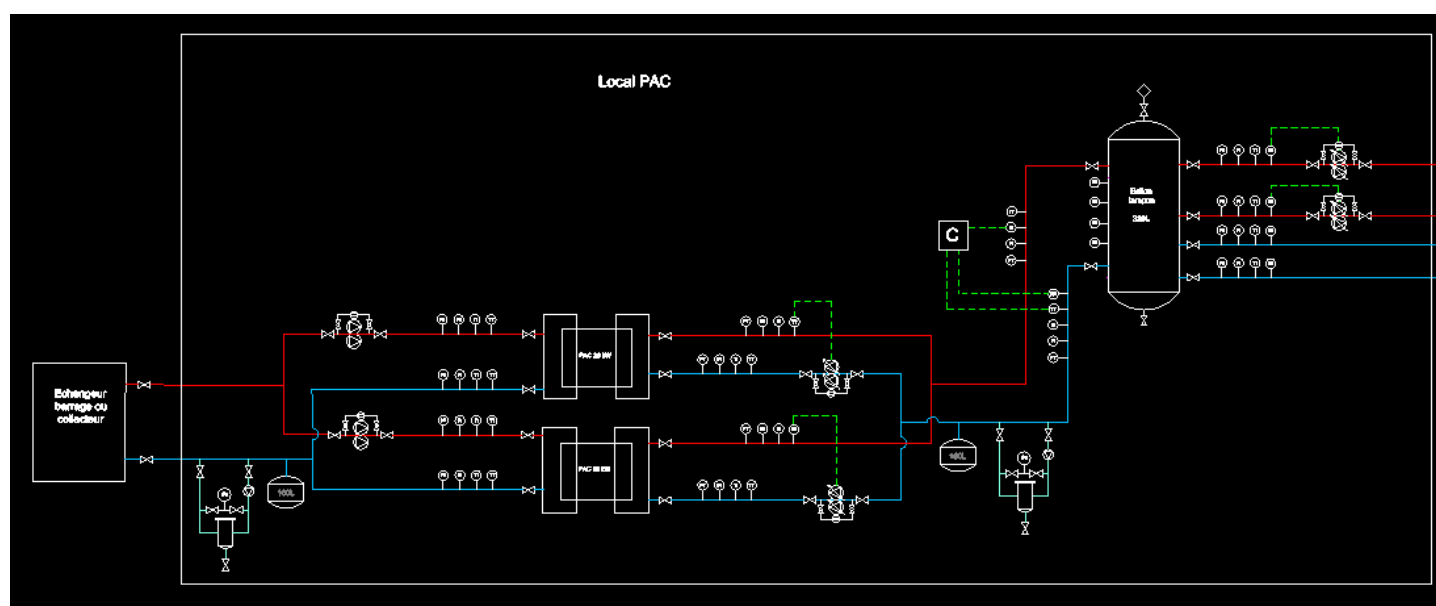


Figure 7 : Schéma hydraulique du local PAC

Chaque équipement représenté sur ce schéma hydraulique remplit une fonction bien précise. Leur description détaillée relève de l'expertise technique fine de Ferest Énergies et sortirait du cadre de ce rapport. Il suffit de retenir que ce schéma permet d'établir l'inventaire des équipements à acquérir, étape indispensable pour calculer le coût d'investissement, élément clé de l'étude économique.

Lors du cursus en école d'ingénieur, un exercice similaire avait déjà été mené dans le cadre du cours de RESEAU, consistant à dimensionner une installation d'ENR, en l'occurrence une centrale biomasse destinée à alimenter un réseau de chaleur. Toutefois, le projet de Bouvines, mené cette fois-ci au sein d'un bureau d'études réel, introduit une nouvelle dimension essentielle : l'analyse économique. En effet, dès la réunion de lancement, le maire de la commune, client du projet, a insisté sur un point clé : le projet ne serait concrètement mis en œuvre que s'il s'avérait économiquement viable et compatible avec le budget de la collectivité.

Cette étude économique repose sur plusieurs volets. Elle commence par une estimation exhaustive des coûts d'investissement, calculés avec une marge de sécurité. En effet, à ce stade d'étude de faisabilité, il est courant que les montants retenus soient volontairement légèrement supérieurs aux coûts finaux, afin d'anticiper les imprévus et garantir la robustesse du dimensionnement. Parallèlement, l'étude identifie et intègre l'ensemble des subventions mobilisables : le Fonds Chaleur de l'ADEME, le Fonds Vert de l'État, les aides départementales, ainsi que, pour ce projet spécifique, les subventions de la MEL. Le calcul du reste à charge pour la collectivité peut ainsi être établi.

Vient ensuite l'évaluation des charges d'exploitation de la future installation ENR. Celles-ci se déclinent généralement en trois postes : P1 (fourniture d'énergie), P2 (exploitation et maintenance courante) et P3 (gros entretien et renouvellement des équipements). Ces coûts sont ensuite comparés aux charges d'exploitation actuelles, définissant la situation de référence. L'analyse intègre également des hypothèses prospectives, telles que l'évolution des prix des énergies fossiles (dont l'augmentation est jugée plus incertaine et plus risquée), celle de l'électricité, ou encore l'inflation appliquée aux combustibles renouvelables comme la biomasse.

Enfin, l'indicateur central pour le client demeure le temps de retour sur investissement (TRI). Celui-ci traduit la durée nécessaire pour amortir les coûts d'investissement grâce aux économies réalisées sur la consommation d'énergies fossiles, remplacées ici par la géothermie. Ce type de technologie permet en effet d'exploiter une ressource gratuite et locale, l'énergie du sol, ce qui en fait un atout économique majeur à long terme. Le TRI constitue ainsi la clé de lecture la plus déterminante pour juger de la viabilité économique du projet.

Dans ce rapport, les montants précis ne seront pas communiqués, afin de respecter la confidentialité des données liées au projet.

d) Retour réflexif sur le projet

Bien que ce projet se soit globalement déroulé de manière satisfaisante et en adéquation avec les attentes exprimées par le client, certaines difficultés ont néanmoins émergé au cours de sa réalisation, nécessitant une capacité d'adaptation de notre part.

La première difficulté notable est survenue lors de la réunion de fin de Phase 1, qui avait pour objectif de valider les hypothèses de travail et de sélectionner les scénarios à approfondir en Phase 2. Or, lors de cette réunion n'était présent que des représentants du pôle ENR chez Ferest, sans la présence des membres du pôle bâtiment, ayant été en charge de l'étude des solutions de rénovation énergétique. Cette absence a posé problème lorsque le client, un membre du conseil municipal de Bouvines, ancien maître d'ouvrage expérimenté, a formulé plusieurs questions techniques précises relatives à la partie rénovation. Ces questions, portant sur des aspects que nous n'avions pas étudiés directement, sont restées sans réponse immédiate, ce qui a suscité une certaine frustration chez le client et a conduit à une tension perceptible dans les échanges. Pour surmonter cette difficulté, nous avons pris soin de noter l'ensemble de ses interrogations, puis d'organiser un retour écrit détaillé par mail, après concertation avec nos collègues du pôle bâtiment. Cette démarche a permis d'apporter des réponses claires et fiables, mais elle a également mis en évidence l'importance d'une meilleure coordination inter-pôles lors des réunions clés avec le client.

Une deuxième critique, plus générale, peut également être formulée à propos du projet. En effet, celui-ci a nécessité un temps de travail conséquent, mobilisant plusieurs ressources, alors qu'il portait uniquement sur deux bâtiments (la mairie et l'école) dont la consommation énergétique initiale était relativement faible. Cette disproportion entre les moyens humains mobilisés et l'ampleur réelle des économies potentielles m'a conduit à m'interroger sur l'impact global du projet. En effet, dans un contexte d'urgence climatique, où la réduction des émissions de gaz à effet de serre doit être massive et rapide, il est légitime de se demander si cette méthodologie consistant à traiter les projets un par un, même de petite envergure, est à la hauteur des enjeux. Cette réflexion m'a amené à prendre du recul sur la pertinence de cette mission. Il m'a semblé essentiel de réfléchir à des approches plus globales, mutualisées ou à plus grande échelle, afin d'accélérer la transition énergétique et de maximiser l'impact des ENR&R.

2) Schéma directeur de réseau de chaleur

a) Contexte du projet

Cette volonté de travailler sur des projets de plus grande envergure, ayant un impact énergétique et environnemental plus significatif, s'est concrétisée rapidement. En effet, ce type d'approche entre dans le cadre des schémas directeurs de réseaux de chaleur, qui permettent de raisonner à l'échelle d'un territoire et non plus seulement à celle de quelques bâtiments isolés. Pour rappel, selon la définition de l'ADEME (2016), un schéma directeur de réseau de chaleur est un « outil de planification territoriale qui permet de réaliser un exercice de projection sur l'évolution du réseau existant ». Il s'agit donc d'un document stratégique qui s'inscrit pleinement dans les démarches d'aménagement du territoire, mais appliqué au domaine énergétique, avec pour objectif de planifier, structurer et optimiser le développement de réseaux de chaleur sur plusieurs années.

Dans ce cadre, il m'a été proposé de contribuer au schéma directeur de la Communauté d'Agglomération de Béthune-Bruay Artois Lys Romane (CABBALR). Ce territoire, situé dans le département du Pas-de-Calais (62) et regroupant près de 100 communes, se trouve à proximité du bureau d'études basé à Lille. La ville de Béthune dispose déjà d'un réseau de chaleur existant, et la communauté d'agglomération souhaite désormais étendre ce dispositif à l'échelle de l'ensemble du territoire, afin de mutualiser la production énergétique, d'augmenter la part d'énergies renouvelables et de récupération (ENR&R) utilisées, et de renforcer son autonomie énergétique.

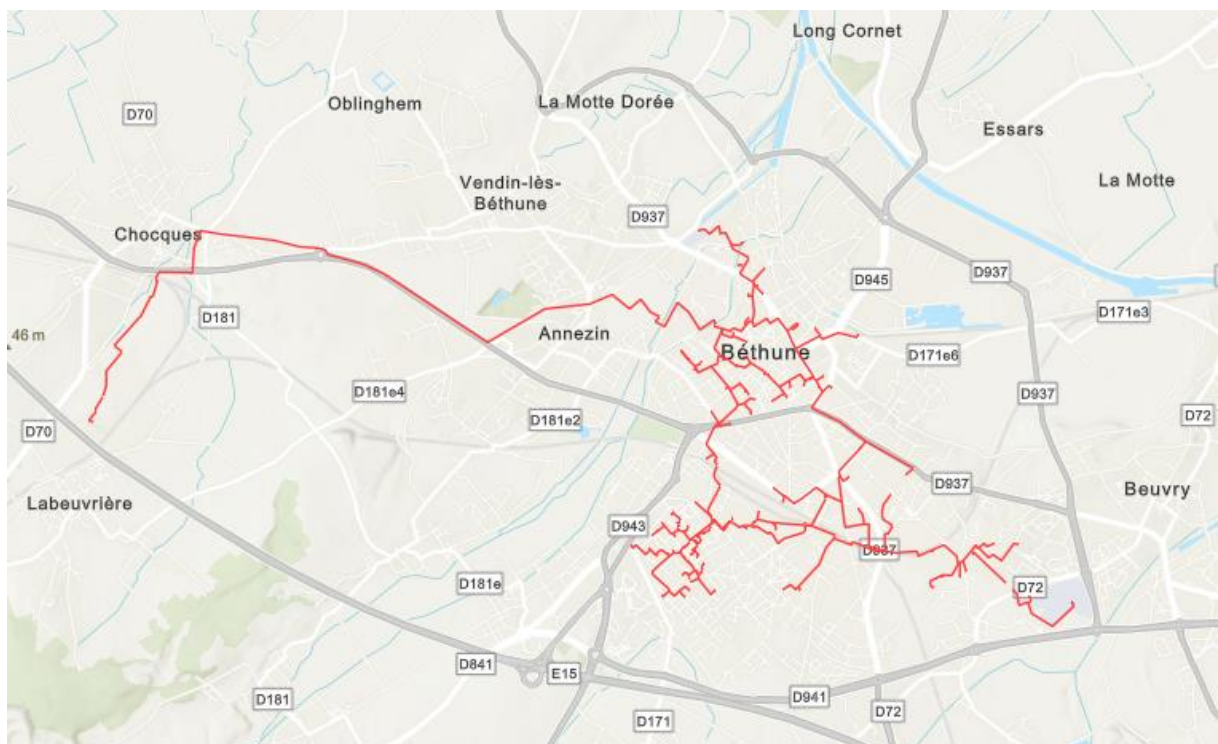


Figure 8 : Réseau de chaleur existant de Béthune

b) Etude des besoins

Pour évaluer l'opportunité d'étendre le réseau de chaleur sur le territoire de la CABBALR, la première étape consiste à identifier les zones de densité énergétique, c'est-à-dire les secteurs où plusieurs bâtiments fortement consommateurs d'énergie sont regroupés. Cette analyse est essentielle car la construction d'un réseau de chaleur représente un investissement lourd : plus le linéaire de réseau est important, plus les coûts augmentent. Il n'est donc pas réaliste ni pertinent de raccorder l'ensemble des bâtiments du territoire ; l'enjeu est de cibler uniquement les zones où le réseau peut réellement contribuer à réduire la consommation d'énergies fossiles.

La densité énergétique se mesure généralement en MWh/mètre linéaire (ml) de réseau. Elle permet d'évaluer si un projet est économiquement viable. Selon les recommandations de l'ADEME, un réseau de chaleur est pertinent et devient éligible aux subventions à partir d'une densité de 1,5 MWh/ml. En dessous de ce seuil, le coût rapporté à l'énergie distribuée est trop élevé par rapport aux solutions individuelles. À l'inverse, certaines zones très denses, comme les piscines, hôpitaux ou ensembles de logements collectifs, peuvent atteindre plus de 5 MWh/ml, ce qui assure une rentabilité bien plus favorable.

Pour repérer ces zones, une étude des besoins à l'échelle macro est réalisée. Elle repose d'abord sur le recensement des principaux bâtiments publics grâce à la base de données en open data Géodatamine, qui fournit des informations géographiques et administratives sur de nombreuses structures. En l'occurrence, on récolte les données relatives aux écoles, collèges, lycées, hôpitaux, piscines, bibliothèques, gymnases ou encore mairies, qui sont généralement des postes importants de consommation. Chacun de ces bâtiments est ensuite associé à une estimation des besoins annuelle, car il serait infaisable de collecter les factures réelles de l'ensemble du territoire.

En complément, deux bases internes sont mobilisées : une première relative aux logements collectifs, donnant accès à des données de consommation réelles mais sans localisation fine, et une seconde appelée « gaz maille adresse », qui recense les consommations de gaz naturel, parfois agrégées à l'échelle d'une rue entière. Bien que moins précises spatialement, ces bases sont précieuses car elles permettent notamment d'identifier les gros consommateurs d'énergie, comme certains sites industriels, absents de Géodatamine.

Le croisement de ces besoins énergétiques localisés avec les coordonnées géographiques issues des différentes bases de données permet ensuite de produire, via le logiciel QGIS, une cartographie des zones de densité énergétique. Cet outil met en évidence les secteurs prioritaires où l'extension du réseau de chaleur serait la plus pertinente, en ciblant les zones à fort potentiel de consommation et donc économiquement viables. Il est toutefois important de prendre du recul sur les résultats de cette étude macro, car elle comporte plusieurs sources potentielles d'erreurs. Certains bâtiments, par exemple, peuvent avoir fermé mais apparaître encore dans les bases de données qui ne sont pas toujours à jour. À l'inverse, certains sites utiles à l'étude sont absents, comme les écoles maternelles, les crèches ou encore les Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS). Par ailleurs, des doublons peuvent exister entre les différentes bases de données mobilisées. A ce stade, les résultats de l'étude des besoins ne sont pas encore fiables et nécessitent d'être affinés.

Néanmoins, cette étude macro a permis de faire ressortir certaines communes de la CABBALR comme ayant un potentiel de densité énergétique propice à la construction d'un réseau de chaleur. Une dizaine de communes parmi les 100 de la communauté d'agglomération telles que Lillers, Bruay-la-Buissière ou encore Auchel semblent avoir une densité intéressante.

L'étape suivante consiste à affiner l'analyse en la déclinant à l'échelle de chaque commune. Contrairement à l'étude macro, ce travail vise à éliminer les doublons identifiés dans les bases de

données et à compléter l'inventaire des bâtiments manquants. Pour cela, des outils comme Géoportail et Google Maps sont mobilisés afin de repérer et d'ajouter les structures qui n'auraient pas été recensées initialement. Cette phase implique également une localisation précise sur la cartographie des bâtiments et des postes de consommation les plus pertinents, de manière à disposer d'une vision plus exhaustive et réaliste des besoins énergétiques à l'échelle locale. L'aboutissement de cette étape de l'étude des besoins permet d'obtenir la cartographie suivante.

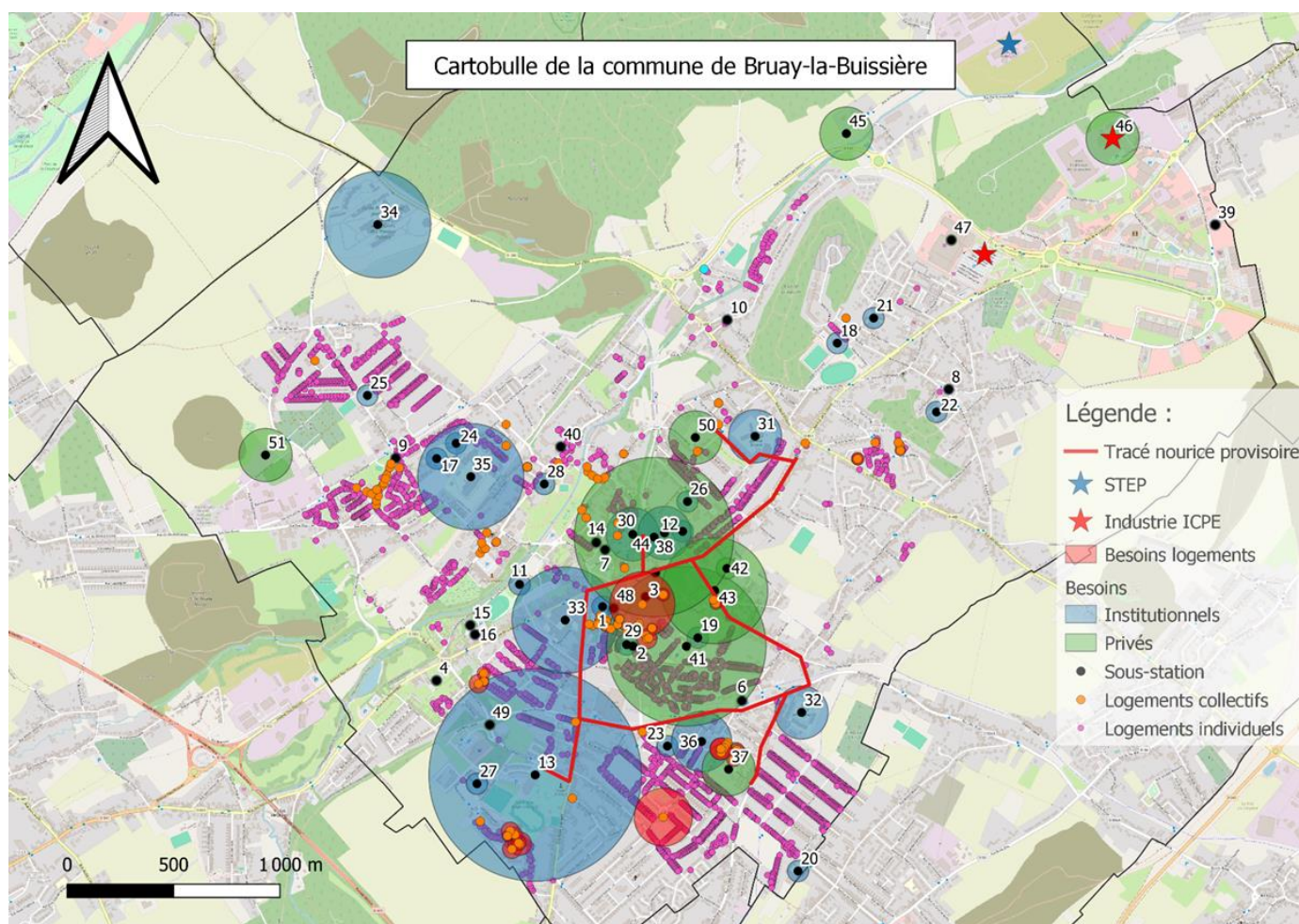


Figure 9 : Cartobulle de la commune de Bruay-la-Buissière

Cette « cartobulle » reprend le même principe que celle réalisée pour la commune de Bouvines, mais cette fois appliqué à l'échelle d'une ville entière. L'objectif est de visualiser la répartition des besoins énergétiques et d'identifier les zones où un réseau de chaleur urbain (RCU) pourrait être pertinent.

Chaque bâtiment recensé apparaît sur la carte sous forme de bulle. Le diamètre de la bulle est proportionnel à la consommation énergétique annuelle du bâtiment, selon une échelle fixée à 4 MWh/ml. Trois catégories de bâtiments sont distinguées par un code couleur : les bulles bleues correspondent aux bâtiments publics (écoles, piscines communautaires, équipements sportifs...), les bulles vertes représentent les bâtiments privés (industries, supermarchés...), tandis que les bulles rouges traduisent la consommation des logements collectifs ou individuels.

La lecture de la carte permet d'identifier rapidement les zones où les bulles se chevauchent. Ces regroupements traduisent une densité énergétique suffisante pour justifier l'implantation potentielle d'un réseau de chaleur, car les besoins sont concentrés dans un périmètre restreint, ce qui

limite les coûts liés à la longueur des canalisations. Dans cette zone identifiée, un tracé nourrice provisoire du futur réseau est représenté en rouge. Ce tracé a pour vocation de raccorder l'ensemble des bâtiments situés dans le périmètre de forte densité énergétique afin d'optimiser la rentabilité de l'infrastructure.

En parallèle, la cartographie intègre également les gisements potentiels d'énergies renouvelables et de récupération (ENR&R), signalés par des étoiles. L'étoile bleue correspond par exemple à une station d'épuration. Ce type d'équipement peut être valorisé énergétiquement en exploitant la chaleur des eaux usées, à condition d'installer une pompe à chaleur (PAC) pour rehausser le niveau de température. Les étoiles rouges, quant à elles, indiquent des sites industriels identifiés comme porteurs de chaleur fatale, issue soit de procédés de combustion, soit de systèmes de refroidissement évaporatif. Ces installations rejettent de la chaleur qui pourrait être récupérée et intégrée au réseau. Cependant, dans le cas présent, les principaux gisements ENR&R identifiés se situent trop en marge des zones de forte densité énergétique. Leur exploitation apparaît donc économiquement complexe : la distance importante obligerait à tirer un linéaire de réseau trop coûteux par rapport à l'énergie valorisée. Cette limite met en évidence l'un des principaux enjeux de la planification des réseaux de chaleur : concilier les gisements disponibles avec la proximité des besoins pour garantir à la fois l'efficacité énergétique et la viabilité économique du projet.

c) Etude des gisements

Ces sources de chaleur récupérable identifiées précédemment étant difficilement exploitables en raison de leur éloignement ou de leur faible puissance, il devient nécessaire de rechercher d'autres sources d'énergies renouvelables (ENR) pour alimenter le futur réseau de chaleur. C'est dans ce contexte que s'inscrit la deuxième partie de l'étude : une analyse complète et exhaustive des gisements ENR disponibles sur le territoire de la ville. L'objectif est de recenser toutes les sources potentielles d'énergie thermique, de les quantifier et d'évaluer leur faisabilité pour contribuer à un réseau de chaleur économiquement et techniquement viable.

En plus de la géothermie, de la biomasse et de la chaleur fatale, l'étude s'intéresse à plusieurs autres types de gisements :

- Le solaire thermique, qui capte directement l'énergie du soleil à l'aide de panneaux ou capteurs thermiques pour produire de l'eau chaude utilisable dans le réseau.
- La cogénération avec méthaniseurs présents à proximité, qui consiste à produire simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir de la digestion de matières organiques, comme les déchets agricoles ou alimentaires.
- Les événements de gaz de mine, qui permettent de récupérer le gaz naturel ou le méthane présent dans d'anciennes mines, en transformant cette énergie résiduelle en chaleur utile grâce à la combustion.

Pour chaque type de gisement, des outils internes au bureau d'études permettent de calculer la quantité d'énergie thermique pouvant être produite annuellement. Ces calculs se basent sur plusieurs paramètres, dont la distance entre le gisement et le tracé provisoire du réseau et certaines données techniques spécifiques à chaque gisement (quantité, continuité de production...).

Les résultats de cette analyse sont ensuite comparés aux besoins énergétiques identifiés dans le périmètre de forte densité. Chaque gisement est évalué selon sa proximité et sa capacité à couvrir les besoins du réseau. Sur cette base, une notation simplifiée sous forme de « + » et « - » est attribuée, permettant de classer les gisements selon leur pertinence et leur faisabilité d'exploitation. Ces

informations sont regroupées dans un tableau synthétique, servant d'outil décisionnel pour prioriser les sources d'énergie à intégrer dans le futur réseau de chaleur.

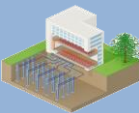
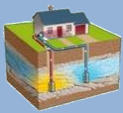
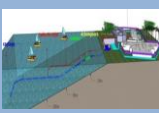
ENR Basse Température							
Géothermie sur sondes	Géothermie sur nappe	Hydrothermie / Thalassothermie	Eaux grises de STEP	Cloacothermie	Solaire thermique	Solaire thermique avec stockage inter-saisonnier	Chaleur fatale industrielle (refroid.)
							
--	-	?	-	-	-	-	--
Puissance tmax trop grande Pollution avérée, artésianisme, présence de cavité --> Techniquement compliqué à mettre en œuvre	Pollution avérée, présence de cavité --> Techniquement compliqué à mettre en œuvre	Commentaires sur la distance, sur l'adéquation aux besoins et l'adéquation du cour d'eau à un pompage / rejet Commentaires sur la tourneur administrative (dossier loi sur l'eau)	Gisement loin des lieux de consommation	Ville avec trop peu d'habitants afin d'avoir un niveau de récupération intéressant	énergie trop diffuse --> 10 000 m ² à prévoir pour les besoins estivaux	énergie trop diffuse --> 84 000 m ² surface beaucoup trop conséquente	Pas d'industriel de ce type dans la zone

Figure 10 : Tableau des gisements basse température de la commune de Lillers

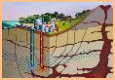
ENR Haute Température										
Chaleur fatale industrielle (TERREOS)	Géothermie profonde	Cogénération biogaz	Gaz de mines	Anas de lin / Chanvre	Miscanthus	Plaquette bocagère	Pellets	Plaquette forestière	Bois B	CSR
										
+	--	--	?	--	+	+	-	+	-	--
Récupération de chaleur sur les TAR de TERREOS possibilité de monter assez haut en température (80/85°C)	Besoins trop faibles, CAPEX important Pas une zone propice à la géothermie profonde.	Pas de cogénération de biogaz au alentours	commentaires	Pas de teneur de lin dans un rayon de 25km	Nombreuses zones de prévention des points de captages d'eau aux alentours Développement de la filière à réaliser (voir chambre d'agriculture, Novabiom)	Ressources disponibles Investigation à réalisé sur le développement de la filière Part de haie gérée et non gérée	Besoins importants pour ce combustible onéreux et adapté aux petites puissances	Ressource disponible mais risque de tension dans le futur	Non adapté à des réseaux de chaleur de petites communes, puissance nécessaire de 15MW (équipements de traitement des fumées onéreux)	Gisement déjà capté par le RCU de Béthune.

Figure 11 : Tableau des gisements haute température de la commune de Lillers

Les tableaux présentés permettent de visualiser les notes attribuées à chacun des gisements identifiés pour la commune de Lillers, où un périmètre de densité énergétique a été repéré comme potentiellement intéressant pour le développement d'un futur RCU. Dans cette analyse, les gisements haute et basse température sont distingués afin de tenir compte des besoins spécifiques. Par exemple, certains bâtiments tels que les piscines ont des besoins énergétiques importants mais peuvent être chauffés à basse température, généralement comprise entre 40 et 60°C. Pour le reste des bâtiments, par précaution, on considère que le chauffage nécessitera de la haute température, c'est-à-dire entre 70 et 90°C, car le type précis d'émetteurs de chaleur installés dans chaque bâtiment n'est pas connu.

Concernant les différentes sources d'énergie renouvelable et de récupération, plusieurs observations se dégagent. D'après le site géothermie.fr, le recours à la géothermie sur le territoire de la CABBALR semble limité, principalement en raison de la présence d'anciennes cavités minières dans le sous-sol qui restreignent l'exploitation sécurisée de cette ressource. En revanche, le territoire présente un potentiel significatif pour la biomasse, notamment grâce à la présence de nombreuses forêts qui pourraient fournir du combustible. Cette source d'énergie sera donc envisagée comme une option viable si le projet est porté à son terme.

Par ailleurs, sur la commune de Lillers, l'industriel Terreos dispose d'installations de combustion situées à proximité des zones de consommation. Les échanges avec cet acteur ont permis

de confirmer la possibilité de récupérer une partie de cette chaleur fatale, notamment parce que l'industriel bénéficierait d'une compensation financière en échange de la récupération de cette énergie.

Ainsi, cette étude de gisement a permis d'identifier et de cartographier les différentes sources potentielles d'énergies renouvelables et de récupération (ENR&R) qui pourraient alimenter un futur réseau de chaleur à l'échelle de plusieurs communes de la CABBALR. Elle constitue un outil essentiel pour prioriser les sources à exploiter, en fonction de leur proximité avec les zones de densité énergétique et de leur capacité à répondre efficacement aux besoins thermiques identifiés.

d) Retour réflexif sur le projet

Ce projet a été particulièrement stimulant, tant par son ampleur que par l'impact potentiel qu'il peut générer en matière de transition énergétique. Les schémas directeurs de réseaux de chaleur constituent en effet des outils stratégiques permettant de planifier et de mettre en œuvre des actions efficaces pour réduire la consommation d'énergies fossiles et développer des solutions durables à l'échelle territoriale.

Cependant, ce type de projet peut également présenter certaines limites, notamment en termes de rythme d'avancement. En effet, le projet avait été initié au tout début de mon stage, et à la fin de celui-ci, nous venions tout juste de conclure la Phase 1. Contrairement à la mission menée pour la mairie de Bouvines, où le client était très impliqué et jouait un rôle actif dans le suivi et l'avancement du projet, la situation à la CABBALR est plus complexe. Les acteurs politiques, bien qu'essentiels, se montrent moins impliqués, ce qui peut générer des délais administratifs et un rythme de travail plus lent.

Il est également important de noter qu'un schéma directeur de réseau de chaleur avait déjà été réalisé en 2021 par un autre bureau d'études. Plutôt que de lancer immédiatement un appel d'offres et d'entamer la construction, la CABBALR a choisi de relancer une étude pour examiner et potentiellement remettre en question le travail précédent, probablement en raison de divergences d'orientation ou de priorités en interne. Cette situation illustre combien les changements de gouvernance et de direction politique peuvent impacter la continuité et la rapidité des projets territoriaux.

Ainsi, bien que ce projet soit porteur d'avenir et présente un fort potentiel pour accompagner la transition énergétique, son efficacité pourrait être renforcée par une implication plus soutenue des acteurs publics, notamment dans le suivi et la coordination entre les différents acteurs. Une telle mobilisation permettrait non seulement d'accélérer les phases d'étude et de décision, mais également de maximiser l'impact concret de ces initiatives face à l'urgence climatique.

V - Retour réflexif sur le stage

J'ai particulièrement apprécié l'expérience que m'a offerte ce stage au sein de Ferest Énergies, tant pour la richesse des missions confiées que pour la qualité de l'environnement de travail. J'ai eu l'opportunité de découvrir des projets concrets, porteurs de sens et directement liés à la transition énergétique, avec un impact positif et mesurable en faveur de la protection de l'environnement. Cette dimension vertueuse m'a permis de donner une véritable valeur à mon travail, en constatant que les études et les réflexions menées contribuent à des solutions concrètes face aux enjeux énergétiques et climatiques actuels.

Les aspects techniques des missions se sont révélés particulièrement stimulants sur le plan intellectuel. L'ingénierie fine, la diversité des problématiques rencontrées ainsi que la rigueur méthodologique nécessaire pour mener à bien les projets m'ont permis d'approfondir mes connaissances et de développer mes compétences. Ce stage m'a ainsi apporté un apprentissage significatif dans le domaine de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, en consolidant mes acquis théoriques tout en les mettant en application dans un contexte professionnel exigeant.

Au-delà de l'intérêt technique des missions, j'ai été très marqué par les excellentes conditions de travail au sein de l'entreprise. L'atmosphère de bienveillance, la cohésion d'équipe et la proximité entre l'ensemble des collaborateurs, quel que soit leur niveau hiérarchique, ont constitué un véritable moteur pour mon intégration et mon épanouissement. L'esprit d'entraide qui règne au sein de Ferest Énergies est à souligner : j'ai pu constater dès mes premiers jours que les ingénieurs d'études en poste n'hésitent pas à s'entraider, à se conseiller mutuellement et à partager leurs expériences. Cette démarche collective et collaborative s'inscrit dans une dynamique d'apprentissage permanent, où chacun cherche à progresser et à transmettre ses connaissances. J'ai ainsi compris que je n'étais pas seul dans une phase d'acquisition de compétences, mais que cette logique d'amélioration continue était partagée par l'ensemble de l'équipe.

Cette expérience m'a non seulement conforté dans mon choix de carrière, mais elle m'a également permis de me projeter pleinement dans le métier. Si bien que je suis aujourd'hui embauché en tant qu'ingénieur d'étude en efficacité énergétique et énergies renouvelables au sein de Ferest Energies.

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'ensemble des collaborateurs de Ferest Énergies pour leur accueil, leur accompagnement et leur confiance tout au long de mon stage. Je remercie également les enseignants du Département Aménagement et Environnement de Polytech Tours qui m'ont permis d'acquérir les connaissances scientifiques et méthodologiques nécessaires à la réussite de cette expérience.

VI - Bibliographie

- 1) *Construction et performance environnementale du bâtiment* | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique. (s. d.). Ministères Aménagement du Territoire Transition Écologique. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/construction-performance-environnementale-du-batiment>
- 2) *Embodied Carbon - World Green Building Council*. (2025, 16 avril). World Green Building Council. [https://worldgbc.org/climate-action/embodied-carbon/energie de récupération](https://worldgbc.org/climate-action/embodied-carbon/energie-de-recuperation) | FranceTerme | Culture. (s. d.). <https://www.culture.fr/franceterme/terme/ENVI226>
- 3) La librairie ADEME. (s. d.). *Guide de réalisation du Schéma directeur d& # 039 ; un réseau de chaleur ou de froid existant*. La Librairie ADEME. <https://librairie.ademe.fr/energies/2534-guide-de-realisation-du-schema-directeur-d-un-reseau-de-chaleur-ou-de-froid-existant.html>
- 4) *Réseaux de chaleur* | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique. (s. d.). Ministères Aménagement du Territoire Transition Écologique. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reseaux-chaleur>
- 5) United Nations. (s. d.). *Les énergies renouvelables : qu'est-ce que c'est ?* | Nations Unies. <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>



POLYTECH
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Raphaël
Reichman
2024-2025

Stage Ingénieur en efficacité énergétique industrielle et ENR et réseaux de chaleur

Résumé : During my internship, I worked alongside design engineers on techno-economic feasibility studies for renewable energy projects, mainly focused on thermal sources such as geothermal, biomass, waste heat recovery, and district heating networks. At a small scale, I contributed to a project connecting two public buildings, a town hall and a primary school, through a dedicated heating network. At a larger scale, I participated in drafting a master plan for an urban district heating network across an entire metropolitan area comprising 100 municipalities.

Mots Clés : Energies renouvelables, efficacité énergétique, réseaux de chaleur urbain, environnement

Ferest Energies:

199 rue Colbert, Bâtiment Namur, 3ème étage, 59000 Lille

Tuteur entreprise :

Laurent Delannoy

Responsable de production

Tuteur académique :

Mindjid Maizia