



PRÉFECTURE DE LA LOIRE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Projet Waldeck Rousseau à Roanne

Etude de faisabilité géothermique sur sondes
verticales

Rapport d'étude

Version initiale

12 décembre 2025

Affaire N°25A077

Romain GENET - 06.76.83.78.89

Alexis DESBOIS – 06.85.48.38.41

NRG Conseils

Siège social :

9 rue de la biche

73490 LA RAVOIRE

SIRET 953 671 120 000 12

SAS au capital de 5000€

RCS de Chambéry



SOMMAIRE

1	Objet du rapport / Contexte	3
2	Besoins énergétiques	4
2.1	Caractéristiques thermiques du bâtiment	4
2.2	Besoins énergétiques	5
2.3	Régimes de température.....	7
3	Etude de la ressource géothermique	8
3.1	Contexte géologique	8
3.2	Potentiel géothermique de surface	11
3.2.1	Potentiel sur nappe	11
3.2.2	Potentiel sur sondes.....	11
3.2.3	Conclusions sur le potentiel	12
3.3	Contraintes réglementaires.....	13
4	Proposition de scénario.....	16
5	Etude technique de la géothermie.....	17
5.1	Principe de la production sur sondes.....	17
5.2	Scénario – base géothermie chaud – froid actif (35 kW).....	18
5.2.1	Présentation du scénario	18
5.2.2	Bilan énergétique chaud	21
5.2.3	Bilan énergétique froid.....	22
5.2.4	Dimensionnement du champ de sondes	23
5.2.5	Implantation prévisionnelle des sondes	25
6	Bilan économique et environnemental.....	26
6.1	Coûts d'investissement	26
6.2	Coûts d'exploitation	27
6.3	Bilan économique.....	28
6.3.1	Bilan économique sans CEE.....	29
6.3.2	Bilan économique avec CEE	31
6.4	Bilan environnemental	33
7	Conclusions.....	34

1 Objet du rapport / Contexte

Dans le cadre de la réhabilitation du site Waldeck Rousseau à Roanne (42), la préfecture de la Loire souhaite réaliser une étude de faisabilité géothermique sur sondes pour alimenter le bâtiment.

La localisation du projet est présentée ci-dessous.



Secteur d'étude

2 Besoins énergétiques

Les besoins énergétiques sont issus de la simulation thermique dynamique du BE fluide du projet NEPSSEN.

2.1 Caractéristiques thermiques du bâtiment

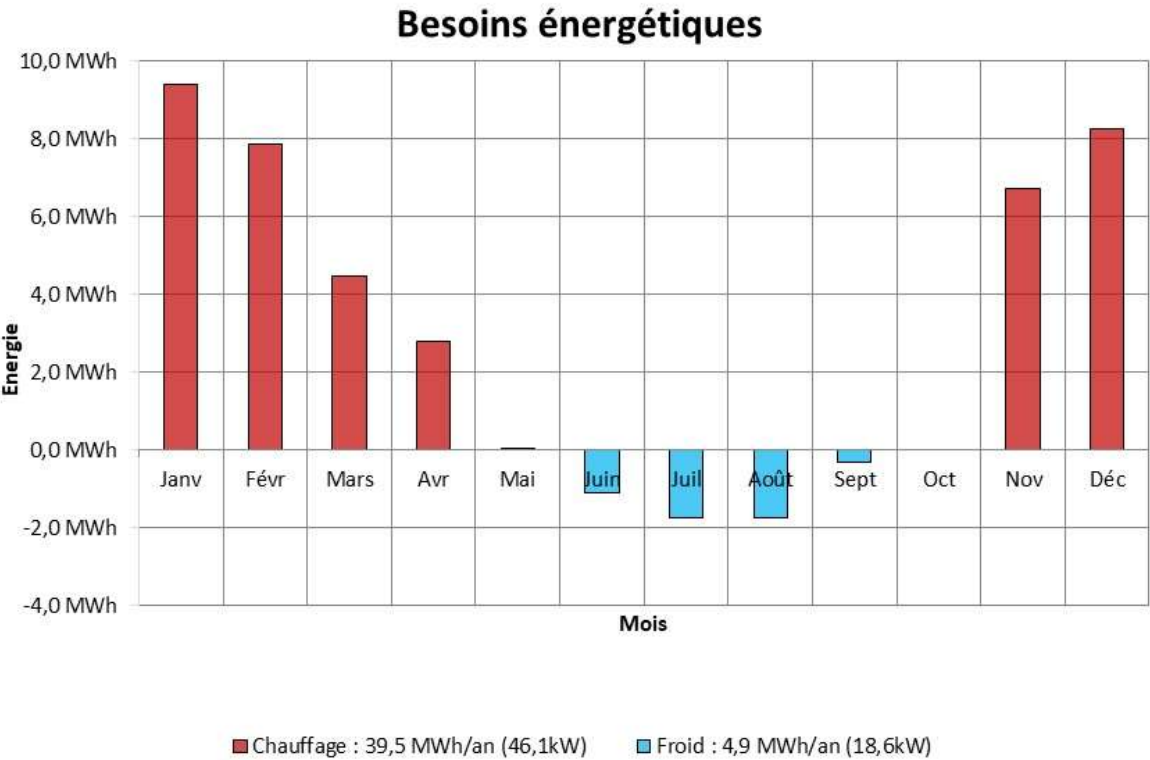
Les caractéristiques thermiques du projet sont synthétisées ci-dessous.

Zone	Waldeck-Rousseau
Surface	741 m ²
Déperditions Parois + Infiltration	957 W/°C 1,29 W/m ² .°C
Ventilation	CTA DF
	3 400 m ³ /h
	Rend : 75%
	Pilotage : Marche Arrêt sur Horloge + Modulation registres 10%-100% dans salle de réunion (sur 50% du débit total)
CHAUD	
T° consigne	20°C
Puissance brute	38,6 kW
FROID	
T° consigne	26°C
Puissance brute palfonnée (STD)	20,0 kW

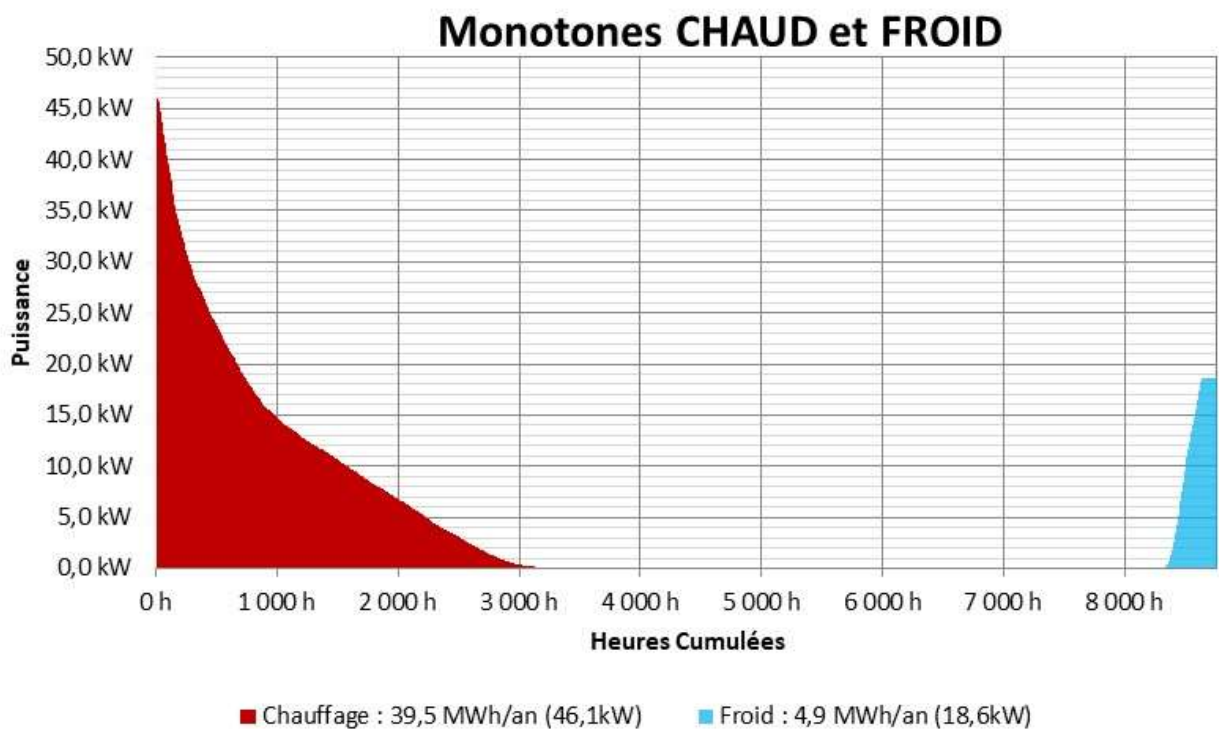
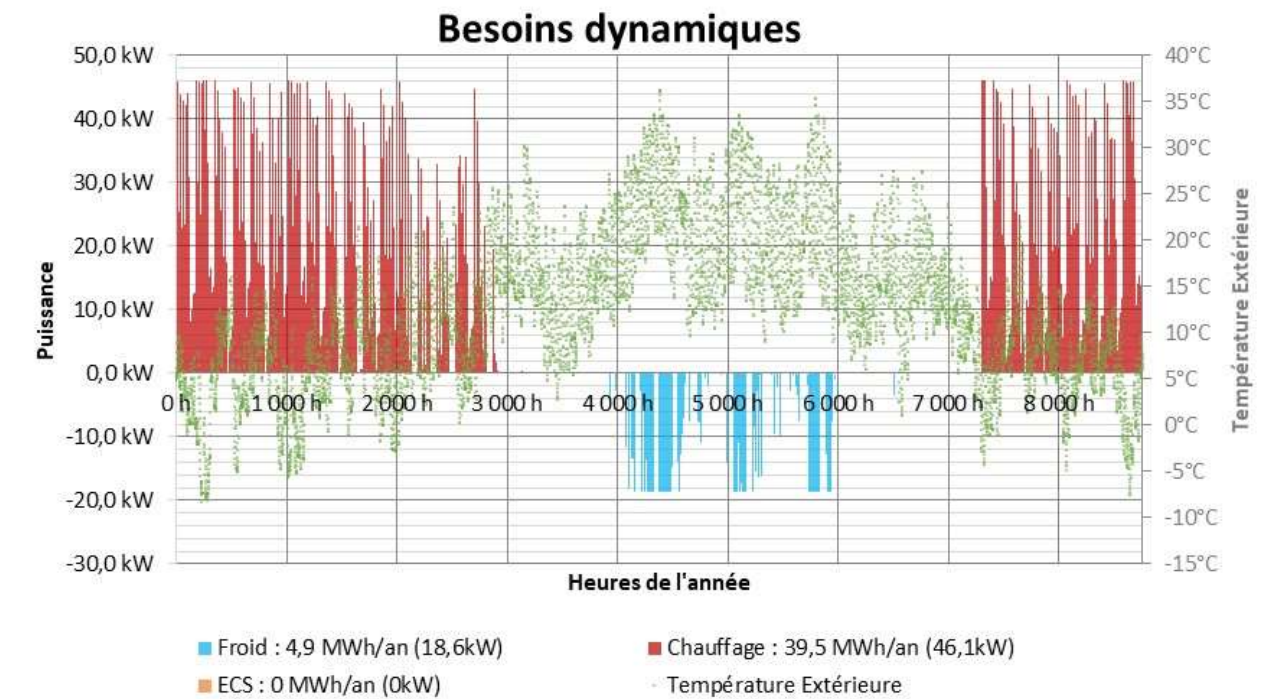
2.2 Besoins énergétiques

Les tableaux et le graphique ci-dessous présentent les besoins énergétiques utiles mensuels pour le bâtiment (= sortie production).

	Bâtiment Waldeck-Rousseau	
	Chauffage	Froid
Janvier	9,4 MWh	0,0 MWh
Février	7,9 MWh	0,0 MWh
Mars	4,5 MWh	0,0 MWh
Avril	2,8 MWh	0,0 MWh
Mai	0,0 MWh	0,0 MWh
Juin	0,0 MWh	1,1 MWh
Juillet	0,0 MWh	1,7 MWh
Août	0,0 MWh	1,7 MWh
Septembre	0,0 MWh	0,3 MWh
Octobre	0,0 MWh	0,0 MWh
Novembre	6,7 MWh	0,0 MWh
Décembre	8,3 MWh	0,0 MWh
Total	39,5 MWh	4,9 MWh
	53,4 kWh/m².an	6,6 kWh/m².an
Puissance max STD	46,1 kW	18,6 kW
	62,2 W/m²	25,1 W/m²



Les graphiques ci-dessous présentent les besoins de chauffage et de froid dynamiques et sous forme de courbe monotone.

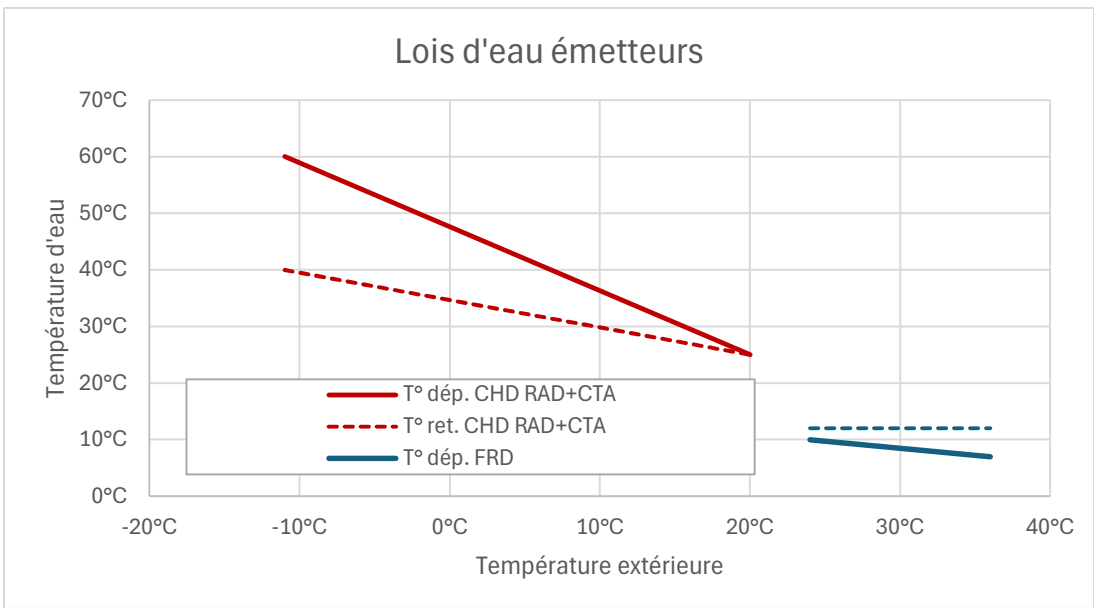


2.3 Régimes de température

Les émetteurs seront des radiateurs et batterie à eau réversibles de CTA

	Radiateur	Batterie Eau CTA
Régime d'eau CHAUD	60/40°C	60/40°C
Rafrachissement	non	oui 7°C/12°C

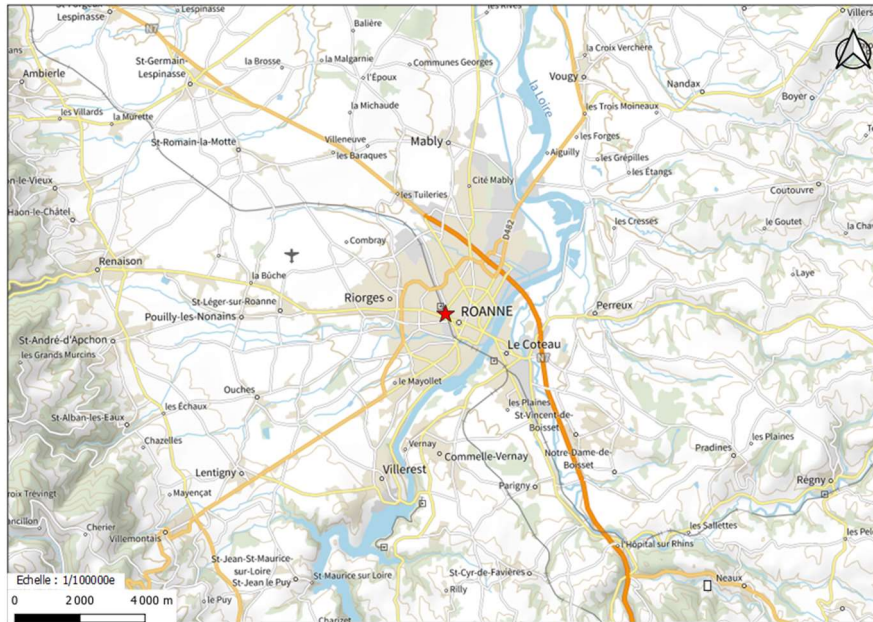
Les régimes de températures seraient les suivants :



3 Etude de la ressource géothermique

3.1 Contexte géologique

Le site d'étude est situé sur la commune de Roanne (42), 10 Rue Waldeck Rousseau, à une altitude de 280 m.



Plan de situation du projet

Le projet se situe dans le secteur géographique de la plaine de Roanne, correspondant au bassin sédimentaire de Roanne.

Le site est situé en extrémité Sud du bassin à proximité des terrains volcaniques / socles du seuil de Neulise.

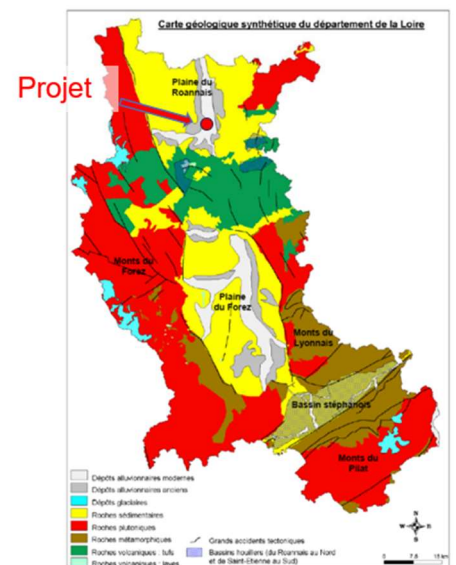
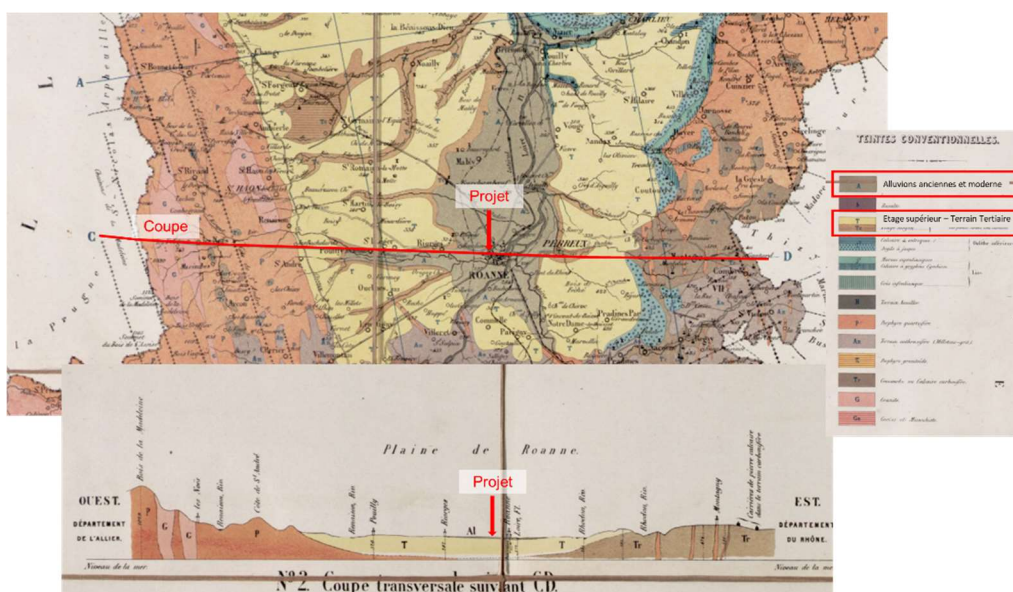
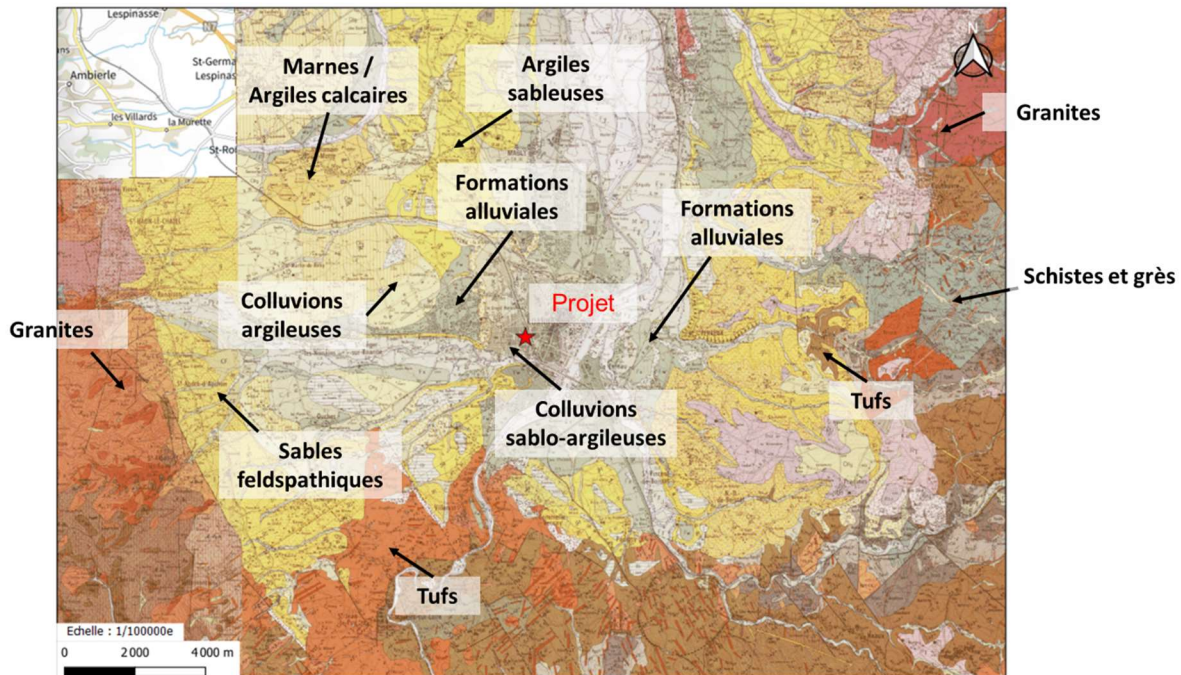


Figure 4 - Carte de synthèse géologique du département de la Loire



La carte ci-dessous présente la carte géologique du secteur d'étude.



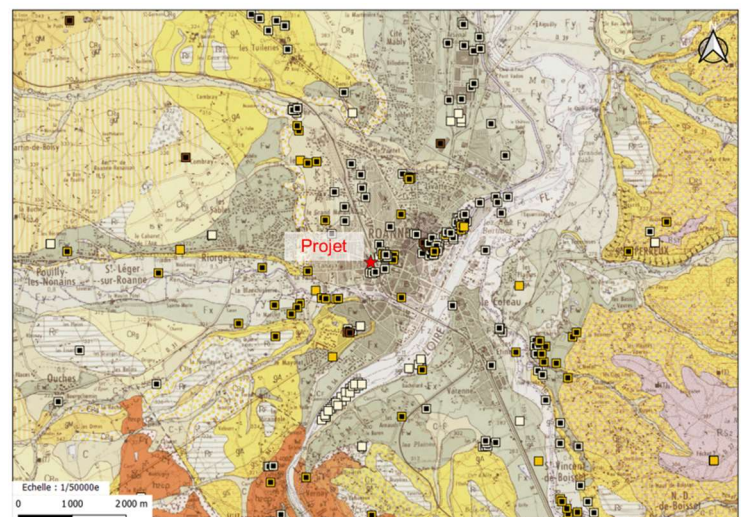
Extrait cartes géologique 1-50 000^{ème} (BRGM – 0672N)

La formation présente au droit du site correspond aux alluvions anciennes de la Loire (sables, graviers très argileux) qui surmonte la formation sédimentaire indifférenciée du Tertiaire, dit de l'Oligocène. En dessous des sédiments tertiaires, on pourra retrouver soit les terrains volcaniques ou le socle cristallin à une profondeur variable (en raison de la proximité du site avec le bord du bassin) mais qui sera supérieure à la profondeur visée par le projet.

Les forages référencés à proximité du site sont nombreux.

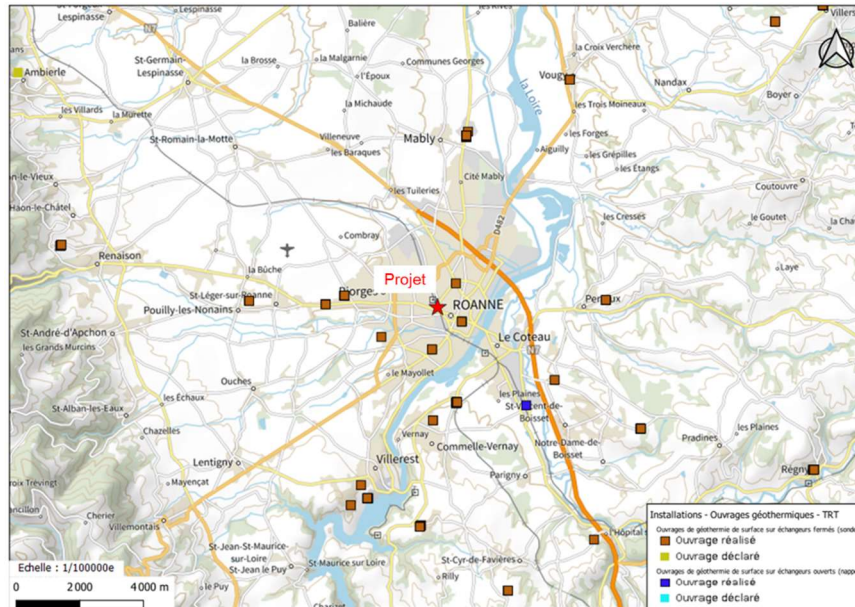
Les ouvrages présents confirment la présence des terrains sédimentaires jusqu'à une profondeur de de plus de 150 mètres à proximité du site.

Des forages d'eau sont très peu présents dans le secteur d'étude. L'eau est présente mais dans des terrains très argileux et donc non exploitable.



Dans le secteur d'étude la solution sur nappe ne semble pas possible avec une ressource faible.

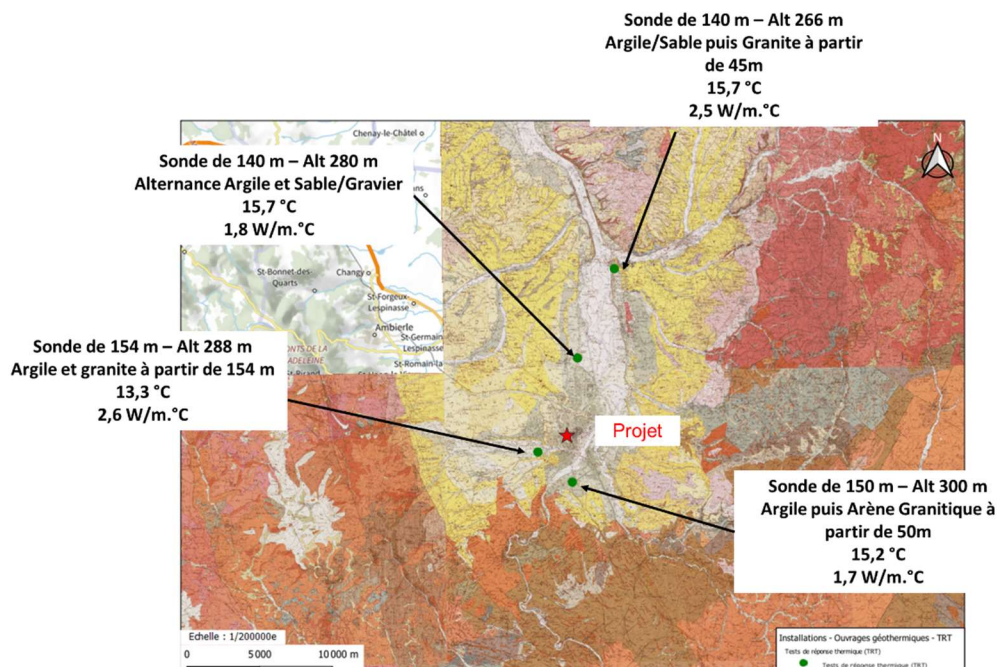
Les forages géothermiques (sondes  et nappe ) à proximité du projet sont présentés ci-dessous :



Seules des installations sur sondes sont présentes sur le secteur (hormis une installation sur nappe à 4 km au sud-est du site et qui semble correspondre à une installation de particulier) ce qui confirme que la ressource en eau est globalement faible et insuffisante pour la géothermie.

Des Tests de Réponse Thermique (TRT) sur des sondes géothermiques sont identifiés dans le secteur d'étude.

Ils permettent de mesurer les propriétés thermiques de sous-sol au droit de la sonde réalisée.



L'étude de la carte et de la notice géologique du BRGM ainsi que des forages réalisés à proximité a permis de réaliser la coupe lithostratigraphique prévisionnelle au droit du site :

- De 0 à 1 m : Terre végétale / remblais
- De 1 à 150 m : Alluvions anciennes puis bassin sédimentaire tertiaire Oligocène – Argiles, sables argileux, passages calcaires

3.2 Potentiel géothermique de surface

3.2.1 Potentiel sur nappe

La ressource géothermique sur nappe au droit du site correspond aux terrains sédimentaires tertiaires. C'est une ressource est très faible.

La solution géothermique sur nappe doit être écartée du projet.

3.2.2 Potentiel sur sondes

A partir des données géologiques du site, les caractéristiques thermiques prévisionnelles du sous-sol peuvent être définies.

Les propriétés thermiques sont estimées sur une profondeur de 150 m maximum.

Le choix de cette profondeur réduite (la réglementation autorise des sondes jusqu'à 200 m) est pour faciliter les travaux de foration (les terrains rencontrés ne sont pas totalement consolidés) et correspond à la profondeur atteinte par les ouvrages du secteur.

Le tableau ci-dessous présente les propriétés thermiques attendues à partir des données géologiques prévisionnelles en affectant les caractéristiques thermiques issues de la bibliographie générale.

Roche rencontrée	Epaisseur	CONDUCTIVITE THERMIQUE			CAPACITE THERMIQUE VOLUMIQUE		
		Mini	Maxi	Recommandée	Mini	Maxi	Recommandée
Argiles sableuses	50 m	0,90 W/m.K	2,22 W/m.K	1,60 W/m.K	1,60 MJ/m3.K	3,40 MJ/m3.K	2,40 MJ/m3.K
Sables argileux	50 m	1,73 W/m.K	5,02 W/m.K	2,40 W/m.K	2,20 MJ/m3.K	2,86 MJ/m3.K	2,50 MJ/m3.K
Argiles	50 m	0,90 W/m.K	2,22 W/m.K	1,60 W/m.K	1,60 MJ/m3.K	3,40 MJ/m3.K	2,40 MJ/m3.K
	150 m	1,18 W/m.K	3,15 W/m.K	1,87 W/m.K	1,80 MJ/m3.K	3,22 MJ/m3.K	2,43 MJ/m3.K

Les Tests de Réponse Thermique repérés dans la région (voir étude du contexte géologique) ont été réalisés dans des terrains assez équivalents (bassin sédimentaire) avec des résultats variables liés à la présence d'eau variable. Ils permettent d'avoir un regard critique sur les valeurs issues de la littérature. **La nature du sous-sol est favorable à la géothermie sur sondes avec des propriétés thermiques moyennes attendus.**

Les paramètres retenus pour le dimensionnement du champ de sondes géothermiques sont :

- Conductivité thermique du sous-sol : 1,8 W/m.°C
- Capacité thermique volumique du sous-sol : 2,3 MJ/m³.°C
- Température de surface : 11,5°C
- Gradient géothermique = 0,10 W/m²
- Température moyenne :
 - sur 130 m = 13,5°C
 - sur 150 m = 14°C

3.2.3 Conclusions sur le potentiel

Le potentiel sur sondes est consolidé et présente assez peu d'aléa (terrains sédimentaires très argileux).

Le potentiel sur nappe est très limité et la solution n'est pas envisageable.

3.3 Contraintes réglementaires

La géothermie de minime importance est actuellement régie par la réglementation suivante :

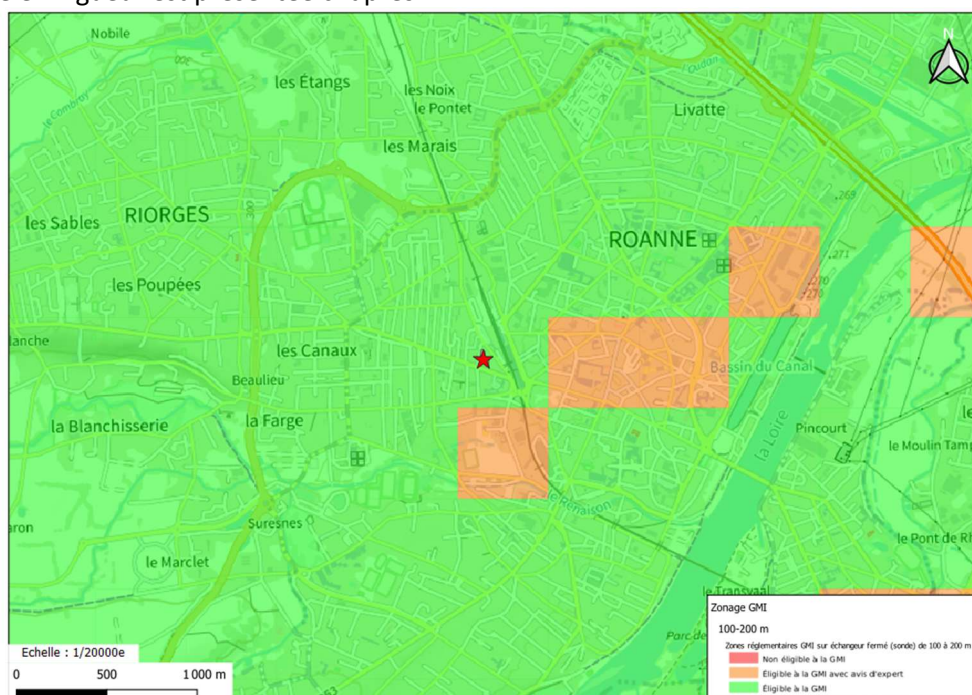
- Code Minier (1956) et code Minier Nouveau (ordonnance 20/01/2011)
- Décret n°78-498 du 28 mars 1978 (article 17)
- Décret n°2006-648 du 2 juin 2006
- Décret n°2006-649 du 2 juin 2006 (articles 2 et 3 relatifs aux travaux)

Le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 modifie les caractéristiques de la géothermie de minime importance soumise à déclaration afin d'en élargir le cadre. Ce régime déclaratif simplifié pour les activités géothermiques de minime importance est entré en vigueur **le 1er juillet 2015**.

Les caractéristiques des forages soumis à déclaration sont les suivantes :

- **Pour les activités avec échangeurs géothermiques fermés (= géothermie sur sondes) :**
 - Profondeur du forage < 200 mètres
 - Puissance thermique maximale prélevée du sous-sol < 500 kW
 - Site en zone Verte ou orange
 - Réalisation des ouvrages (sondes) par un foreur Certiforage module sondes

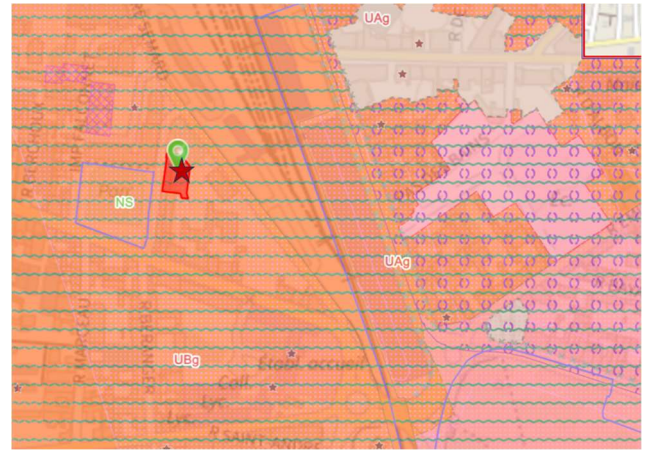
La cartographie en vigueur est présentée ci-après :



D'après la carte des zonages réglementaires pour les **SONDES**, le projet est situé en zone vert, ce qui le rend éligible à la géothermie de minime importance.

Du point de vue urbanisme, la parcelle est située en zone « Ubg » (zone urbaine) du PLU. Il n'y a pas d'incompatibilité pour les travaux de forage dans le PLU. D'autre part il est indiqué dans le PLU que le recours aux énergie renouvelable (tel que la géothermie) doivent être intégrés aux constructions de bâtiment administratif ou usage de bureaux (construction nouvelle ou réhabilitation)

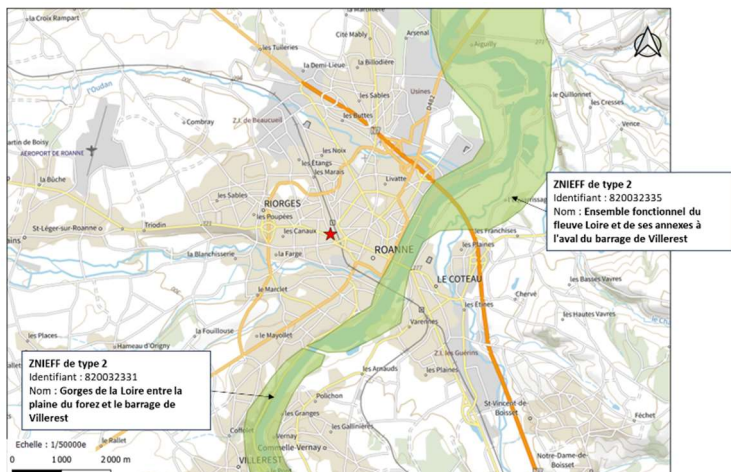
Pas de contrainte pour la géothermie.



Source : <https://www.geoportail-urbanisme.gouv.fr/>

Le site étudié ne se situe pas dans le périmètre d'un PPR naturel ou Technologique.

Pas de contrainte pour la géothermie.

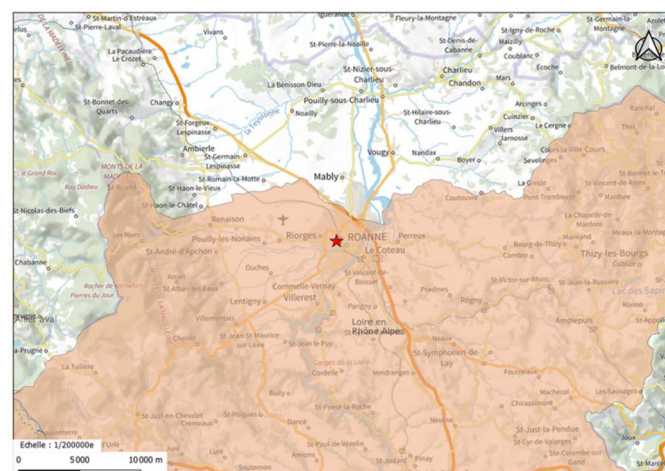


Le site étudié n'est pas situé en zone Natura 2000 ni en zone ZNIEFF.

Pas de contrainte aux travaux de géothermie.

Source : <https://www.geoportail.gouv.fr/>

La commune est située dans le SDAGE Rhône-Méditerranée et est située dans le périmètre du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) Loire en Rhône-Alpes.



Source : <https://www.gesteau.fr/>

SAGE Loire en Rhône-Alpes (<https://sage-loire-rhone-alpes.fr/>)

- Enjeux du SAGE :
 - Qualité des eaux
 - Ressource quantitative en eau
 - Patrimoine naturel
 - Inondation
 - Fleuve Loire
- Règles du SAGE :
 1. Limiter l'impact des plans d'eau
 2. Réglementer les prélèvements en eau
 3. Améliorer les performances des STEP des collectivités et des industries sur l'épuration du phosphore
 4. Équilibrer la fertilisation phosphorée
 5. Réduire les rejets d'eaux pluviales

Les enjeux et règles sont respectées par le respect de la réglementation GMI.

Pas de contrainte aux travaux de géothermie.

Le site d'étude n'est pas situé en zone ZRE (Zone de Répartition des Eaux).

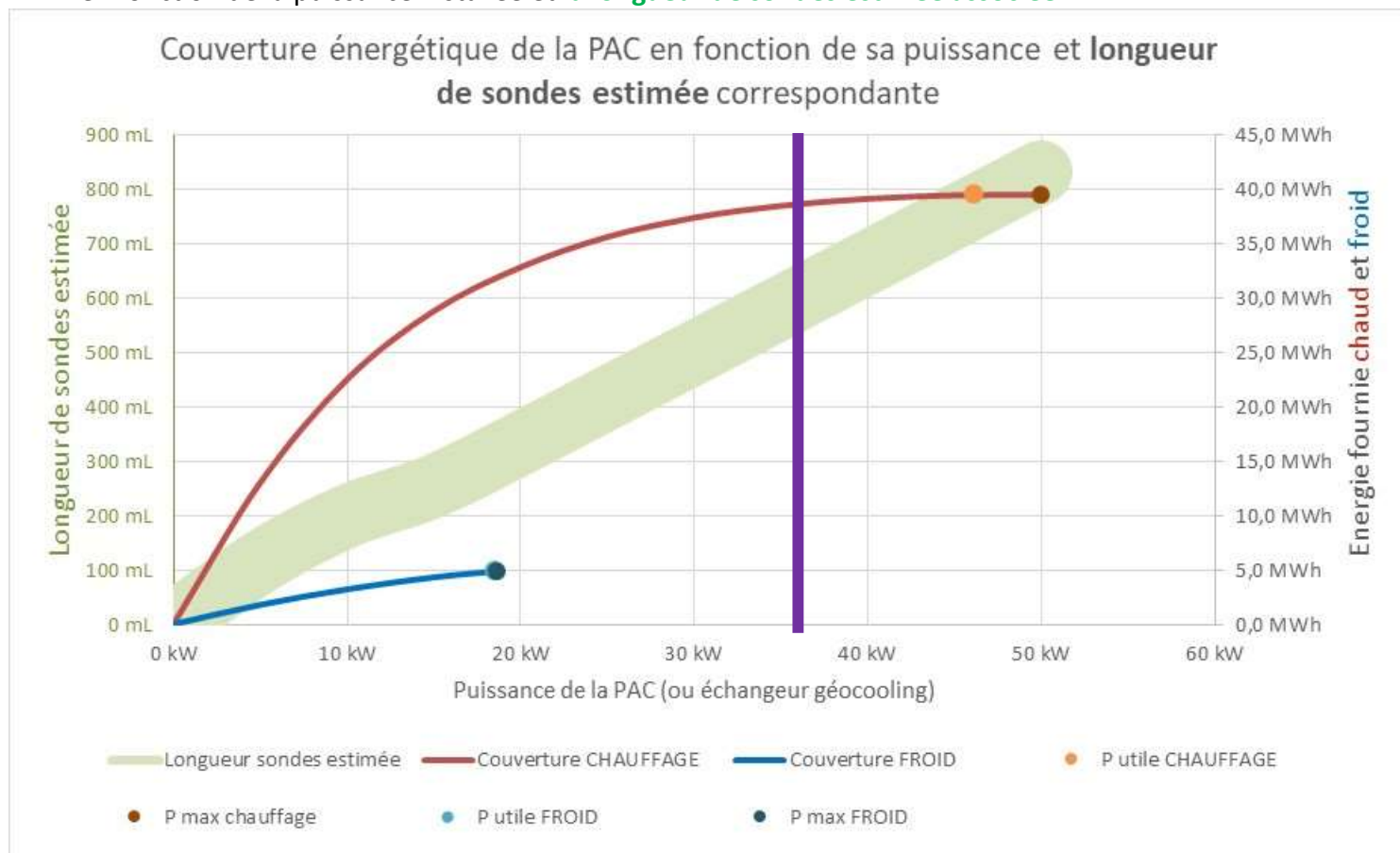
Pas de contrainte pour la géothermie.

Après consultation de la cartographie de l'ARS, le site d'étude n'est pas situé dans des périmètres de captage d'eau potable.

Pas de contrainte aux travaux de géothermie.

4 Proposition de scénario

Le graphique ci-dessous présente la couverture énergétique de la PAC **en chaud (Chauffage)** et **en froid** en fonction de la puissance installée et **la longueur de sondes estimée associée**.



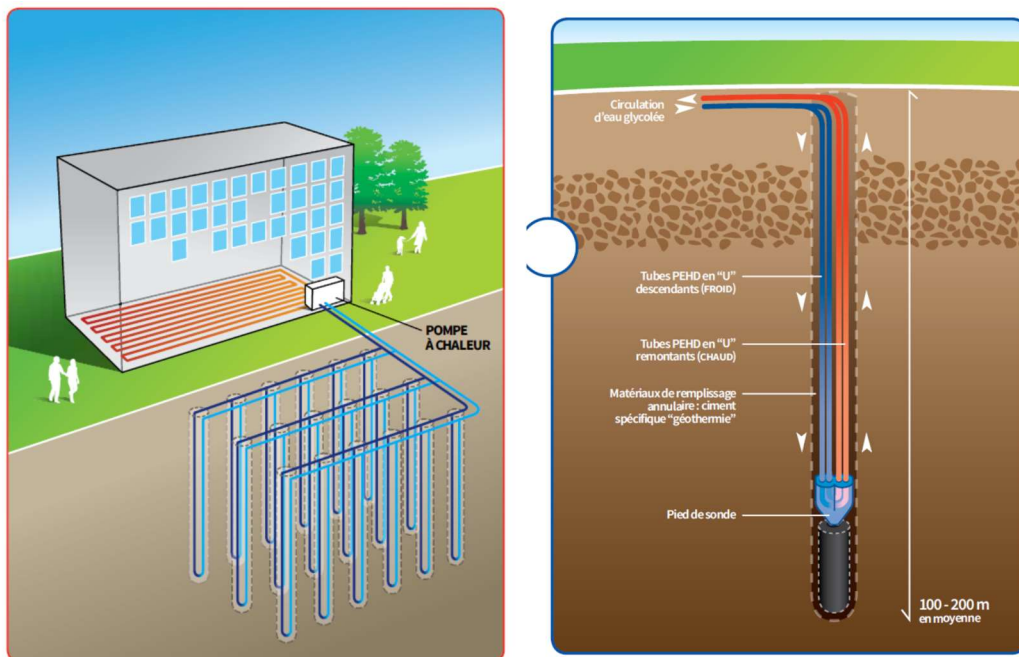
Nous proposons d'étudier un scénario géothermique :

1. **Scénario : géothermie en base pour la couverture des besoins chauffage et 100% du froid actif**
Installation de PAC avec une puissance calorifique moyenne de 35 kW permettant de couvrir quasiment tous les besoins énergétiques de chauffage, le manque de puissance nominale et le complément des besoins énergétiques étant satisfait par un appoint électrique
Le froid géothermique sera réalisé par la pompe à chaleur (réversible).

5 Etude technique de la géothermie

5.1 Principe de la production sur sondes

L'énergie thermique du sous-sol peut être récupérée en installant verticalement un échangeur de chaleur en forme de tube en U, appelé Sonde Géothermique Verticale (SGV). Les forages, de profondeur variable, sont souvent situés à côté, mais parfois aussi sous le bâtiment à chauffer/refroidir.



Dans la sonde, le fluide caloporteur circule en circuit fermé, récupère l'énergie thermique du sous-sol et alimente la pompe à chaleur (PAC).

La sonde géothermique verticale peut techniquement être installée dans n'importe quel milieu géologique. Sa profondeur va dépendre de la conductivité thermique du terrain, de la puissance de la PAC et de la demande en chaleur. Le regroupement de plusieurs SGV, appelé champ de sondes géothermiques, permet de chauffer et rafraîchir des bâtiments de grande taille avec des besoins énergétiques importants. Les sondes sont raccordées à un collecteur qui alimente une à plusieurs PAC. La chaleur est extraite du sous-sol durant la saison de chauffage. Pour le rafraîchissement passif ou la climatisation, la chaleur est prélevée des bâtiments et transmise dans le champ de sondes géothermiques, ce qui permet de recharger thermiquement le terrain et d'équilibrer l'exploitation.

Des mesures de température des capteurs dans les puits verticaux démontrent que le terrain se refroidit rapidement et durablement les premières années. Ensuite, une température d'équilibre semble apparaître. Pour vérifier cet impact et dimensionner correctement un champ de sondes, une modélisation des incidences thermiques est nécessaire.

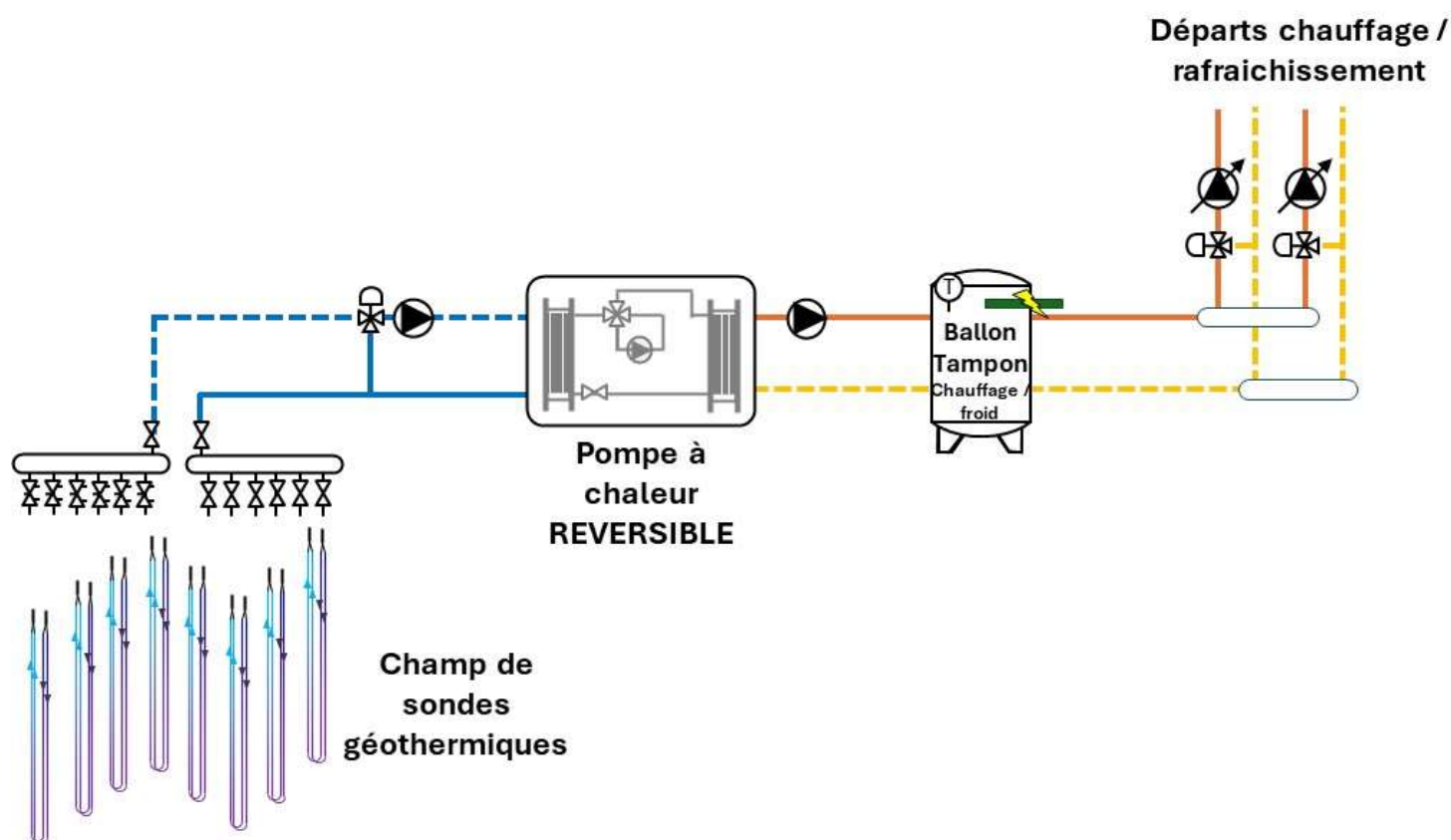
5.2 Scénario – base géothermie chaud – froid actif (35 kW)

5.2.1 Présentation du scénario

Nous proposons un scénario avec la mise en place de pompe à chaleur géothermique de 35 kW chaud (et froid en été) permettant de couvrir la quasi-totalité des besoins énergétiques de chauffage et la totalité des besoins de froid du projet.

L'appoint chaud sera assuré par résistance électrique

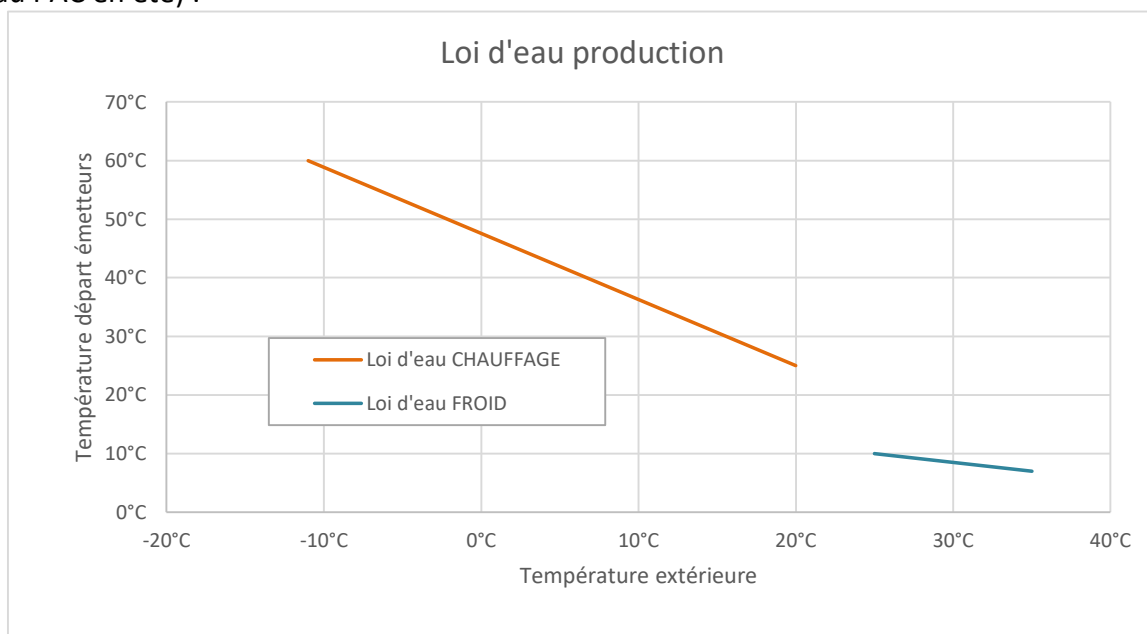
Le schéma ci-dessous illustre le principe de la solution géothermique du scénario proposé.



Concernant la régulation :

- Modes :
 - Le mode chauffage est actif en période de chauffe
 - Le mode froid est actif en période de rafraîchissement
 - Un mode arrêt est prévu par commande utilisateur (permet d'avoir des périodes d'arrêt de l'installation en mi-saison)
 - Commande utilisateur : Arrêt / Chauffage / Froid
- Mode chauffage :
 - Mode autorisé en Hiver
 - La pompe à chaleur est en mode chaud et sera régulée avec une loi d'eau côté Chaud selon température extérieure (calée sur les circuits)
 - Les pompes auxiliaires « évaporateur/sondes » et « condenseur/ballon » seront asservies à la PAC (arrêt du compresseur)
 - L'appoint chauffage (électrique) est autorisé lorsque la température en aval du ballon est inférieure à la consigne (selon T° extérieure) avec une temporisation importante (plusieurs heures)
 - Lorsque la température de non-chauffe est atteinte, l'installation est totalement arrêtée
- Mode froid :
 - Mode autorisé en Été
 - La pompe à chaleur est en mode froid et sera régulée avec une loi d'eau côté froid selon température extérieure (calée sur les circuits)
 - Les pompes auxiliaires « condenseur/sondes » et « évaporateur/ballon » seront asservies à la PAC (arrêt du compresseur)
 - Lorsque la température de non-rafraîchissement est atteinte, l'installation est totalement arrêtée

Le graphique ci-dessous présente les régimes de températures de production (loi d'eau PAC en hiver et loi d'eau PAC en été) :



Les caractéristiques prévisionnelles de chaque équipement sont :

- **Pompe à chaleur chauffage / froid :**

- Nombre : 1
- Nombre de compresseur par PAC : 1
- Mode de régulation : sur sortie eau chaude / sur sortie eau froide
- **Puissance calorifique utile :**
 - **à B0W35 : $\approx 33 \text{ kW}$**
 - **à B8W45 (point moyen chauffage) : $\approx 38 \text{ kW}$**
- **COP :**
 - **B0W35 (30% MPG) : $\approx 4,2$**
 - **B8W45 (30% MPG) : $\approx 4,0$**
- **Puissance frigorifique utile :**
 - **à W12W35 : $\approx 36 \text{ kW}$**
 - **à W12B25 (point moyen froid) : $\approx 40 \text{ kW}$**
- **EER :**
 - **W12W35 : $\approx 4,5$**
 - **W12B25 (30% MPG) : $\approx 6,5$**
- T_{\min} en sortie d'évaporateur : $\approx -5^{\circ}\text{C}$
- **T_{\max} en sortie de condenseur : $> 60^{\circ}\text{C}$**

- Ballon tampon chauffage : ~ 400 Litres selon préconisations fabricant

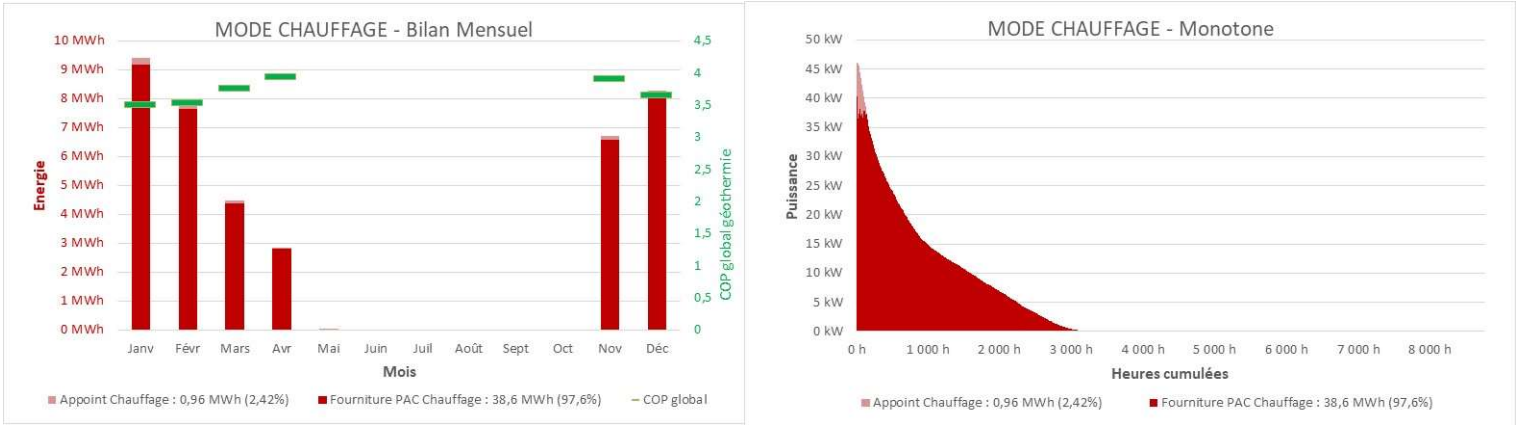
- Pompe de circulation :

- Sondes : $7 \text{ m}^3/\text{h}$ / 9 mCE (asservie au fonctionnement de la PAC)
- Ballon : $6 \text{ m}^3/\text{h}$ / 5 mCE (asservie au fonctionnement de la PAC)

5.2.2 Bilan énergétique chaud

Le tableau ci-dessous présente le bilan énergétique de la solution géothermie du scénario pour la production de chauffage.

MODE CHAUFFAGE								
Année 10 Mois	Besoins Chauffage	BILAN PAC				BILAN GEOTH.		Appoint Chauffage
		Couverture		Electricité PAC	COP PAC	Electricité aux	COP global	
Janvier	9,4 MWh	9,2 MWh	97,3%	2,4 MWh	3,75	0,2 MWh	3,51	0,3 MWh
Février	7,9 MWh	7,6 MWh	97,0%	2,0 MWh	3,78	0,1 MWh	3,53	0,2 MWh
Mars	4,5 MWh	4,4 MWh	98,2%	1,0 MWh	4,20	0,1 MWh	3,75	0,1 MWh
Avril	2,8 MWh	2,8 MWh	99,6%	0,6 MWh	4,62	0,1 MWh	3,94	0,0 MWh
Mai	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0%	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Juin	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Juillet	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Août	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Septembre	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Octobre	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Novembre	6,7 MWh	6,6 MWh	97,6%	1,5 MWh	4,27	0,1 MWh	3,91	0,2 MWh
Décembre	8,3 MWh	8,0 MWh	97,4%	2,0 MWh	3,94	0,2 MWh	3,66	0,2 MWh
TOTAL	39,5 MWh	38,6 MWh	97,6%	9,7 MWh	3,98	0,8 MWh	3,66	1,0 MWh



La géothermie permet de couvrir 39 MWh/an de chaud soit 97% des besoins de chauffage.
Le COP annuel de la PAC est de **4,0**. En incluant les auxiliaires de distribution (pompes PAC) le COP annuel s’abaisse à 3,6.

5.2.3 Bilan énergétique froid

Le tableau ci-dessous présente le bilan énergétique de la solution géothermie du scénario pour la production de froid.

MODE FROID ACTIF								
Année 10 Mois	Besoins FROID	BILAN PAC				BILAN GEOTH.		Froid non couvert
		Couverture		Electricité PAC	EER PAC	Electricité aux	EER global	
Janvier	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Février	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Mars	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Avril	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Mai	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Juin	1,1 MWh	1,1 MWh	100,0%	0,2 MWh	6,68	0,1 MWh	4,30	0,0 MWh
Juillet	1,7 MWh	1,7 MWh	100,0%	0,3 MWh	6,64	0,1 MWh	4,77	0,0 MWh
Août	1,7 MWh	1,7 MWh	100,0%	0,3 MWh	6,61	0,1 MWh	4,74	0,0 MWh
Septembre	0,3 MWh	0,3 MWh	100,0%	0,0 MWh	6,73	0,1 MWh	2,35	0,0 MWh
Octobre	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Novembre	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
Décembre	0,0 MWh	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh	-	0,0 MWh
TOTAL	4,9 MWh	4,9 MWh	100,0%	0,7 MWh	6,65	0,4 MWh	4,38	0,0 MWh



La géothermie permet de couvrir 4,9 MWh/an de froid soit 100% des besoins de froid.
Le EER annuel de la PAC est de 6,6. En incluant les auxiliaires de distribution (pompes PAC) le EER annuel s’abaisse à 4,4.

5.2.4 Dimensionnement du champ de sondes

Les simulations du champ de sondes ont été menées à l'aide du logiciel EED®.

Afin de préserver les performances des pompes à chaleur, on impose les températures limites suivantes à l'issue de 25 ans de fonctionnement :

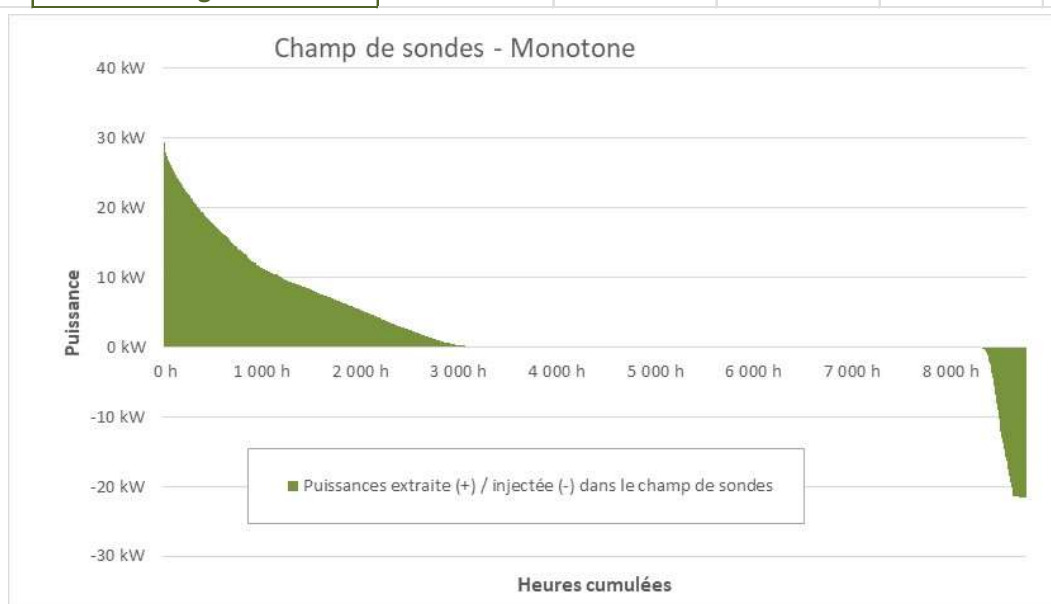
- Limite basse : $> -3^{\circ}\text{C}$ en sortie d'évaporateur (mode chaud)
- Limite haute : $< 40^{\circ}\text{C}$ en entrée champ de sondes

Le nombre de sondes nécessaires pour le scénario est de **5 sondes de 130 mètres de profondeur.**

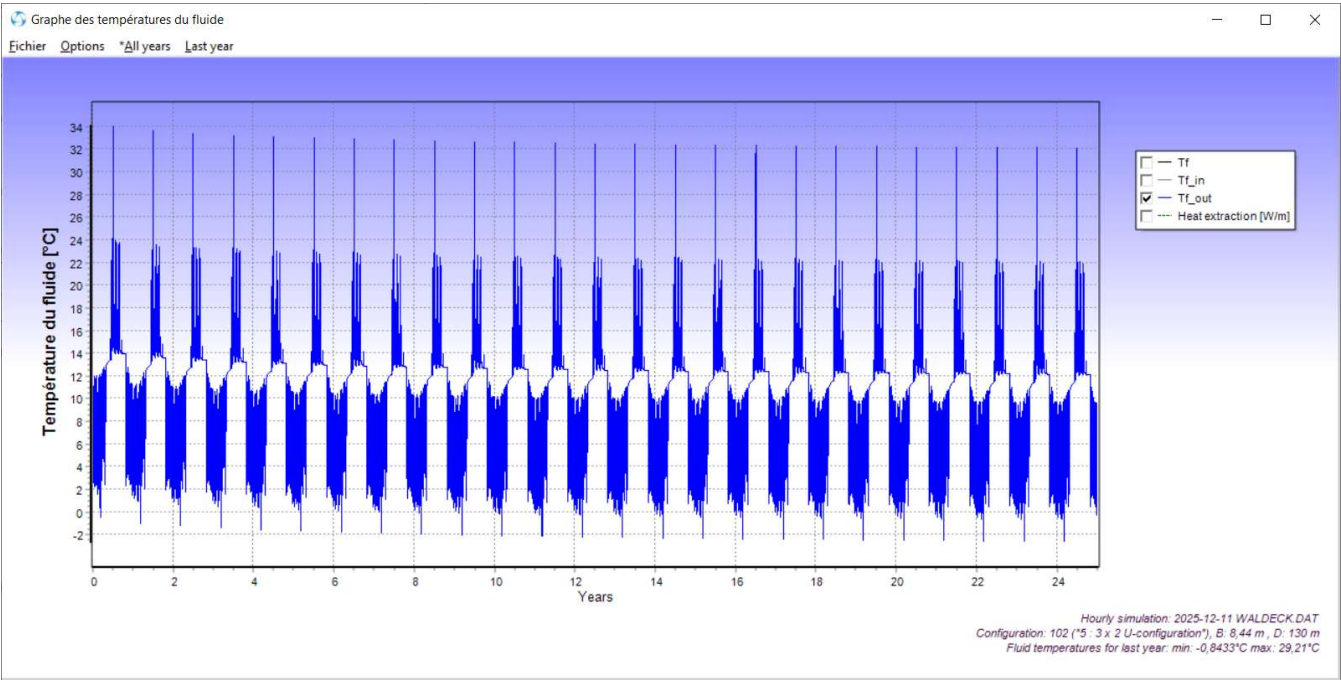
Compte-tenu du débit dans les sondes (7 m³/h) et des caractéristiques des sondes (double-U en DN32, sans écarteurs, cimentation à 2 W/m.°C), la résistance thermique équivalente des sondes est de 0,13 m.°C/W.

Le tableau ci-dessous présente le bilan énergétique, les appels de puissance et les régimes de température dans le champ de sondes (en année 10).

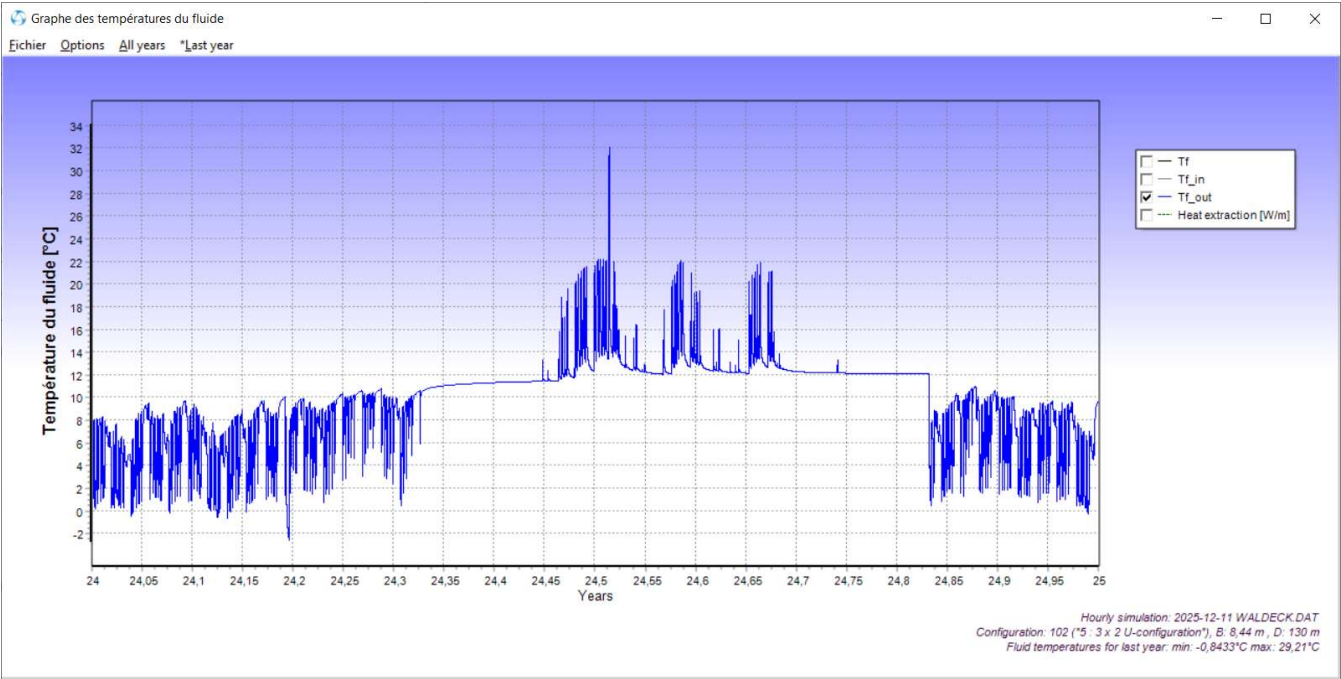
Année 10 Mois	Energie		Puissance maximale		Température moyenne champ de sondes		
	Extraite	Injectée	Extraite	Injectée	Minimale	Moyenne	Maximale
Janvier	6,7 MWh	0,0 MWh	27,4 kW	0,0 kW	1,4°C	6,4°C	10,0°C
Février	5,6 MWh	0,0 MWh	27,9 kW	0,0 kW	1,2°C	6,6°C	10,3°C
Mars	3,3 MWh	0,0 MWh	29,1 kW	0,0 kW	-1,2°C	8,2°C	10,7°C
Avril	2,2 MWh	0,0 MWh	28,2 kW	0,0 kW	2,6°C	9,7°C	11,3°C
Mai	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0 kW	0,0 kW	11,1°C	11,7°C	11,9°C
Juin	0,0 MWh	-1,3 MWh	0,0 kW	21,5 kW	11,9°C	12,9°C	20,8°C
Juillet	0,0 MWh	-2,0 MWh	0,0 kW	21,6 kW	12,6°C	14,4°C	29,9°C
Août	0,0 MWh	-2,0 MWh	0,0 kW	21,6 kW	12,6°C	14,1°C	21,2°C
Septembre	0,0 MWh	-0,3 MWh	0,0 kW	21,4 kW	12,7°C	13,1°C	20,3°C
Octobre	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0 kW	0,0 kW	12,6°C	12,6°C	12,7°C
Novembre	5,0 MWh	0,0 MWh	29,3 kW	0,0 kW	2,5°C	8,5°C	11,5°C
Décembre	6,0 MWh	0,0 MWh	29,0 kW	0,0 kW	1,6°C	7,3°C	10,7°C
TOTAL	28,9 MWh	-5,6 MWh	29,3 kW	21,6 kW	-1,2°C	10,5°C	29,9°C
	Recharge : 19%						



Le graphique ci-dessous présente le profil mensuel de la température dans les sondes géothermiques pour 25 ans de fonctionnement.



Le graphique ci-dessous présente les températures dynamiques en entrée du champ de sondes pour l'année 25 :



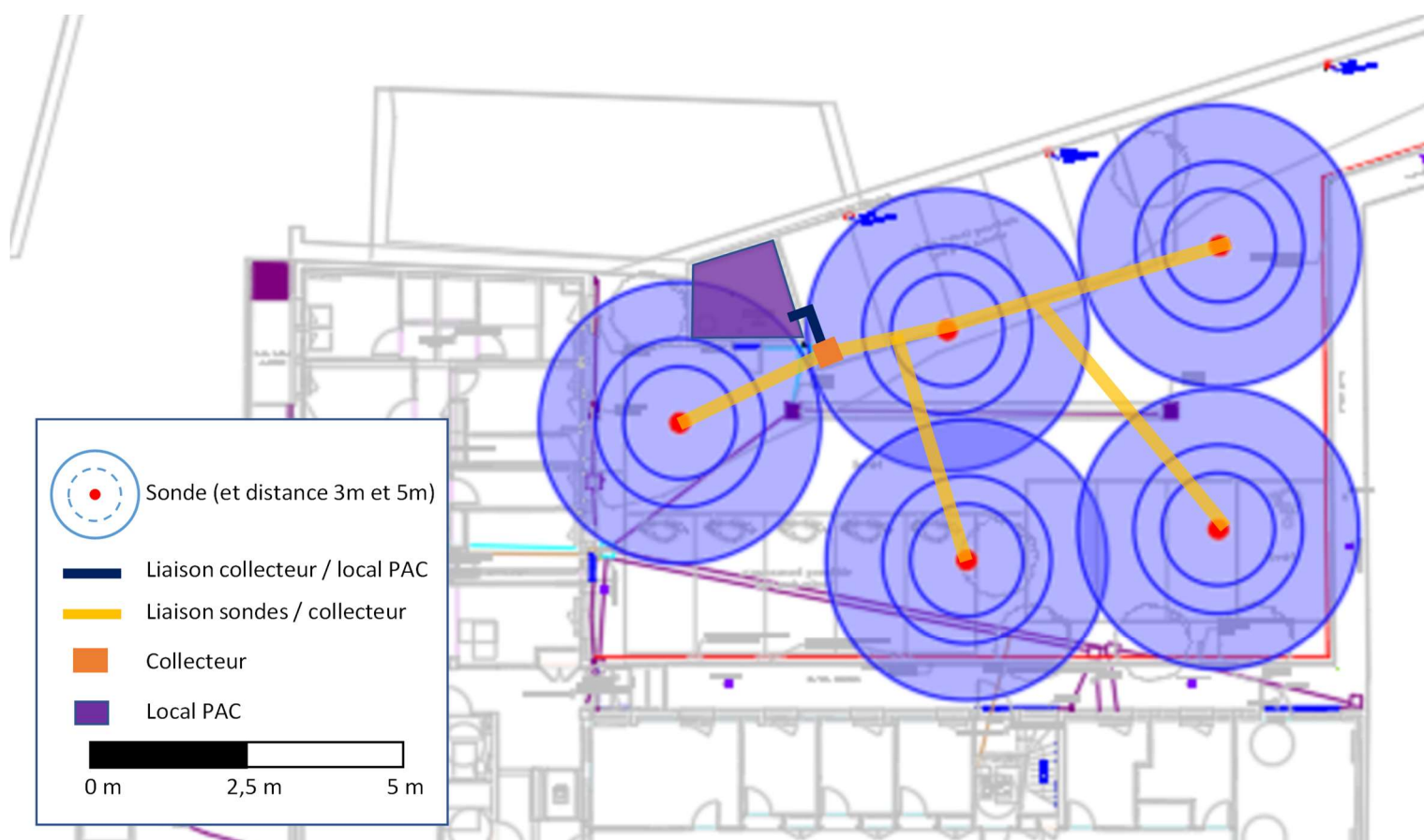
5.2.5 Implantation prévisionnelle des sondes

Le projet de sondes géothermiques est tenu de respecter les prescriptions générales listées dans l'arrêté du 25 juin 2015, notamment celles qui concernent les conditions d'implantation des sondes.

Il conviendra de s'assurer de l'absence de canalisations d'eaux usées, d'eau pluviale ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines à moins de 2 m des sondes e

Les sondes ont été implantées en respectant un espacement minimal de 8 m (et 10 dès que possible).

La figure suivante représente l'implantation potentielle pour le scénario simulé. Il s'agit d'une implantation prévisionnelle au stade de cette étude. En fonction des contraintes ou des évolutions du projet, il est possible de proposer d'autres implantations.



6 Bilan économique et environnemental

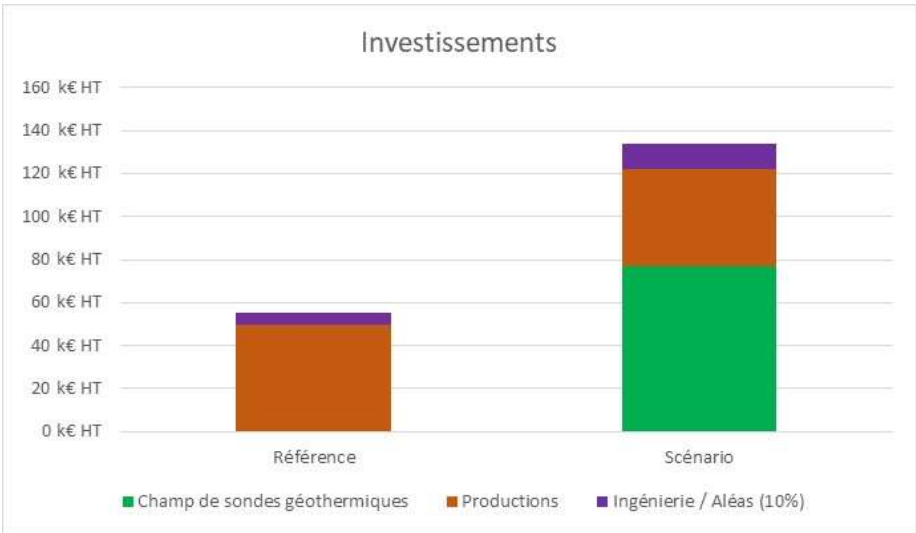
Le bilan économique et environnemental est réalisé en comparant la solution géothermique à une solution de référence.

Une solution Pompe à Chaleur sur air + appoint chaudière Gaz est proposée en référence.

6.1 Coûts d'investissement

Le tableau et le graphique ci-dessous présentent les couts d'investissement du scénario géothermique comparé à la référence.

Investissements	REFERENCE PAC sur air + Appoint Gaz	SCENARIO Géothermie 35 kW réversible / 650 m de sondes
Champ de sondes géothermiques	-	77 000 € HT
<i>Réalisation des sondes</i>		53 000 € HT
<i>Collecteur + Raccordement au local PAC</i>		4 000 € HT
<i>Raccordement des sondes (compris tranchées)</i>		15 000 € HT
<i>Finitions de surface</i>		Hors lot
<i>Remplissage en glycol (30% MPG)</i>		5 000 € HT
Productions	50 000 € HT	45 000 € HT
<i>PAC sur air et envrionnement / Chaudière Gaz</i>	50 000 € HT	
<i>PAC géothermique et son environnement (hydraulique, élec)</i>	-	45 000 € HT
Ingénierie / Aléas (10%)	5 000 € HT	12 000 € HT
Total investissements	55 000 € HT	134 000 € HT
Surinvestissement / REFERENCE	-	79 000 € HT



6.2 Coûts d'exploitation

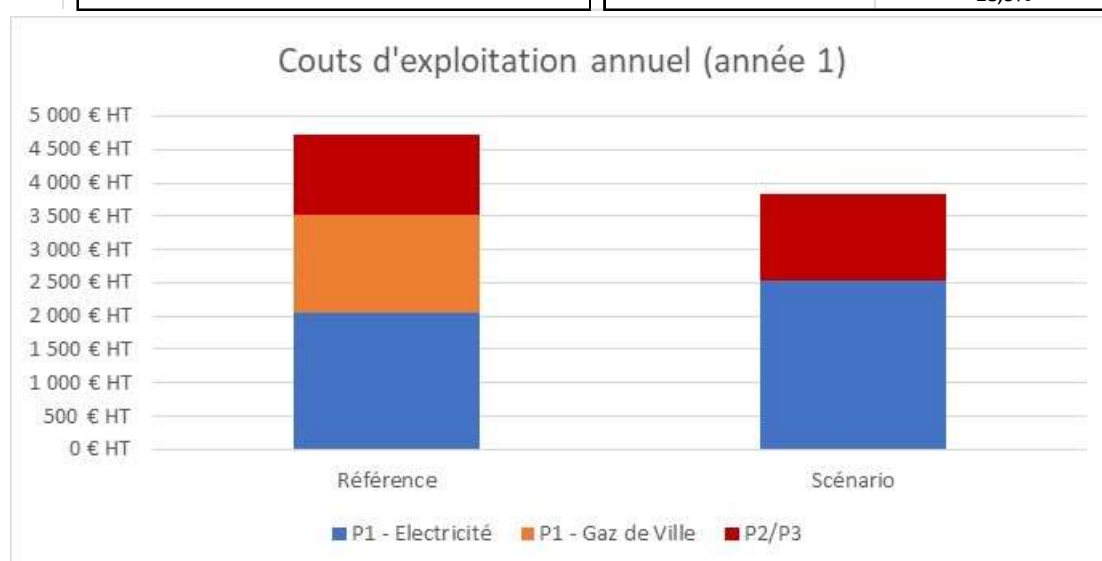
Les coûts d'exploitation intègrent les achats d'énergie (P1) et l'entretien/maintenance des installations (P2/P3).

Nous avons considéré les coûts des énergies moyens suivants :

- **Electricité : 200 € HT/MWh abonnement compris**
- **Gaz Naturel : 90 € HT/MWh PCS abonnement compris**

Le tableau et le graphique ci-dessous présentent les coûts d'exploitation du scénario géothermique comparé à la référence :

	REFERENCE PAC sur air + Appoint Gaz		SCENARIO Géothermie 35 kW réversible / 650 m de sondes	
Electricité	Hiver	9,5 MWh	Hiver	10,8 MWh
	Eté	0,7 MWh	Eté	1,8 MWh
	Cout Total	2 056 € HT	Cout Total	2 522 € HT
	Prix moyen	200,0 € HT/MWh	Prix moyen	200,0 € HT/MWh
Gaz de Ville	Hiver	15,0 MWh PCS		
	Eté	1,2 MWh PCS		
	Cout Total	1 457 € HT		
	Prix moyen	90,00 € HT/MWh		
P1	Cout Total P1	3 513 € HT	Cout Total P1	2 522 € HT
	Référence		Economie	992 € HT 28,2%
P2 / P3	Cout P2 PAC + Gaz	700 € HT	Cout P2 Géoth	800 € HT
	Cout P3 PAC + Gaz	500 € HT	Cout P3 Géoth	500 € HT
	TOTAL EXPLOITATION	4 713 € HT	TOTAL EXPLOITATION	3 822 € HT
	Référence		Economie	892 € HT 18,9%



6.3 Bilan économique

Le temps de retour se calcule par le rapport au coût d'investissement, après aide à l'investissement éventuelle, sur l'économie annuelle d'exploitation.

Le projet pourrait prétendre à des CEE (Certificats d'Economie d'Energie) avec la fiche BAT-TH-162 Système géothermique mise en place à compter du 1^{er} janvier 2026. Elle pourrait également bénéficier du dispositif « coup de pouce » avec remplacement d'une chaudière Gaz existante.

Nous présentons un bilan économique SANS et AVEC les CEE.

Nous proposons ici une estimation des CEE envisageables avec la fiche BAT-TH-162.

5. Montant de certificats en kWh cumac

Pour une PAC de puissance thermique nominale ≤ 400 kW :

Efficacité énergétique saisonnière (E _{tas})	Zone climatique	Montant kWh cumac par m ²		Surface chauffée (m ²)	Secteur	Facteur correctif	Facteur R
		Chauffage	Chauffage et ECS				
111% \leq E _{tas} < 126%	H1	1400	1600	X S 741 m ²	Hôtellerie, restauration	0,7	X R 1 Car P PAC > 40% P tot
	H2	1100	1400		Santé	1,1	
	H3	800	1000		Enseignement	0,8	
126% \leq E _{tas} < 175%	H1	1500	1800		Bureaux	1,2	
	H2	1200	1500		Commerces	0,9	
	H3	800	1100		Autres	0,7	
175% \leq E _{tas}	H1	1600	1900				
	H2	1300	1600				
	H3	900	1200				

Le projet pourrait prétendre à 1 333 MWh cumac.

Avec le dispositif « coupe de pouce », en considérant la dépose d'une chaudière fossile Gaz Naturel, les CEE sont multipliés par 5 soit un total de 6 665 MWh cumac.

En considérant une valorisation à 7,5 €/MWh cumac, les CEE pourraient rapporter 50 k€.

Le bilan économique intègre une augmentation des coûts d'énergie pour calculer un temps de retour avec inflation :

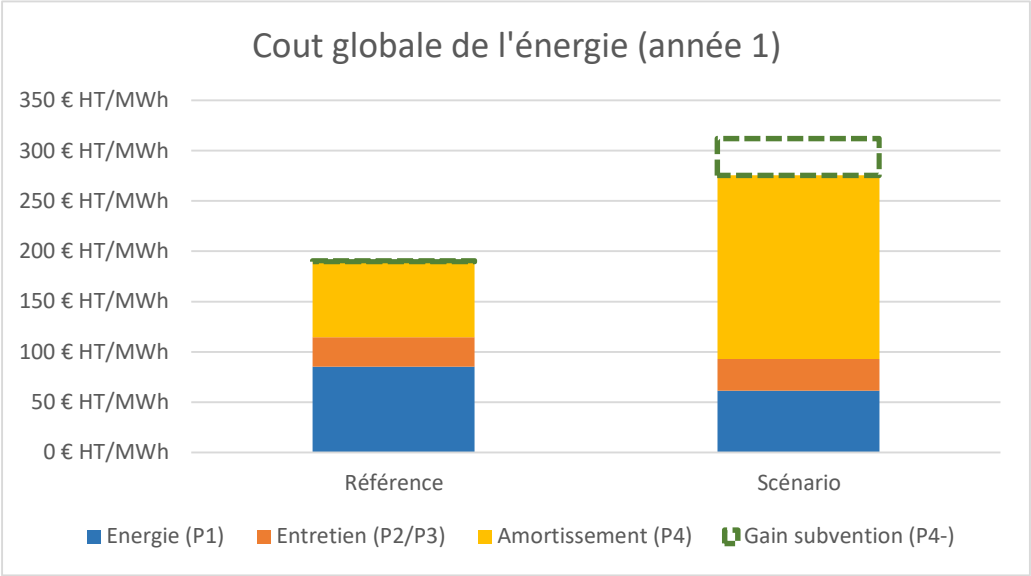
- Augmentation 1 :
 - Electricité : 2%/an
 - Gaz de ville : 2%/an
 - Entretien : 1%/an
- Augmentation 2 :
 - Electricité : 4%/an
 - Gaz de ville : 4%/an
 - Entretien : 2%/an

6.3.1 Bilan économique sans CEE

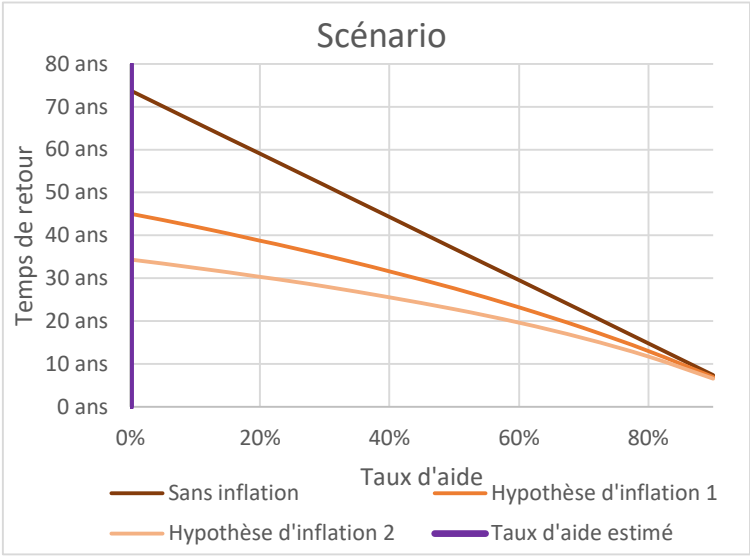
Le tableau ci-dessous présente le bilan économique du projet.

		REFERENCE PAC sur air + Appoint Gaz	SCENARIO Géothermie 35 kW réversible / 650 m de sondes
Investissement		66 000 € TTC	160 800 € TTC
Surinvestissement		Référence	94 800 € TTC
Exploitation	P1	4 216 € TTC	3 026 € TTC
	P2	840 € TTC	960 € TTC
	P3	600 € TTC	600 € TTC
	Total	5 656 € TTC	4 586 € TTC
	Economie	Référence	1 070 € TTC 18,9%
Cout de la chaleur	Taux de subvention total	0%	0%
	CEE	-	Non chiffré
	Reste à financer	55 000 € HT	134 000 € HT
	Amortissement (P4) 20 ans / 3%	3 697 € TTC/an	9 007 € TTC/an
	Exploitation	5 656 € TTC/an	4 586 € TTC/an
	Cout global	9 353 € TTC/an	13 593 € TTC/an
	Cout de l'énergie	189,6 € TTC/MWh	275,5 € TTC/MWh
Temps de retour	Brut - sans subv	Référence	73,8 ans
	Brut - avec subv.		73,8 ans
	Inflation 1 - avec subv		45,1 ans
	Inflation 2 - avec subv		34,4 ans

Le graphique ci-dessous présente la répartition des postes dans le prix de l'énergie produite par l'installation pour chaque scénario.



Le graphique ci-dessous présente l'évolution de temps de retour du scénario par rapport à la référence en fonction du taux de subvention.

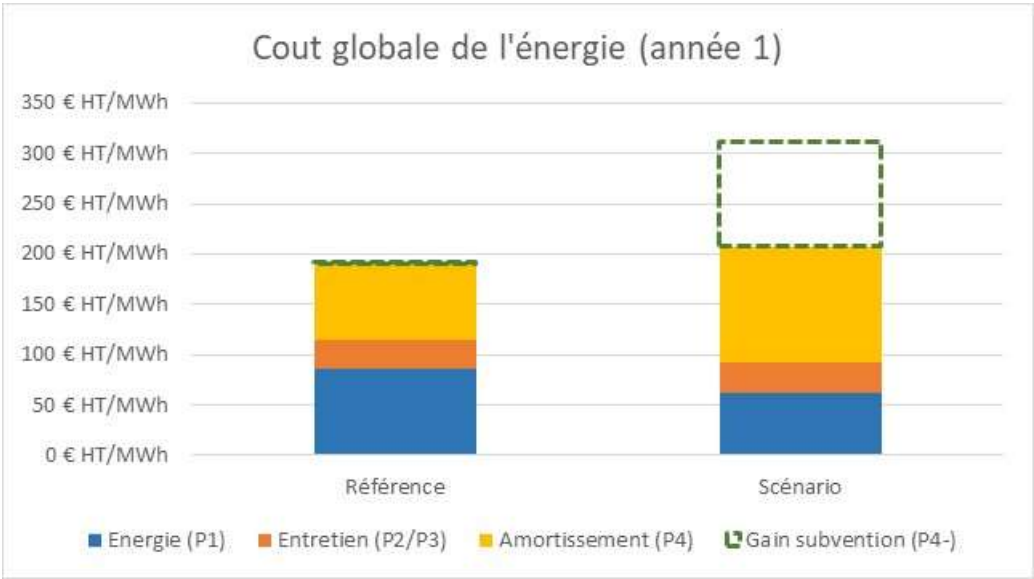


6.3.2 Bilan économique avec CEE

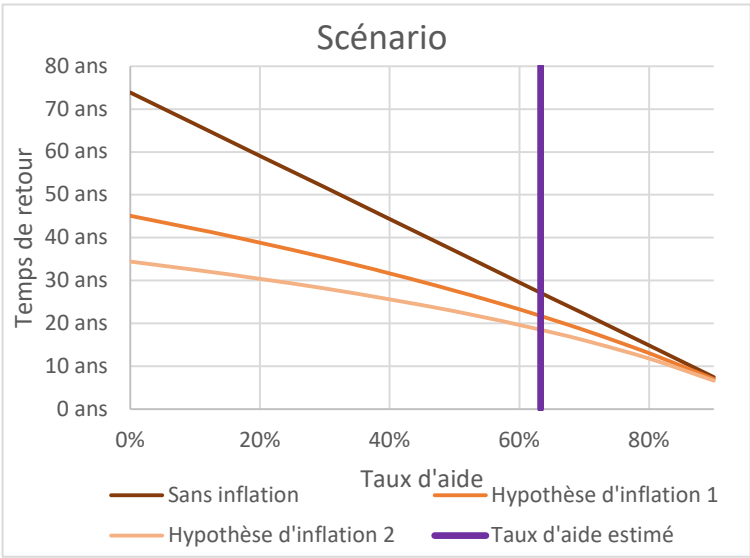
Le tableau ci-dessous présente le bilan économique du projet.

		REFERENCE PAC sur air + Appoint Gaz	SCENARIO Géothermie 35 kW réversible / 650 m de sondes
Investissement		66 000 € TTC	160 800 € TTC
<i>Surinvestissement</i>		<i>Référence</i>	<i>94 800 € TTC</i>
Exploitation	P1	4 216 € TTC	3 026 € TTC
	P2	840 € TTC	960 € TTC
	P3	600 € TTC	600 € TTC
	Total	5 656 € TTC	4 586 € TTC
	Economie	<i>Référence</i>	<i>1 070 € TTC</i> <i>18,9%</i>
Cout de la chaleur	Taux de subvention total	0%	63%
	CEE	-	50 000 € HT
	Reste à financer	55 000 € HT	84 000 € HT
	Amortissement (P4) 20 ans / 3%	3 697 € TTC/an	5 646 € TTC/an
	Exploitation	5 656 € TTC/an	4 586 € TTC/an
	Cout global	9 353 € TTC/an	10 232 € TTC/an
	Cout de l'énergie	189,6 € TTC/MWh	207,4 € TTC/MWh
Temps de retour	Brut - sans subv	Référence	73,8 ans
	Brut - avec subv.		27,1 ans
	Inflation 1 - avec subv		21,7 ans
	Inflation 2 - avec subv		18,5 ans

Le graphique ci-dessous présente la répartition des postes dans le prix de l'énergie produite par l'installation pour chaque scénario.



Le graphique ci-dessous présente l'évolution de temps de retour du scénario par rapport à la référence en fonction du taux de subvention.



6.4 Bilan environnemental

Le tableau ci-dessous présente le bilan environnemental des scénarios géothermiques comparés à la référence avec les hypothèses suivantes :

	GES	EP
Electricité	64 kg/MWh	2,30
Gaz de ville	234,0 kg/MWh PCI	1,00

	REFERENCE PAC sur air + Appoint Gaz	SCENARIO Géothermie 35 kW réversible / 650 m de sondes
Emission de Gaz à Effet de Serre	4,1 teqCO2/an Référence	0,8 teqCO2/an Economie 3,3 teqCO2/an 80,2%
Consommation d'Energie Primaire	38,2 MWh EP/an 0,97 MWh EP/ MWh u Référence	29,0 MWh EP/an 0,73 MWh EP/ MWh u Economie 9,2 MWh EP/an 24,1%
Energie renouvelable CHAUD - Géothermie	- - -	28,9 MWh ENR récupéré par an 2,5 TEP ENR produite par an 73% d'ENR

Les économies d’émission de Gaz à Effet de serre sont de 80% soit 3,3 tonnes de CO2 émis économisées par an.

7 Conclusions

- **Ressource géothermique**

Le sous-sol au droit du site (bassin sédimentaire : sables, argiles) présente des caractéristiques thermiques assez moyennes permettant tout de même le déploiement de la géothermie sur sondes verticales.

Nous avons considéré une conductivité thermique de 1,8 W/m.°C avec une température moyenne de 13,5°C sur 130 m de profondeur.

D'un point de vue réglementaire, au vu du contexte environnemental et des prescriptions de mise en œuvre du dispositif du champ de sondes, le projet est :

- Compatible par rapport aux prescriptions d'implantation des échangeurs géothermiques définis par l'arrêté du 25 juin 2015 ;
- Compatible par rapport au zonage cartographie des zones relatives à la minime importance prévue à l'article 22-6 du décret 2006-649 du 2 juin 2006.

Les démarches administratives au titre du Code Minier doivent être effectuées préalablement à la réalisation des travaux.

- **Solutions techniques envisagées et du bilan énergétique**

Nous avons étudié 1 scénario complet géothermique répondant aux enjeux du projet et aux attentes du client :

- **Scénario – base géothermique chaud et 100% froid**

Une pompe à chaleur de 35 kW associée à une installation sur champ de sondes de 5 sondes de 130 ml.

Le COP moyen annuel de la PAC sera de 4,0 et le COP global géothermie sera de 3,7 pour une couverture de 97% des besoins énergétiques de chauffage.

Le EER moyen annuel de la PAC sera de 6,6 et le EER global géothermie sera de 4,4 pour une couverture de 100% des besoins énergétiques de froid.

- **Du point de vue économique et investissement géothermique**

- Le **projet de géothermie** nécessite un surinvestissement d'environ 79 k€ HT hors subvention.

L'économie d'exploitation annuelle est de 900 € HT ce qui représente un temps de retour brut de 75 ans. En intégrant les augmentations des coûts d'énergie, le temps de retour sans aide serait compris entre 35 et 45 ans.

En considérant la valorisation potentielle des CEE à 50 k€, le temps de retour passerait à 27 ans et entre 18 et 21 ans avec l'augmentation des couts d'énergie.

- **Du point de vue environnemental**

- Le **projet de géothermie** permet d'économiser 3,3 teq CO₂/an d'émission de Gaz à Effet de Serre par rapport à la solution de référence avec la récupération d'environ 29 MWh/an d'ENR dans le sous-sol.