



Pôle Patrimoines

Centre Hospitalier de Cadillac

19/06/2026

Étude de faisabilité d'une installation de géothermie sur nappe



SOMMAIRE

1	PREAMBULE	4
2	RESSOURCE GEOTHERMALE	5
2.1	CONTEXTE DU PROJET ET LOCALISATION	5
2.2	CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	6
2.2.1	Contexte géologique	6
2.2.2	Contexte hydrogéologique	8
3	BILAN ENERGETIQUE	12
3.1	HYPOTHESES	12
3.2	SITUATION DE REFERENCE	12
3.2.1	Chauffage et ECS	12
3.2.2	Rafrachissement	14
4	ETAT DES LIEUX TECHNIQUES	16
4.1	PRODUCTION & DISTRIBUTION DE CHALEUR	16
4.1.1	Equipements de production	16
4.1.2	Réseau de distribution	17
4.1.3	Equipements d'émission de chaleur	17
4.2	PRODUCTION DE FROID	18
5	ETUDE TECHNIQUE	19
5.1	GENERALITES	19
5.1.1	Principe	19
5.2	PRESENTATION DES SCENARIOS ETUDIES	20
5.3	DESCRIPTIF DES SOLUTIONS TECHNIQUES	21
5.3.1.4.1	Principe d'un doublet géothermique à balayage	29
5.3.2	Centrale de production thermique	40
5.3.3	Réseau de chaleur	45
5.4	SCENARIO 1 – CHALEUR	49
5.4.1	Appels de puissance	49
5.4.2	Performances énergétiques des scénarios	51
5.5	SCENARIO 2 – CHALEUR & FROID	51
5.5.1	Réseau de chaleur et de froid	52
5.5.2	Appels de puissance	52
5.5.3	Performances énergétiques des scénarios	53
6	BILAN ENVIRONNEMENTAL	54
6.1	HYPOTHESES DE L'ETUDE	54
6.2	PERIMETRE DE PROTECTION DE CAPTAGES D'EAU POTABLE	55

6.3	ZONES DE REPARTITIONS DES EAUX	55
6.4	RISQUES NATURELS ET INDUSTRIELS	56
6.4.1	Risques naturels	56
6.4.2	Risques industriels	56
6.5	SITUATION VIS-A-VIS DES ESPACES PROTEGES	57
6.5.1	Zone NATURA 2000 et Zone Naturelles d'Intérêts Ecologiques Faunistiques et Floristiques	57
6.6	COMPATIBILITE AVEC SDAGE ADOUR GARONNE	59
6.7	COMPATIBILITE AVEC LES SAGE	62
7	BILAN ECONOMIQUE	63
7.1	SITUATION DE REFERENCE	63
7.1.1	Référence chaleur	63
7.1.2	Référence froid	63
7.2	HYPOTHESES DE L'ETUDE	63
7.3	SUBVENTIONS ET CEE	64
7.3.1	Certificats d'Economies d'Energies	64
7.3.2	Fond Chaleur – Géothermie Profonde ADEME	64
7.4	EVALUATION DES COUTS	66
7.4.1	Coûts d'investissement (CAPEX)	66
7.4.2	Coûts d'exploitation (OPEX)	67
7.4.3	Coûts globaux	68
8	CONCLUSION	69
9	ANNEXES	70
	TABLE DES FIGURES	71
	LISTE DES TABLEAUX	72

1 PREAMBULE

Le Centre Hospitalier de Cadillac, situé à Cadillac-sur-Garonne (Gironde), est un établissement public de santé spécialisé dans la prise en charge des maladies mentales et l'accompagnement des souffrances psychiques.

Face aux obligations réglementaires de la loi ELAN, du Dispositif Eco-Energie Tertiaire (DEET), du décret BACS, ainsi qu'à l'arrêt prochain de sa centrale de cogénération, l'établissement entend transformer ces contraintes en opportunités et leviers d'action. Ces défis s'ajoutent à une contrainte budgétaire croissante, liée à l'augmentation des coûts d'exploitation et de consommation énergétique, qui pèsent sur l'équilibre financier de l'établissement.

Par ailleurs, le contrat d'exploitation et de maintenance des installations thermiques (type P1, P2 et P3) arrivera à échéance en juin 2027. Cette échéance offre une opportunité stratégique : repenser la gestion énergétique du site et engager une démarche ambitieuse en matière de performance énergétique et maîtrise des dépenses.

C'est dans ce contexte que le CH de Cadillac a missionné MANERGY pour la réalisation d'un état des lieux de ses installations et d'étudier l'opportunité de lancer un MGP sur son patrimoine.

Un scénario a été retenu par le CH à l'issue de l'opportunité. Ce scénario comprend notamment une solution de géothermie sur nappe sur le site de Cadillac. Le CH, par la présente étude, a souhaité sécuriser la faisabilité d'exploiter la ressource géothermale et de se garantir des performances énergétiques pour assurer une rentabilité économique.

L'étude est réalisée par MANERGY et ANTEA Group. Elle comprend principalement :

- Un état des lieux de la ressource géothermique ;
- Une étude technique et réglementaire de la ressource ;
- L'évaluation des besoins de chaleur ;
- La conception de solutions techniques permettant la distribution de la chaleur ;
- L'étude de l'adéquation entre les besoins de chaleur et la ressource géothermale, dans le respect des contraintes techniques et réglementaires.

2 RESSOURCE GEOTHERMALE

2.1 CONTEXTE DU PROJET ET LOCALISATION

Le Centre hospitalier de Cadillac souhaite évaluer la faisabilité d'une installation de production de chaleur basée sur la géothermie sur nappe, qui alimentera les bâtiments du site central de Cadillac, de l'Unité pour Malades Difficiles (UMD) et de l'Unité Hospitalière Spécialement Aménagée (UHSA) du Centre Hospitalier.

Le potentiel géothermique est plus orienté sur une géothermie sur nappe. En effet, deux solutions sur nappe peuvent être envisagées.

Dans un premier temps, une solution de géothermie sur nappe captant la nappe de l'Oligocène. Cette solution permettrait de produire à un débit maximal de 35 m³/h environ tout en restant dans le cadre de la GMI. La seconde solution serait de sortir du cadre de la GMI afin de capter la nappe de l'Eocène et ainsi atteindre des débits plus conséquents autour de 80 m³/h.

La présente étude correspond à l'étude de faisabilité.

Le site d'étude se situe au sud de la commune de Cadillac, aux abords de la Garonne sur les parcelles OB 4156 et 4157. Le site présente une altimétrie entre 12,8 et 17,6 mNGF.

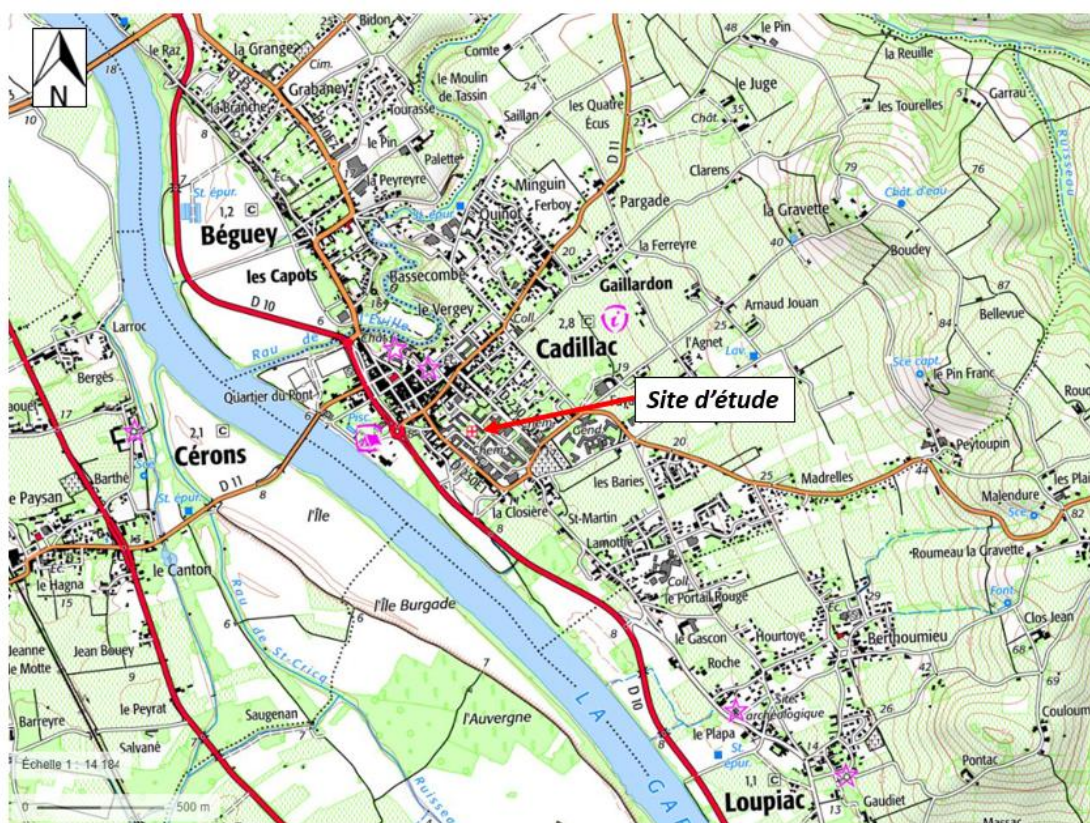


Figure 1 : Localisation du site d'étude (fond de carte : IGN)

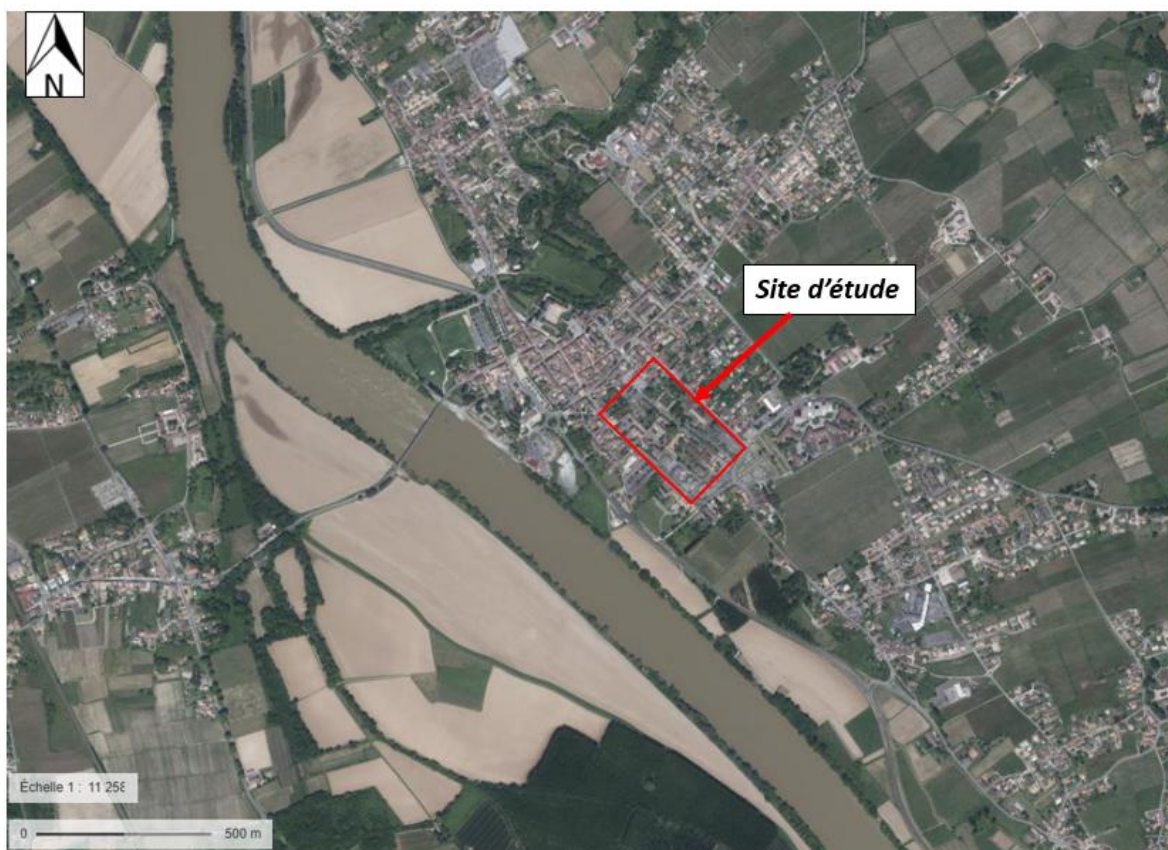


Figure 2 : Localisation du site d'étude (fond de carte : image satellite)

2.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1 Contexte géologique

La commune de Cadillac-sur-Garonne est située dans le département de la Gironde, sur la rive droite de la Garonne, à environ 40 km au sud-est de Bordeaux. Le contexte géologique local est caractéristique du Bassin aquitain et est documenté notamment par les cartes géologiques du BRGM aux feuilles de Podensac (n°828) et de Langon (n°852).

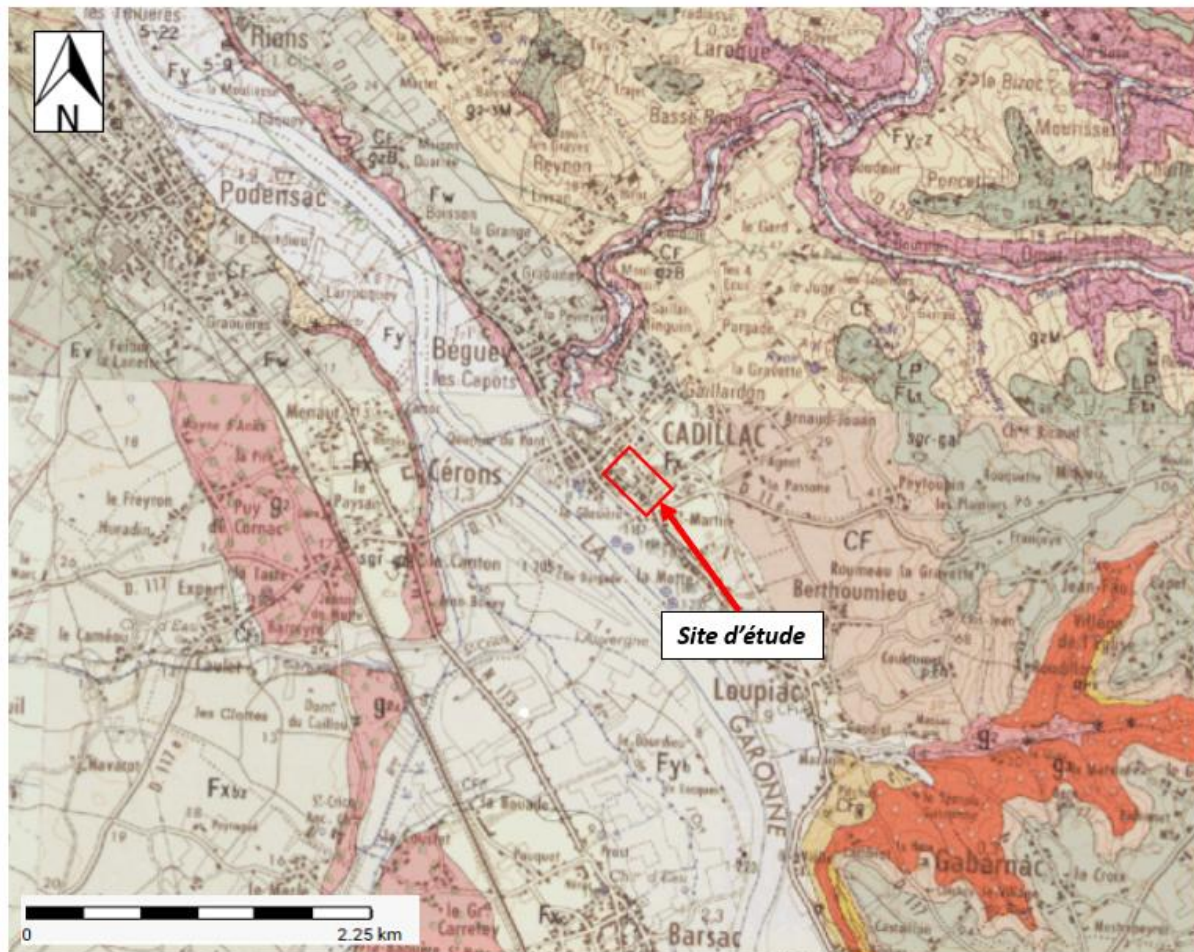


Figure 3 : Extrait de la carte géologique au 1 / 50 000 (BRGM)

Le secteur de Cadillac-sur-Garonne appartient à l'ensemble sédimentaire du Bassin aquitain, bassin d'avant-pays constitué d'une épaisse succession de dépôts marins, fluviaux et continentaux d'âge secondaire et tertiaire. Dans la région étudiée, les formations affleurantes sont essentiellement d'âge tertiaire (Paléogène et Néogène), recouvertes localement par des dépôts quaternaires.

Ces formations résultent d'environnements sédimentaires variés (milieux marins peu profonds, lagunaires ou continentaux), témoignant des fluctuations du niveau marin et de l'évolution paléogéographique du Bassin aquitain.

Les formations tertiaires affleurantes dans le secteur de Cadillac-sur-Garonne correspondent principalement à des dépôts d'âge oligocène à miocène. Elles sont constituées de formations détritiques composées d'alternances de sables, d'argiles et localement de calcaires.

Les dépôts oligocènes sont souvent représentés par des formations argilo-sableuses parfois riches en niveaux calcaires. Ces formations traduisent des conditions de sédimentation littorales à lagunaires dans un contexte de mer peu profonde. Les calcaires peuvent présenter localement une structure marneuse et renfermer des fossiles marins.

Les formations miocènes sont dominées par des dépôts sableux et sablo-argileux issus d'environnements continentaux ou deltaïques. Ces sédiments correspondent à des apports détritiques issus de l'érosion des reliefs environnants et transportés par les réseaux fluviaux anciens.

La vallée de la Garonne est occupée par des **formations alluviales** récentes associées à l'évolution du fleuve au cours du Quaternaire. Ces dépôts sont principalement constitués de graviers, galets, sables et limons issus du transport et de la sédimentation fluviale.

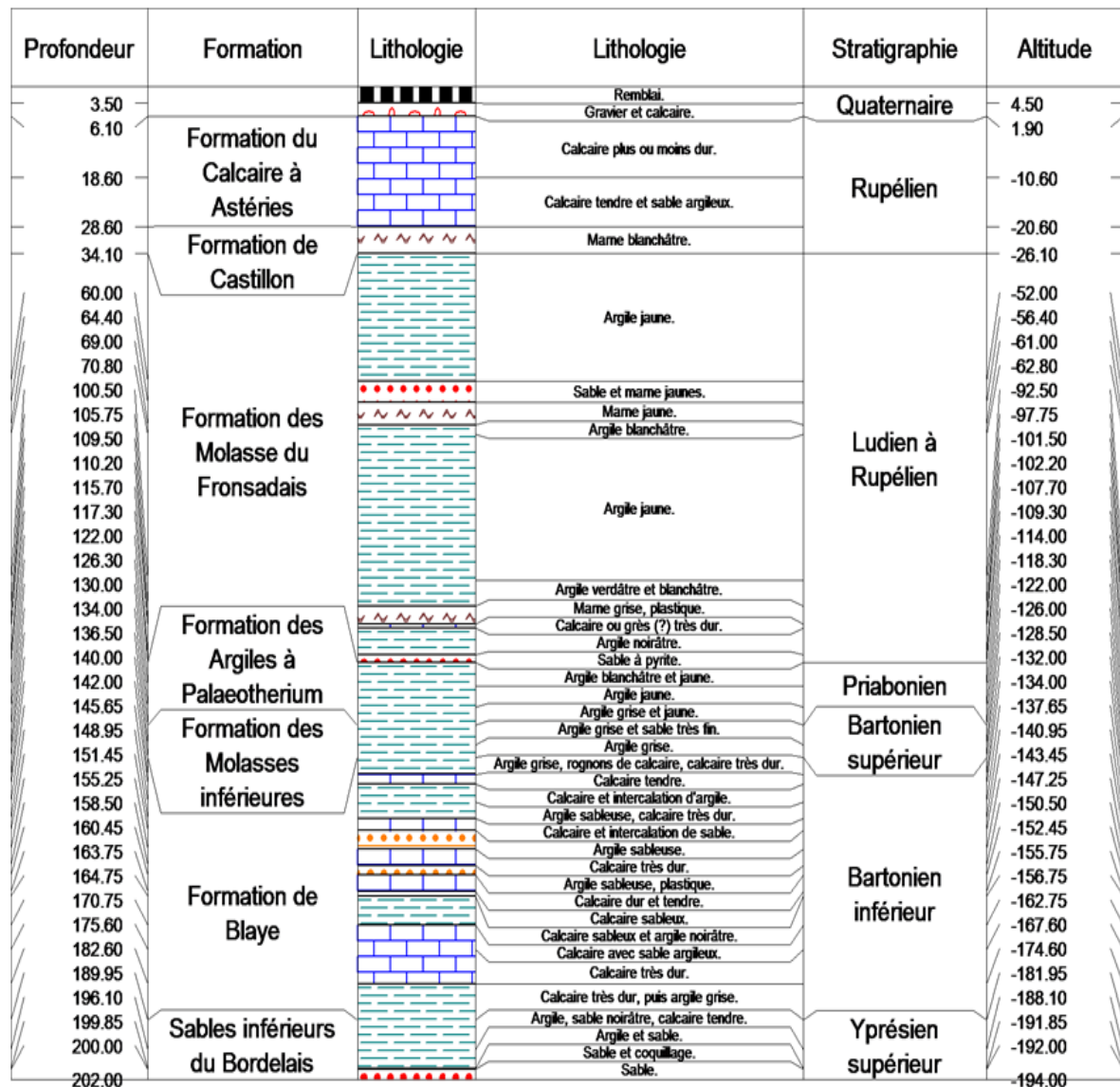


Figure 4 : Coupe géologique du forage BSS002AEFL (source : Infoterre)

2.2.2 Contexte hydrogéologique

L'organisation hydrogéologique du secteur de Cadillac-sur-Garonne résulte de la superposition de formations perméables du tertiaire et du quaternaire. Les horizons aquifères peu profonds sont sous l'influence de l'axe de drainage majeur de la zone : la Garonne.

2.2.2.1 Aquifère du Plio-Quaternaire

Les formations plio-quaternaires correspondent essentiellement aux dépôts alluviaux associés à l'évolution récente de la vallée de la Garonne. Ces dépôts sont constitués de terrasses alluviales composées de galets, de graviers et de sables, localement recouverts par des limons de débordement.

Ces formations présentent généralement une perméabilité élevée liée à la dominance de matériaux grossiers. Elles renferment une nappe alluviale superficielle libre, directement alimentée par les précipitations et par les échanges hydrauliques avec le cours de la Garonne. Cette nappe est peu profonde et fortement influencée par les variations du niveau du fleuve.

À l'échelle locale, cet aquifère présente une extension limitée au fond de vallée et aux terrasses fluviales.

2.2.2.2 Aquifère du Miocène

Les formations miocènes du secteur appartiennent à l'ensemble des molasses miocènes du Bassin aquitain. Elles sont constituées d'alternances de sables, de niveaux argilo-sableux, passées marneuses et quelques calcaires lacustres déposés dans des environnements continentaux à littoraux.

Sur le plan hydrogéologique, les horizons sableux constituent les principaux niveaux aquifères du Miocène. Leur perméabilité est généralement modérée à bonne, mais leur continuité hydraulique peut être limitée par la présence d'intercalations argileuses. Ces formations peuvent ainsi renfermer des nappes discontinues.

La recharge de cet aquifère s'effectue principalement par infiltration directe des eaux météoriques au niveau des zones d'affleurement sur les plateaux environnants. Les écoulements souterrains s'orientent globalement vers les vallées principales, notamment vers celle de la Garonne.

2.2.2.3 Aquifère de l'Oligocène

Les formations oligocènes sont dominées par les calcaires à Astéries, formation largement développée dans la région bordelaise. Ces calcaires bioclastiques, déposés en milieu marin peu profond, sont parfois associés à des niveaux sableux ou marneux.

Du point de vue hydrogéologique, les calcaires à Astéries constituent un aquifère important. Leur perméabilité est essentiellement liée à la fracturation et à la présence de niveaux plus poreux. Cette formation peut stocker et transmettre des volumes significatifs d'eau souterraine.

Localement, des niveaux marneux intercalés peuvent jouer un rôle de niveaux semi-perméables et contribuer au confinement partiel de la nappe. L'alimentation de cet aquifère se fait principalement par infiltration des eaux de pluie dans les zones d'affleurement situées sur les plateaux.

The figure is a topographic map of a region in France, specifically around Cadillac. The map shows contour lines representing elevation, with a color-coded legend on the right indicating elevation in meters above sea level (mNGF). The legend ranges from -7.5 to 57.5 meters, with colors transitioning from blue at the bottom to red at the top. The map includes a scale bar at the bottom (0 to 20,000 meters) and a north arrow in the top right corner. Key locations marked on the map include Le Verdou-en-Mer, Lescap, Blaye, Gournas, Libourne, Cadillac, and Pèze. The map also shows a network of roads and a river system.

Il est à noter que les propriétés hydrodynamiques de l'Oligocène sur le secteur sont très hétérogènes. L'exploitation de cet aquifère reste malgré tout plafonnée et peut rarement dépasser un débit de 40 m³/h dans le secteur.

2.2.2.4 Aquifère de l'Éocène

Les formations éocènes du Bassin aquitain sont constituées d'une succession de dépôts marins comprenant des calcaires, des sables et des marnes. Dans la région bordelaise, ces formations comprennent notamment les calcaires et sables éocènes qui peuvent constituer des niveaux aquifères.

Les horizons sableux et calcaires présentent des propriétés aquifères favorables, tandis que les niveaux marneux jouent un rôle de barrières hydrauliques limitant localement la circulation de l'eau souterraine.

Les aquifères éocènes sont plus profonds et possèdent une extension régionale importante dans le Bassin aquitain et participent au fonctionnement global du système hydrogéologique régional.

Dans le secteur de Cadillac-sur-Garonne, ces formations contribuent au système aquifère profond, avec des écoulements souterrains qui convergent vers le sud-est. Cependant, la carte piézométrique en Figure 6 montre que la commune se situe en zone dite « cuvette » où les écoulements sont assez faibles et selon une direction présentant des incertitudes.

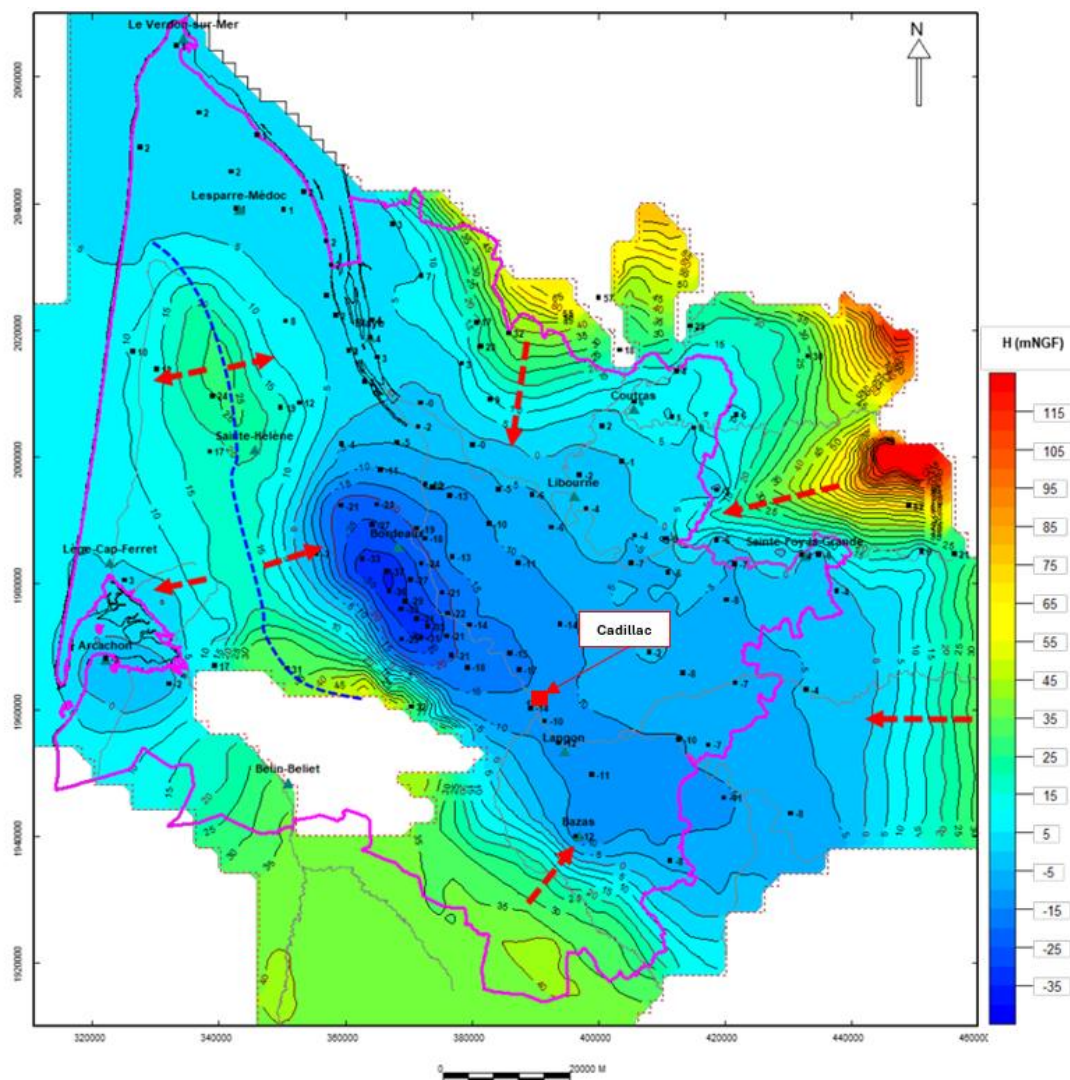


Figure 6 : Carte piézométrique de l'Éocène (2023, BRGM)

3 BILAN ENERGETIQUE

3.1 HYPOTHESES

Les hypothèses de cette étude sont les suivantes :

- Période de chauffe de référence : 15 septembre au 15 mai
- Station météo de référence : Bordeaux Mérignac
- Température extérieure de base : -5°C
- DJU de référence : 1750
- qECS : 153 kWh PCI/m³ (*issu de l'état des lieux énergétique*)

Hypothèses pour le rafraichissement :

- Part de la surface totale rafraichie :
 - Bâtiment « Hospitalisation » : 70%
 - Bâtiment « Autre » : 50%
- Ration de besoin surfacique en froid :
 - Bâtiment « Hospitalisation » : 70 kWh/m²
 - Bâtiment « Autre » : 40 kWh/m²

3.2 SITUATION DE REFERENCE

3.2.1 Chauffage et ECS

La situation de référence pour l'année 2024 a été établie dans le cadre de l'état des lieux :

Tableau 1 : Consommations de référence 2024

Site	DJU	Gaz ou RCU (chauffage + ECS) (MWh PCI/an)	ECS (m ³ /an)
Site Cadillac - UMD - UHSA	1601	6 839	8 568

La consommation corrigée aux DJU de référence :

Tableau 2 : Consommations Gaz de référence 2024 – corrigées DJU

Site	Gaz ECS (MWh PCI/an)	Gaz chauffage (MWh PCI/an)
Site Cadillac - UMD - UHSA	1 307	6 047

Le CH de Cadillac a prévu, en dehors du futur MGP, la réalisation de travaux sur une partie du patrimoine bâti et une modernisation de la GTC.

Tableau 3 : Travaux prévus hors MGP

Désignation du bâtiment	APE
Site Cadillac - UMD - UHSA	Remplacement des menuiseries en simple vitrage Parchappe, centre de formation
Site Cadillac - UMD - UHSA	Modernisation régulation chauffage. Mise en place de température de réduit nuit (18°C) et WE (16°C). Nécessite la remise à niveau de la GTC actuelle, qui ne permet pas aujourd'hui de programmer plusieurs réduits en semaine.
Site Cadillac - UMD - UHSA	Restructuration des bâtiments Claude, Moreau, Clerembault, USIP

Les consommations prenant en compte ces futurs travaux sont les suivantes :

Tableau 4 : Consommations Gaz de référence - avec prise en compte des travaux hors MGP

Site	Gaz ECS (MWh PCI/an)	Gaz chauffage (MWh PCI/an)
Site Cadillac - UMD - UHSA	1043	4827

Enfin, il est prévu la mise en place d'un scénario d'actions d'amélioration de la performance énergétique, à valider par le futur opérateur dans le cadre du MGP. Elles portent sur la distribution de chaleur et la production d'eau chaude sanitaire :

- Arrêt du réseau dédié à la production d'ECS et modification du principe de fonctionnement actuel. Dépose des deux réseaux existants, et mise en œuvre d'un réseau primaire destiné à la production de chauffage et d'ECS.
Pour l'ECS, création d'une sous-station dédiée : un échangeur et un ballon ECS pour chaque sous-station.
- Mise en place d'une GTB de type B
- Remplacement des pompes à débit constant par des pompes à débit variables dans les sous-stations.

La situation de référence de notre projet, tenant compte de l'ensemble des corrections et travaux prévus, est la suivante :

Tableau 5 : Consommations Gaz de référence avec prise en compte des AAPE scénario MGP

Site	Gaz ECS (MWh PCI/an)	Gaz chauffage (MWh PCI/an)
Site Cadillac - UMD - UHSA	991	3533

3.2.2 Rafraichissement

Comme indiqué précédemment, le site de Cadillac ne possède pas de production et de distribution centralisée de froid. Certains bâtiments sont équipés de productions en détente directe indépendantes et les consommations actuelles dédiées à la production de froid ne sont pas connues. Au vu du projet de géothermie pour la production de chaleur, le CH de Cadillac souhaite néanmoins étudier la possibilité de rafraichir l'ensemble du site via un réseau centralisée. Afin de définir une référence potentielle froid, les hypothèses indiquées au 3.1, ont été utilisées.

Les résultats suivants ont été obtenus concernant les besoins en froid :

Tableau 6 : Estimations des besoins froid – Site

Site	Surface rafraichie (m²)	Froid (MWh/an)
Site Cadillac - UMD - UHSA	19 098	1 211

Sur le périmètre complet du CH, et le tracé complet du réseau, on observe une très faible densité de livraison de froid, de l'ordre de 0,4 MWh/ml. La densité thermique est fortement pénalisée par la liaison entre le site central et le site UMD/UHSA, qui représente un linéaire de l'ordre de 600 ml.

Afin d'obtenir une meilleure densité, et par conséquent un meilleur équilibre économique, nous avons écarté la partie UMD/UHSA. Néanmoins, la possibilité d'une production de froid centralisée à l'échelle de ces bâtiments n'est pas à exclure, et pourrait être réalisée via un groupe froid positionné localement.

Les sous-stations au Nord du site ont également été écartées du fait de faibles besoins, tels que : Ateliers, garages, direction Tvx, etc.

Les besoins estimés sur le périmètre restreint, sont les suivants :

Tableau 7 : Estimations des besoins froid – Périmètre restreint

Site	Surface rafraichie (m ²)	Froid (MWh/an)
Site Cadillac	12 477	794

Ces besoins nous permettent d'obtenir une densité thermique optimisée, de l'ordre de 0,84 MWh/ml.

4 ETAT DES LIEUX TECHNIQUES

L'état des lieux technique a été réalisé lors de la phase d'état des lieux, un rappel des principaux points est présenté dans cette partie.

4.1 PRODUCTION & DISTRIBUTION DE CHALEUR

4.1.1 Equipements de production

Tableau 8 : Equipements chaleur – CH Cadillac

Site	Bât / secteurs	Production de chaleur	Distribution - émission
Site de Cadillac	Site de Central	Cogénération (gaz naturel) : 861 kW + Appoint/secours chaudières gaz : - CH1 Atlantic : 3 000 kW (2012) - CH2 Ferroli : 2900 kW (vétuste) - CH3 Atlantic : 1 150 kW (2010)	Radiateur / Ventilo-convecteur / panneau rayonnant Distribution via 2 réseaux : chauffage et ECS
	UMD	Sous-station alimentée via un échangeur depuis la chaufferie centrale + Appoint/secours chaudières gaz : - CH1 Ferroli : 1 860 kW (1990) - CH2 Guillot : ? kW (1990)	Radiateur / Ventilo-convecteur / plancher chauffant Alimentation eau chaude via réseau Site de Cadillac vers sous- station UMD
	UHSA	(Peut fonctionner indépendamment du Site de Cadillac)	Ventilo convecteur Alimentation eau chaude depuis sous-station UMD

La cogénération gaz est à l'arrêt et doit être démantelée d'ici au nouveau marché (juin 2027).

Dans le cadre du scénario retenu par le CH, il est prévu la conservation en appoint/secours de la chaudière la plus puissante (3 MW), qui est dans un bon état général, et datant de 2012 :

- Chaudière Atlantic Guillot – Modèle LRR52 BAF (3 000 kW)
- Brûleur Weishaupt – RGL 50/1 B – Modulant 500 – 4 000 kW

4.1.2 Réseau de distribution

Le réseau actuel du CH est représenté sur le tracé suivant :



Figure 7 : Réseaux existants

La distribution du primaire chauffage et de l'ECS du site se fait via deux réseaux distincts, permettant également d'alimenter le secteur UMD et UHSA. Le linéaire de réseau se décompose comme suit :

- Site de Cadillac : environ 1 750 ml pour le primaire chauffage et 1 750 ml pour le primaire ECS,
- Liaison UMD : environ 600 ml pour le chauffage et l'ECS,
- UHSA : environ 450 ml pour le chauffage et l'ECS (à tirer lors des travaux de rénovation des bâtiments).

4.1.3 Equipements d'émission de chaleur

Les équipements d'émission sont principalement des radiateurs, ventilo-convecteurs et panneaux rayonnants. Il y a globalement peu de CTA sur le site.

Les paramètres de régulation ont pu être obtenus auprès de l'exploitant actuel et sont consignés dans l'Annexe 1.

Les régimes de température maximales constatées sont de l'ordre de 70°C, ce qui permettrait de fonctionner sur une production géothermale réhaussée par pompe à chaleur.

4.2 PRODUCTION DE FROID

A l'heure actuelle, le site ne dispose pas de production de froid centralisée. Les équipements existants sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Equipements froid – CH Cadillac

Site	Bât / secteurs	Production de froid	Distribution - émission
Site de Cadillac	Site de Central	Clim monosplit + VRV + groupe froid (cuisine)	-
	UMD	Clim monosplit + VRV	-
	UHSA	Groupe froid 135kW	CTA

IMPORTANT

Dans le cas de la mise en œuvre d'un réseau de distribution de froid centralisé, l'ensemble des **installations secondaire de distribution et d'émission** du froid devront être mise en place. Ces coûts complémentaires ne sont pas pris en compte dans les investissements et le bilan économique du scénario 2.

5 ETUDE TECHNIQUE

5.1 GENERALITES

5.1.1 Principe

Un réseau de chaleur est un système centralisé de production et de distribution de chaleur. Il est essentiellement composé :

- **D'une centrale de production** assurant la production de chaleur. Dans le cadre de cette étude, la production de chaleur est assurée :
 - en base par une production de chaleur géothermique couplée à des Pompes à Chaleur (PAC)
 - en appoint/secours par une chaufferie gaz naturel.

La chaleur produite est de l'eau chaude à basse pression ($< 110^{\circ}\text{C}$).

- **De réseaux primaires de distribution de chaleur.** Pour cette étude, le réseau primaire de distribution de chaleur retenu est de type acier pré-isolé. Ce réseau assure la liaison entre la chaufferie centrale et les différentes sous-stations (points de livraison), véhiculant ainsi la chaleur (eau chaude basse pression) vers les utilisateurs.
- **De sous-stations** correspondent aux points de livraison de la chaleur et regroupent l'ensemble des éléments (échangeur de chaleur, régulation, comptage...) servant à transmettre la chaleur aux abonnés pour leur utilisation propre (chauffage des locaux, production d'ECS, process ...).

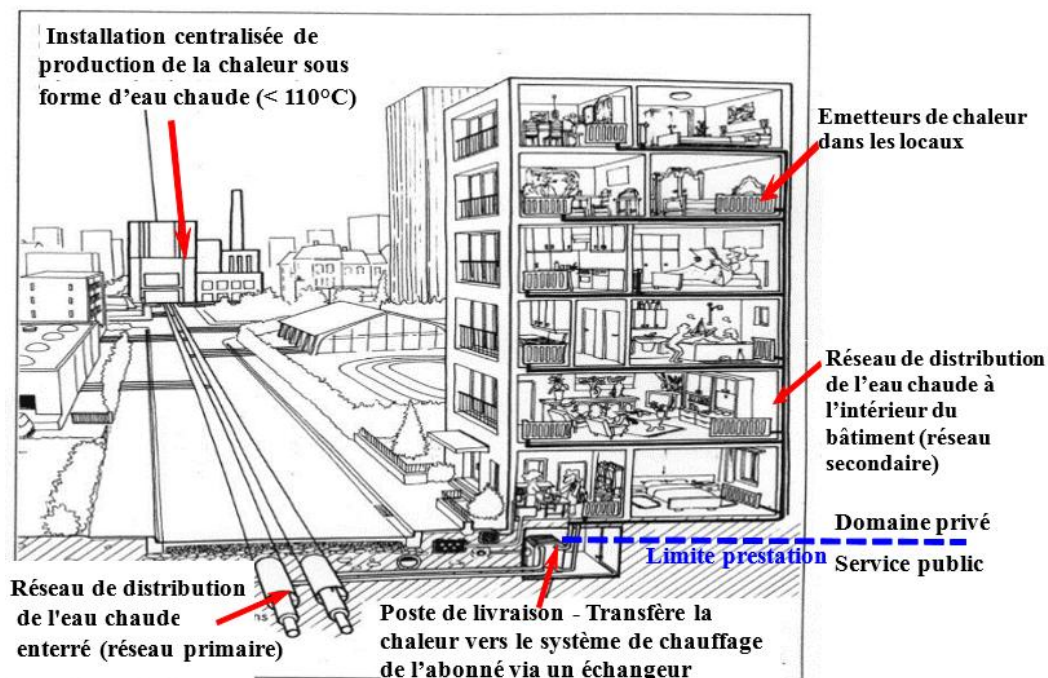


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'un réseau de chaleur

Pour le CH de Cadillac, l'ensemble des bâtiments raccordés sont sur le même SIREN, on qualifie donc le réseau de réseau technique de distribution de chaleur.

5.2 PRESENTATION DES SCENARIOS ETUDIES

Il est prévu l'étude de deux scénarios pour le CH de Cadillac :

- Scénario 1 : Production de chaleur via une source géothermique

Le scénario 1 correspond au scénario 4 étudié dans le cadre d'état des lieux et opportunité MGP. Des variantes sur les modèles et technologies de pompes à chaleur seront notamment développés.

- Scénario 2 : Production de chaleur et de froid via une source géothermique

Le scénario 2 correspond à une « opportunité » d'étude de couverture des besoins futurs de rafraîchissement à l'échelle du site central de Cadillac. Ce scénario reste opportuniste, notamment du fait de l'absence de situation de référence réelle et de l'absence d'équipement de distribution et d'émission dans les bâtiments.

5.2.1.1 Hypothèses générales de dimensionnement

Les études de la ressources géothermales ont montré que la ressources pouvait permettre de délivrer les caractéristiques suivantes :

- Température de puisage : 20°C
- Température de réinjection : 12°C
- Débit maximal : 150 m3/h

Afin de garantir un régime de température nécessaire à la production d'ECS, le réseau fonctionne selon la loi d'eau suivante :

- Période estivale et hivernale :
 - Départ : 75°C
 - Retour : 60°C en centrale.

Afin d'obtenir un taux de couverture ENR supérieur à 80%, il est prévu d'utiliser des pompes à chaleur d'une puissance unitaire de 450 kW.

Pour le projet, il est prévu de réaliser l'appoint/secours du réseau via une chaudière gaz existante. A l'heure actuelle, deux des chaudières présentes sur le site pourraient être utilisée en appoint/secours. Elles ont une quinzaine d'années, sont en bon état de fonctionnement, avec brûleur modulant.

Il pourra être envisagé par exemple d'utiliser la plus petite des chaudières (1150 kW) afin de réaliser l'appoint gaz quotidien, et de conserver la plus grosse pour le secours total en cas de panne des pompes à chaleur. Les chaudières sont compatibles avec l'appel de puissance maximal de 2,1 MW.

En ce qui concerne le rafraîchissement, nous avons les hypothèses suivantes :

- Température de production de froid : 7/12°C
- Production de froid via une PAC géothermique de 400 kW
- Appoint/secours du réseau froid via un groupe à eau glacée de 600 kW

5.3 DESCRIPTIF DES SOLUTIONS TECHNIQUES

5.3.1.1 Généralités sur la ressource géothermale

Il s'agit d'exploiter la capacité calorifique du sous-sol, en y prélevant de la chaleur par pompage d'eau issue d'une nappe souterraine. Ce pompage se réalise par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs forages. L'eau est ensuite acheminée jusqu'à une pompe à chaleur afin d'en prélever/ajouter des calories, avant d'être réinjectée dans l'aquifère d'origine par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs forages.

L'écoulement des eaux dans le sous-sol étant permanent, les capacités calorifiques après stabilisation du système restent constantes.

La fourniture des besoins en chaud et en froid peut être réalisée via une pompe à chaleur réversible ou plusieurs pompes à chaleur si des besoins chaud et froid se présentent de manière simultanée.

Pour cette étude, deux nappes semblent pertinentes à étudier au stade de la faisabilité, comme présenté en 2.2.2.

Tout d'abord la nappe de l'Oligocène :

Présente jusqu'à une profondeur de 40 m environ, cet aquifère permettrait la création d'un doublet géothermique à faible profondeur et ainsi de rester dans le cadre de la GMI. Dans le secteur d'étude, la nappe de l'Oligocène est assez hétérogène et de faibles productivités peuvent être rencontrées. De plus, le niveau statique est parfois proche de la surface et peut donc représenter un frein quant à la réinjection. La réalisation de deux voire trois doublets devra être envisagé afin de parvenir au débit souhaité et soulager la réinjection.

Ensuite la seconde possibilité est la **réalisation d'un doublet à l'Éocène inférieur**.

Cette option nécessiterait de sortir du cadre de la GMI car les profondeurs de forations se situeraient autour de 250 m. Cependant, cette solution présente de nombreux avantages notamment :

- Une eau plus chaude (autour de 20 °C) ;
- Une productivité plus forte permettant de pomper à de forts débits.
- La combinaison d'une eau plus chaude et du fort potentiel de débit permettrait donc mobiliser des puissances significatives.

La Figure 9 permet d'illustrer les profondeurs des terrains Oligocène et Eocène.



Figure 9 : Log hydrogéologique au droit du site d'étude (source : MONA BRGM)

5.3.1.1.1 Caractéristiques hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques nécessaires à l'étude ont été évalués à partir des ouvrages alentours. Leur localisation est présentée en Figure 10.



Figure 10 : carte de localisation des ouvrages alentours (source : BSS) avec en rouge les ouvrages à l'Eocène et en bleu les ouvrages à l'Oligocène.

Les paramètres associés aux différents ouvrages répertoriés ci-dessus sont présentés dans le Tableau 10 :

Tableau 10 : Paramètres hydrodynamiques issus de la bibliographie autour de la zone d'étude

N° BSS de l'ouvrage	Nappe captée	Transmissivité (m ² /s)	Débit spécifique (m ³ /h/m)	Niveau statique (m/rep) et date de mesure
BSS001ZPJN	Eocène	1,08.10 ⁻²	-	-
BSS002AEFL	Eocène	4,5.10 ⁻⁴	9,9 à 140 m ³ /h	-
BSS002AEFK	Eocène	-	-	-
BSS002AEGC	Eocène	7,6.10 ⁻³		-21,84 (12/2025)
BSS002AESJ	Oligocène	-	-	-3,0 (2012)
BSS001ZPJQ	Oligocène	3.10 ⁻³	-	-
BSS001ZNWD	Oligocène	8.10 ⁻³		-22,22 (10/2025)

Le gradient hydrodynamique de la nappe a été estimé à partir des cartes piézométriques accessibles sur le SIGES aquitaine pour les deux nappes considérées. La géométrie des isopièzes du secteur

induit une forte incertitude sur la valeur de gradient locale au droit du site d'étude. Des valeurs de $5,0 \cdot 10^{-4}$ et $2,3 \cdot 10^{-3}$ ont été retenues respectivement pour l'Eocène et l'Oligocène.

REMARQUE

L'ouvrage BSS002AEFL n'est pas utilisé (suspendu d'après données ARS).

5.3.1.1.2 Aléa remontée de nappe

La proximité du site d'étude avec la Garonne rend la zone sujette aux remontées de nappes (Figure 11). En effet, à proximité de la Garonne, les relations nappes rivières sont importantes et ainsi le niveau piézométrique est relativement haut.

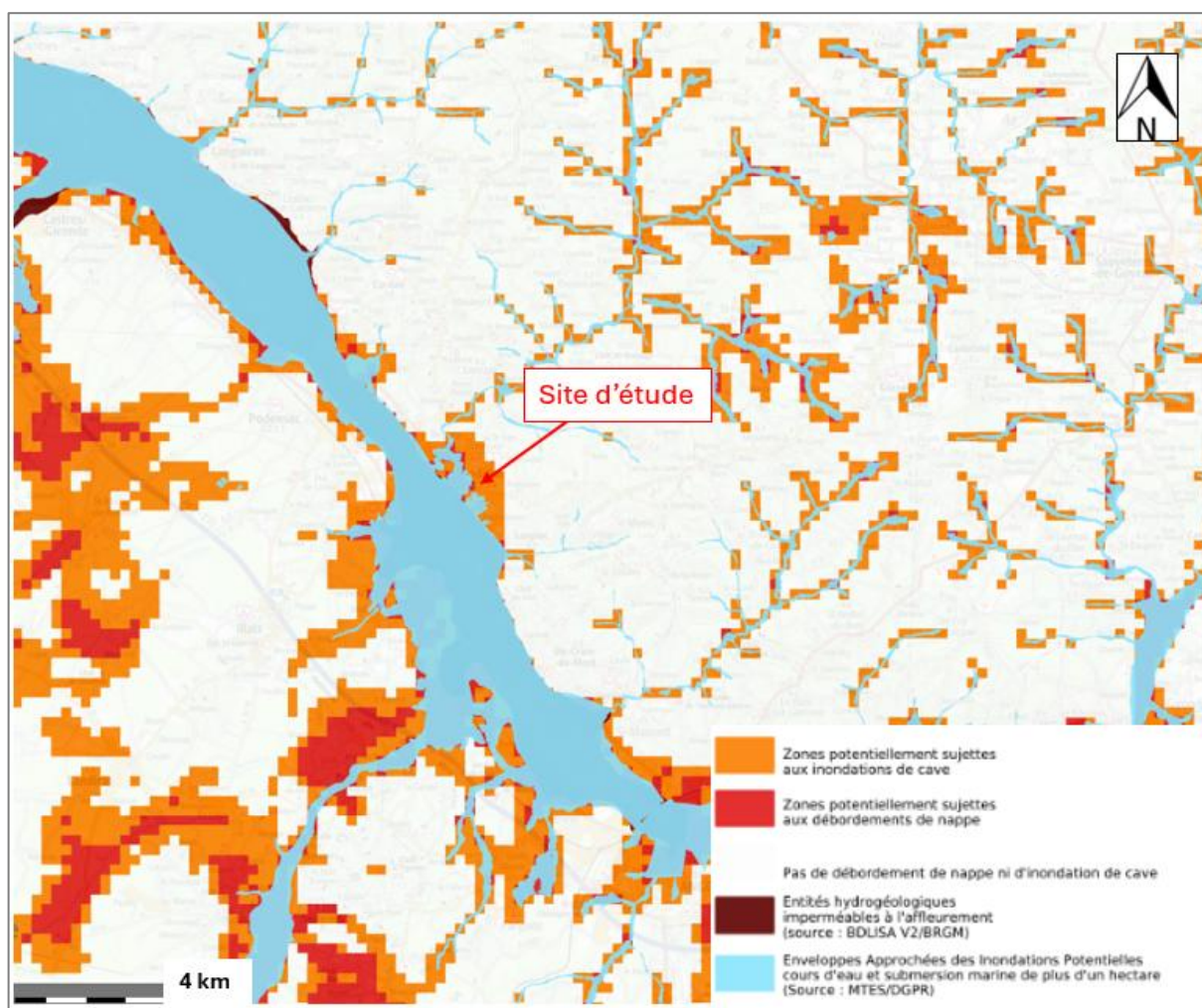


Figure 11 : Carte des risques liés aux phénomènes de remontée de nappe au droit de la zone d'étude.

5.3.1.1.3 Qualité des eaux

- Nappe de l'Oligocène

La nappe de l'Oligocène étant très peu exploitée dans le secteur, aucune analyse d'eau récente a été recensée.

- Nappe de l'Eocène

Dans le secteur (cf forages en rouges indiqués sur la figure 10), l'eau de la nappe est de type bicarbonaté calcique et magnésienne. Les principaux paramètres et leurs concentrations, mesurés au niveau de forages alentours sont donnés ci-dessous :

- pH : 7,6 ;
- Conductivité : 387 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Fer : 136 $\mu\text{g}/\text{L}$;
- Aluminium : 5,36 $\mu\text{g}/\text{L}$;
- Manganèse : 10,5 $\mu\text{g}/\text{L}$;
- Sulfates : 32 mg/L ;
- Fluorures : 0,384 mg/L ;
- Chlorures : 10 mg/L .

Des concentrations en fer et en manganèse importantes peuvent entraîner des phénomènes de colmatage via sa précipitation en contact avec l'oxygène. Les analyses chimiques des ouvrages du secteur ne révèlent pas pour la nappe de l'Eocène des concentrations alarmantes.

Une attention particulière devra être portée à l'étanchéité à l'air de la boucle géothermale, afin de limiter les phénomènes de précipitation dans les équipements hydrauliques, en particulier l'échangeur en chaufferie, et ainsi prévenir toute usure prématurée liée à la corrosion.

Dans la mesure où l'ensemble de l'eau prélevée sera réinjectée, l'installation géothermique n'aura pas d'influence sur la qualité des eaux souterraines.

5.3.1.2 Dans le cadre de la GMI, réalisation d'un doublet à l'Oligocène

La nappe de l'Oligocène est peu exploitée dans le secteur, en rive droite de la Garonne. En effet, la productivité de la nappe de l'Oligocène est très hétérogène et plutôt faible.

La réalisation d'une solution de géothermie sur la nappe de l'Oligocène révèle plusieurs points bloquants :

- Une faible productivité de la nappe de l'Oligocène, ne permettant pas d'atteindre des besoins suffisants ;

- Un niveau statique proche de la surface qui poserait des problèmes pour la réinjection ;
- La nécessité de réaliser plusieurs doublets sur un terrain où les zones disponibles sont réduites.

Au vu des difficultés identifiées, cette solution n'a pas été retenue pour la suite de l'étude.

5.3.1.3 Situation 1 : réalisation d'un doublet à l'Eocène pour les besoins en chaud uniquement – dispositif hors GMI

5.3.1.3.1 Puissance atteignable à un débit moyen interannuel de 35 m³/h

Le cas étudié ici concerne un doublet permettant de couvrir des besoins en chaud uniquement. Les besoins en termes de puissances extraites au sous-sol sont présentés en Figure 12.

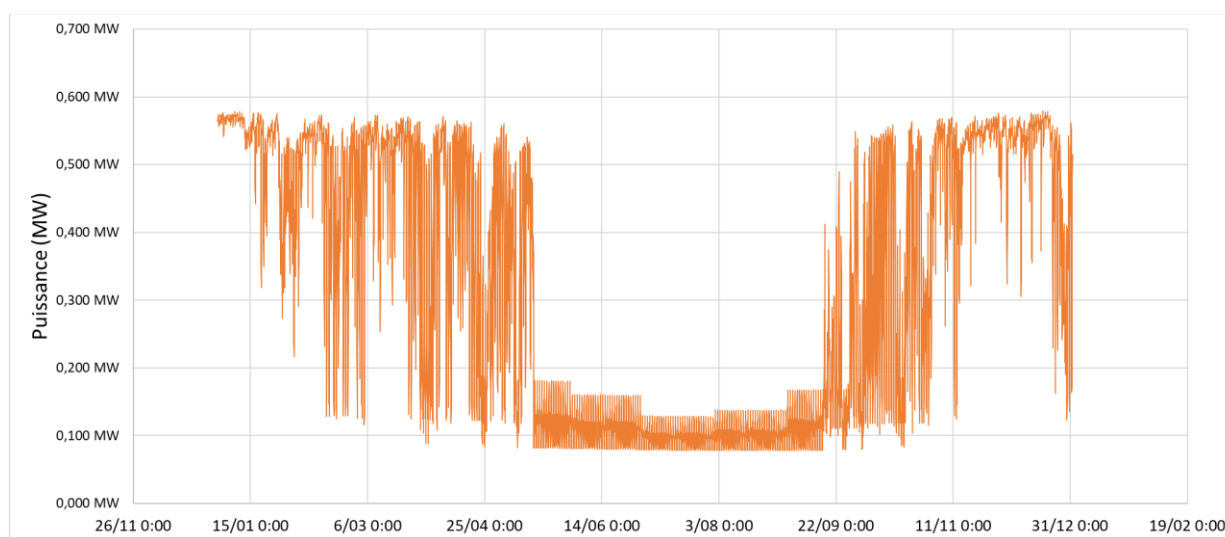


Figure 12 : Demande calorifique au sous-sol en MW (source Manergy)

Etant donné les caractéristiques de la nappe (productivité, profondeur, niveau statique), un doublet géothermique à l'Eocène permettrait de couvrir la majorité des besoins.

Tableau 11 : Prédimensionnement d'un doublet sur nappe considérant un delta T de 8°C

Delta T (°C)	8
Puissance chaude maximum (kW)	579
Débit maximum associé (m ³ /h)	63
Puissance chaude moyenne (kW)	322
Débit moyen associé (m ³ /h)	35

Deux simulations ont été étudiées avec un delta T de 8 ou 10 °C. Les paramètres utilisés dans les deux cas sont répertoriés ci-dessous ainsi que les résultats obtenus :

Tableau 12 : Simulations de doublets à l'Eocène

PARAMETRES D'ENTREE	SIMULATION 1	SIMULATION 2	SIMULATION 3
Transmissivité (m ² /s)	4,50.10 ⁻⁴	4,50.10 ⁻⁴	4,50.10 ⁻⁴
Gradient hydraulique (m/m)	5,0.10 ⁻⁴	5,0.10 ⁻⁴	5,0.10 ⁻⁴
Epaisseur efficace (m)	20	20	20
Débit moyen interannuel (m ³ /h)	30	35	35
Température initiale eau (°C)	20	20	20
Ecartement des forages (m)	400	400	300
Delta T (°C)	10	8	8
Angle par rapport au sens d'écoulement de la nappe (°)	30	30	30
RESULTATS			
Temps de percée	7,3 ans	6,09 ans	3 ans
Température à 45 ans (°C)	Puits de prélèvement : 13,08 Puits de réinjection : 3,08	Puits de prélèvement : 13,88 Puits de réinjection : 5,89	Puits de prélèvement : 9,72 Puits de réinjection : 1,73
Niveau de la nappe par rapport à l'initial (m)	Puits de prélèvement : -21 Puits de réinjection : +20	Puits de prélèvement : -21 Puits de réinjection : +20	Puits de prélèvement : -21 Puits de réinjection : +20

La température à 45 ans simulée pour un delta T de 10 °C est trop faible. En effet, il est préconisé de rester à une température supérieure à 4°C. Un delta T de 8°C maximum est ainsi préconisé. De même une interdistance minimale de 400 m est préconisée pour assurer une température de l'eau satisfaisante. Les simulations ci-dessus ont été réalisées selon un delta T de 8°C afin d'étudier une situation optimisée de la valorisation géothermale.

5.3.1.3.2 Ecartement des forages de réinjection et implantation

Réglementairement, plusieurs implantations sont envisageables mais elles doivent respecter les conditions suivantes :

- Orientation entre le forage de production et de réinjection dans l'axe d'écoulement de la nappe ;
- Espacement de plus de 200 m entre le forage de réinjection et le forage de production ;
- Ouvrage recommandé à plus de 35 m d'un stockage d'hydrocarbure.

Dans le cas étudié, au débit de $35 \text{ m}^3/\text{h}$, la distance entre les deux forages à respecter est de 400 m environ. Cette distance permet de minimiser l'impact de la réinjection sur le forage producteur et ainsi d'allonger le temps de percée.

Théoriquement, au vu de la place disponible sur le site du centre hospitalier de Cadillac-sur-Garonne, l'implantation d'un doublet selon une interdistance de 400 m est possible telle qu'illustrée en Figure 13.



Figure 13 : Implantation possible des forages

Les emplacements proposés ci-dessus sont hypothétiques. La faisabilité de cette hypothèse est à vérifier en fonction des usages du site au quotidien afin d'assurer une continuité des services lors de la phase chantier ainsi qu'une accessibilité aux forages en cas de besoin lors de la phase d'exploitation.

Les contraintes associées à la phase chantier seront développées ultérieurement.

Il est à noter la présence d'une canalisation transportant du gaz naturel au sud du site (Figure 14).



Figure 14 : canalisation de transports de produits dangereux au droit du site

5.3.1.4 Situation 2 : intégration des besoins en froid : solution d'un doublet géothermique à balayage sur la nappe de l'Eocène

5.3.1.4.1 Principe d'un doublet géothermique à balayage

Pour un doublet géothermique à balayage, les deux ouvrages reçoivent des affectations hydrauliques fixes : un ouvrage de production équipé de la pompe d'exhaure et un ouvrage de réinjection. L'eau réinjectée aura été réchauffée lors des cycles de production de froid (cycle estival en climatisation) et refroidie lors des cycles de production de chaud (cycle hivernal en chauffage).

Des ondes chaudes et froides vont se propager successivement au sein de l'aquifère (Figure 12). Après une durée de fonctionnement égale au temps de percée, la première onde thermique atteindra le forage de production. A partir de ce moment, sa température de production va ensuite osciller car les ondes chaudes et froides vont se succéder à raison de deux par cycle d'exploitation. La valeur moyenne stabilisée de la température sur un cycle dépend principalement du bilan énergétique entre les injections chaudes et froides et du taux de recyclage.

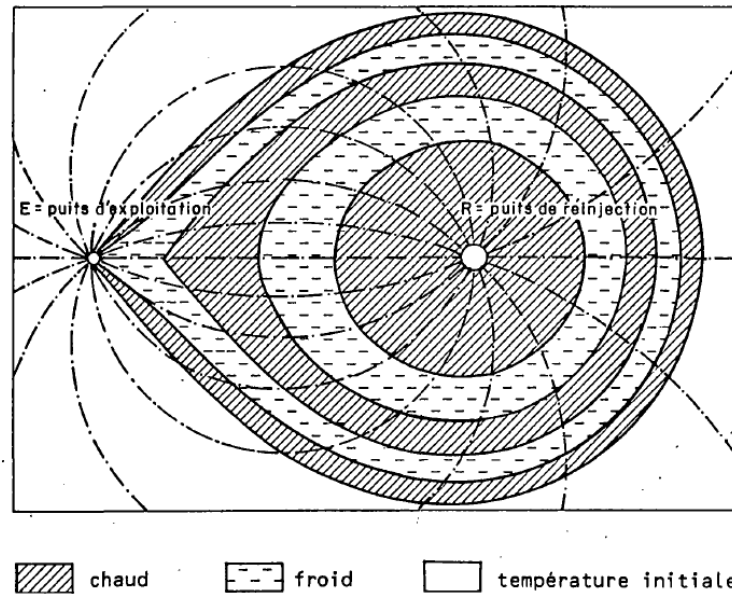
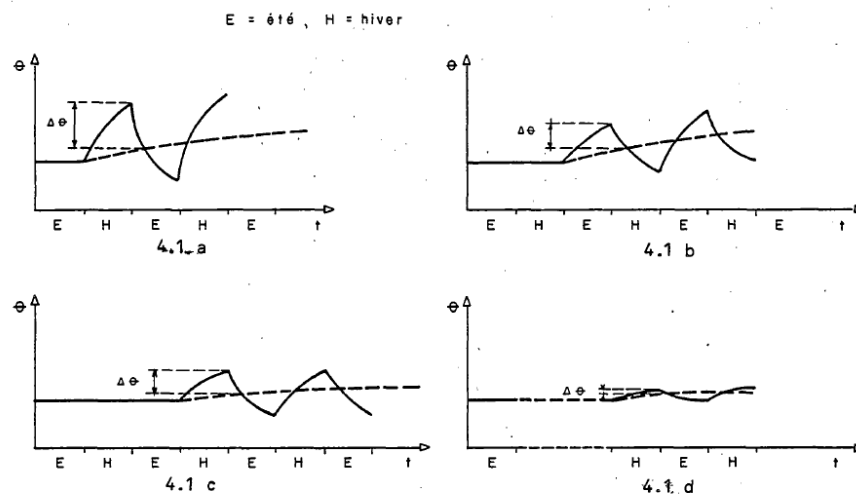


Figure 15 : Exemple de propagation des fronts chauds et froids dans le cas d'un doublet à balayage

Extrait rapport BRGM 82-SGN-023-EAU

Le fonctionnement en balayage induit donc des oscillations de température au puits de production. L'amplitude des oscillations est fortement liée au temps de percée. L'évolution de l'amplitude de ces oscillations en fonction du temps de percée est représentée sur la figure suivante.



4.1 - Doublet à balayage - Températures à la production en fonction du rapport (temps de percée/durée d'un cycle)

- a) Exploitation en phase ; temps de percée minimal = 1/2 période
- b) Exploitation en opposition de phase ; temps de percée = 1 période
- c) exploitation en phase ; temps de percée = 1.5 périodes
- d) Oscillations amorties ; temps de percée > 3 périodes

Figure 16 : Evolution de l'amplitude des variations de température au puits de production en fonction de différents temps de percée (source : rapport BRGM 82-SGN-023-EAU)

La distance minimale d'implantation entre les forages du doublet assurant le bon fonctionnement du dispositif est définie comme la distance minimale permettant un amortissement de l'amplitude des variations de température au puits de production. Cet amortissement est assuré lorsque le temps de percée est supérieur à 3 fois la durée d'une période (cas 4.1.d de la Figure 16, une période étant égale à un cycle de fonctionnement en chaud ou en froid soit environ 6 mois). **Dans ces conditions, l'écartement entre les forages doit permettre de vérifier un temps de percée supérieur à 18 mois.**

5.3.1.4.2 Application aux besoins du centre hospitalier et détermination de l'interdistance

Des besoins en froids ont été formulés par le Centre hospitalier et sont présentés ci-dessous :

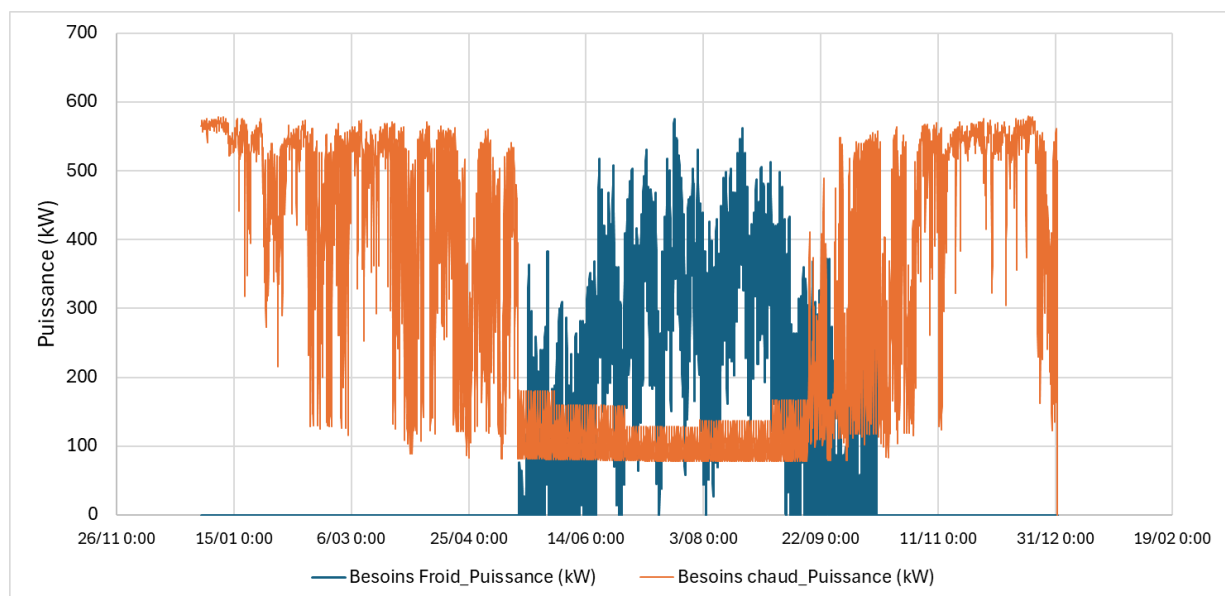


Figure 17 : Puissance issue du sous-sol nécessaire pour répondre aux besoins en chaud et en froid (source : MANERGY).

Le graphique détaille les puissances appelées au sous-sol pour répondre aux besoins en chaud (chauffage et eau chaude sanitaire) ainsi qu'en froid (climatisation) selon les scénarios considérés par MANERGY. Le Tableau 13 : **Prédimensionnement d'un doublet sur nappe à balayage** présente les caractéristiques à considérer pour satisfaire les besoins en chaud et en froid.

Tableau 13 : Prédimensionnement d'un doublet sur nappe à balayage

	Chaud	Froid
Delta T considéré (°C)	7	6
Puissance maximum (kW)	579,1	575,5
Débit maximum associé (m³/h)	71,3	82,7
Puissance chaude moyenne (kW)	287	84,6
Débit moyen associé (m³/h)	35,3	12,2

Dans le cas du doublet à balayage, un delta T de 7°C pour le fonctionnement à chaud a été retenu afin d'assurer une cohérence entre les modes de fonctionnement à chaud et à froid. L'objectif étant d'assurer un équilibre thermique durable compte tenu de l'alternance des réinjections d'eau chaude et froide.

Le débit maximal est observé en mode froid. Ce cas est expliqué par le delta T plus faible en mode froid qu'en mode chaud. Afin d'obtenir une puissance maximale comparable, il est ainsi nécessaire d'augmenter le débit de pompage.

Le fonctionnement thermique d'un doublet en mode balayage peut être simulé en considérant l'écart thermique moyen résultant du déséquilibre thermique entre les deux modes chaud et froid, constaté sur une année.

$$\text{Ecart thermique moyen} = \frac{Q_{Mc} \times N_b \text{ mois chaud} \times \Delta\theta_{ch} + Q_{Mf} \times N_b \text{ mois froid} \times \Delta\theta_{fr}}{Q_{M} \text{ annuel} \times 12}$$

Avec : Q_{Mc} = Débit moyen en mode chaud Q_{Mf} = Débit moyen en mode froid
 $\Delta\theta_{ch}$ = Ecart thermique mode chaud $\Delta\theta_{fr}$ = Ecart thermique mode froid

Dans le cas présent, l'écart thermique moyen est -5,3°C.

Afin de déterminer l'interdistance optimale à respecter entre le forage producteur et injecteur, plusieurs simulations ont été étudiées avec une interdistance de 200, 300 et 400 m. Les paramètres utilisés dans les deux cas sont répertoriés ci-dessous ainsi que les résultats obtenus :

Tableau 14 : résultats des simulations obtenues pour un doublet à balayage

PARAMETRES D'ENTREE	SIMULATION 1	SIMULATION 2	SIMULATION 3
Transmissivité (m²/s)	4,50.10 ⁻⁴	4,50.10 ⁻⁴	4,50.10 ⁻⁴
Gradient hydraulique (m/m)	5,0.10 ⁻⁴	5,0.10 ⁻⁴	5,0.10 ⁻⁴
Epaisseur efficace (m)	20	20	20

Débit moyen interannuel (m ³ /h)	48	48	48
Température initiale eau (°C)	20	20	20
Ecartement des forages (m)	400	300	200
Delta T eq (°C)	-5,2	-5,2	-5,2
Angle par rapport au sens d'écoulement de la nappe (°)	30	30	30
RESULTATS			
Temps de percée	4,8 ans	937 jours (2,6 ans)	346 jours
Température à 45 ans (°C)	Puits de prélèvement : 15,42 Puits de réinjection : 10,43	Puits de prélèvement : 12,46 Puits de réinjection : 7,46	Puits de prélèvement : 9,86 Puits de réinjection : 4,87
Niveau de la nappe par rapport à l'initial (m)	Puits de prélèvement : -30 Puits de réinjection : +30	Puits de prélèvement : -31 Puits de réinjection : +30	Puits de prélèvement : -31 Puits de réinjection : +30

La simulation à l'aide du logiciel Feflow du fonctionnement du doublet est réalisée au débit moyen annuel de 48 m³/h. Il est à noter que ce débit moyen correspond à un débit équivalent annuel de sorte à représenter un débit constant sur l'année. La modélisation a pour objectif d'illustrer de la façon la plus réaliste possible les incidences de la géothermie sur la nappe. L'ensemble des sollicitations effectuées sur la nappe doivent donc être pris en compte.

La température initiale de la nappe est de 20 °C.

Nous considérons ici le cas le moyen d'une orientation du doublet à 30 ° par rapport à l'écoulement naturel de la nappe.

Les résultats observés à l'issue des simulations sur 45 ans (autorisation d'exploitation au titre du permis minier de 30 ans + un renouvellement de 15 ans) sont présentés ci-dessous :

- Interdistance de 200 m : le temps de percée est inférieur à un an. Afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage, pour un dispositif à balayage, un temps de percée supérieur à 18 mois est préconisé. Ce scénario n'est donc pas retenu.
- Interdistance de 300 m : le temps de percé est de 2,6 ans et donc supérieur à 18 mois. De plus les températures aux forages producteur et injecteur sont satisfaisantes. Une interdistance de 300 m minimum peut donc être retenue
- Interdistance de 400 m : le temps de percée est de 4,8 ans. Les températures aux forages producteur et injecteur sont très satisfaisantes. Une interdistance de 400 m permettrait d'assurer un fonctionnement optimal du doublet.

Il est à noter que pour le dispositif à balayage, les résultats présentés ci-dessus représentent un scénario pessimiste avec la mise en place de 2 PAC distinctes pour la distribution de chaud et de froid. La mise en place d'une thermofrigopompe permettrait d'améliorer le rendement de l'installation en nécessitant un débit plus faible lors de la période estivale (besoins simultanés en chaud et en froid) et surtout un delta T de rejet moins marqué.

5.3.1.5 Vérification du temps de percée durant un cycle de chaud ou froid au débit de pointe pour la distance retenue

Le chapitre précédent a permis de définir la distance minimale pour le bon fonctionnement du dispositif à balayage. Ce calcul prend en compte un régime de fonctionnement moyen du doublet. La distance calculée doit donc être confirmée par le calcul du temps de percée au débit de pointe du dispositif pour le mode de fonctionnement le plus pénalisant. Cette vérification permet de prendre en compte les éventuels forts déséquilibres dans les débits pompés entre les modes chaud et froid.

En utilisant le cas d'un puits unique, on regarde s'il n'y a pas d'arrivée du front thermique lié à la réinjection sur le puits de production au bout d'un cycle au débit de « pointe » dans le mode de fonctionnement le plus pénalisant (chaud ou froid). Dans le cas présent et afin de ne pas multiplier les calculs, cette vérification est effectuée pour le cas le plus pénalisant qui sera le fonctionnement en régime froid (été) au débit de pointe de 83 m³/h avec une configuration en doublet implanté à 30 °, avec une transmissivité de nappe pénalisante de 4,5.10⁻⁴ m²/s.

Pour une distance de 300 m, le temps de percée calculé est de 470 jours soit 1,3 an. Il n'y a donc pas de risque d'arrivée du front thermique au cours d'un cycle au débit de pointe de 83 m³/h, quel que soit la configuration spatiale du doublet et les hypothèses de transmissivité prises pour la nappe.

Le temps de percée pour une configuration avec une interdistance de 400 m n'a pas été calculé au débit de pointe mais ce dernier sera supérieur à 470 jours.

5.3.1.6 Contrainte phase chantier et phase exploitation

En phase chantier : en fonction de l'implantation définitive des ouvrages, une plateforme calcaire de l'ordre de 400 m² sera nécessaire pour assurer la stabilité de la machine de forage et pour accueillir l'ensemble de l'environnement de chantier (exemple d'environnement Figure 18). Le site devra être approvisionné en eau (minimum 10 m³/h en instantané) pour les phases de fabrication de la boue de forage, cimentation et de préparation des traitements en vue du développement du forage. Un point de rejet des eaux de développement et de pompage devra également identifier. Ces points devront être détaillés en phase AVP-PRO.

Dans le cadre du projet, les délais prévisionnels (hors travaux de raccordement et maîtrise d'œuvre) sont de :

- 6 semaines de période de préparation ;
- 2,5 mois de travaux par forage ;
- 1 mois pour l'équipement des forages.



Figure 18 : Exemple d'un environnement de chantier de forage

En phase exploitation : Chaque ouvrage aura une emprise de l'ordre de 10 m^2 et nécessitera un accès lors du chantier et pendant l'exploitation afin de pouvoir y réaliser les contrôles réglementaires quinquennaux et décennaux. Il devra être laissé autour de chaque forage une surface minimale de 200 m^2 , ou du moins avoir la possibilité de remobiliser une telle surface, pour les opérations de maintenance et d'entretien (changement de pompe, diagnostic des forages tous les 5 ou 10 ans, opérations de régénération des ouvrages...).

Les équipements en tête de forage seront sous un capotage isolé. Au droit de chaque forage, un boîtier de raccordement et/ou une armoire électrique sera à prévoir pour l'alimentation de la pompe de forage et/ou instrumentations.



Figure 19 : Exemple d'équipement en tête de forage



Figure 20 : Exemple de tête de forage en exploitation avec capotage

5.3.1.7 Condition de mise en œuvre

Les forages de production et de réinjection seront reliés par une canalisation isolée circulant dans l'échangeur de la PAC. L'eau pompée sera ainsi réinjectée avec seulement une différence de température.

Le forage de production sera équipé d'une colonne d'exhaure avec une pompe de production. Le forage de réinjection sera équipé d'une simple colonne plongeuse.

La réalisation des forages devra respecter la norme NF X 10-999 des forages d'eau et de géothermie. Chaque ouvrage occupera une dalle de l'ordre de 10 m² de 30 cm d'épaisseur comportant les équipements hydrauliques et devra être protégé par un capot fermé à clef.

5.3.1.8 Contexte réglementaire hors GMI (80 m³/h-DT 7°C)

D'un point de vue réglementaire, la réalisation d'une installation hors GMI nécessite :

Dossier d'examen au cas par cas + instruction – **2 mois** ;

L'obtention d'un titre minier de recherche dit « **autorisation de recherche** » (**AR**) selon la procédure définie aux articles 5 à 9 du décret 78-498 modifié par décret n°2019-1518 du 30 décembre 2019. L'autorisation est délivrée après enquête publique, avis du CODERST et mise en concurrence et la réalisation d'un **Dossier d'Autorisation Environnementale (DAE) portant une « autorisation d'ouverture de travaux miniers » (AOTM) ainsi qu'une étude d'incidence ou une étude d'impact** pour réalisation des travaux au titre de l'article 3 du décret 2006-649 relatif à la Police des Mines modifié par Décret n°2021-1838 du décembre 2021-art. 34. L'autorisation est délivrée après enquête publique et avis du CODERST.

La réalisation de ce dossier (AR-DAENV) est de l'ordre de 3 mois, associés à 13 mois d'instruction.

Compte tenu des caractéristiques du doublet (puissance primaire inférieure à 20 MW, profondeur des ouvrages supérieur à 200 m), le gîte géothermique devra ensuite détenir un **Permis d'EXploitation (PEX)** comme défini à l'article 3 du décret n°2019-1518 du 30 décembre 2019 relatif aux titres de recherche et d'exploitation des opérations de géothermie présentant les dispositions modifiant le décret n°78-498 du 28 mars 1978.

La réalisation d'un PEX nécessite 1 mois, associés à 8 mois d'instruction qui peuvent être superposé avec les travaux d'équipement des forages.

Deux à trois années sont à prévoir pour la réalisation et l'instruction de ces dossiers, hors travaux de forage et équipement.

5.3.1.9 Recommandations

Il ressort de cette étude de faisabilité que :

- La nappe de l'Oligocène présente trop de contraintes au droit du site pour permettre une exploitation intéressante en géothermie. Les problématiques de productivité et réinjection ont notamment été soulevées.
- La nappe de l'Eocène présente quant à elle des caractéristiques intéressantes, notamment en termes de profondeur, de productivité et de température. L'eau présente des analyses chimiques satisfaisante qui ne présente pas à ce stade de problématiques liées aux phénomènes de colmatage.

Deux situations ont été étudiées pour la création d'un doublet à l'Eocène avec la prise en compte de besoin en chaud uniquement (chauffage et ECS) puis de besoins en chaud et en froid. Les conclusions suivantes ressortent de ces deux scénarios :

- En considérant uniquement les besoins en chaud, les simulations montrent que l'interdistance nécessaire pour assurer la pérennité du dispositif est de 400 m. Une interdistance plus faible ne permettant pas d'assurer une température de l'eau suffisante au bon fonctionnement du doublet. De la même façon le temps de percée est satisfaisant à partir de 400 m d'interdistance.
- La prise en compte des besoins en froid permet de réduire l'interdistance entre le forage de production et de réinjection. Une interdistance de 300 m minimum est préconisée pour ce cas de figure. Cette distance permet d'assurer un temps de percée supérieur à 18 mois, condition nécessaire pour le bon fonctionnement d'un doublet géothermique à balayage.

Le choix entre les deux solutions à l'Eocène dépend de la capacité à mettre en place l'ensemble des équipements associés à la distribution de froid dans les bâtiments. L'ensemble des résultats présentés dans cette étude peuvent être amenés à varier en fonction des choix définitifs effectués concernant les équipements thermiques.

Suite aux éléments vu précédemment, il a pu être envisagé l'implantation des installations comme suit :

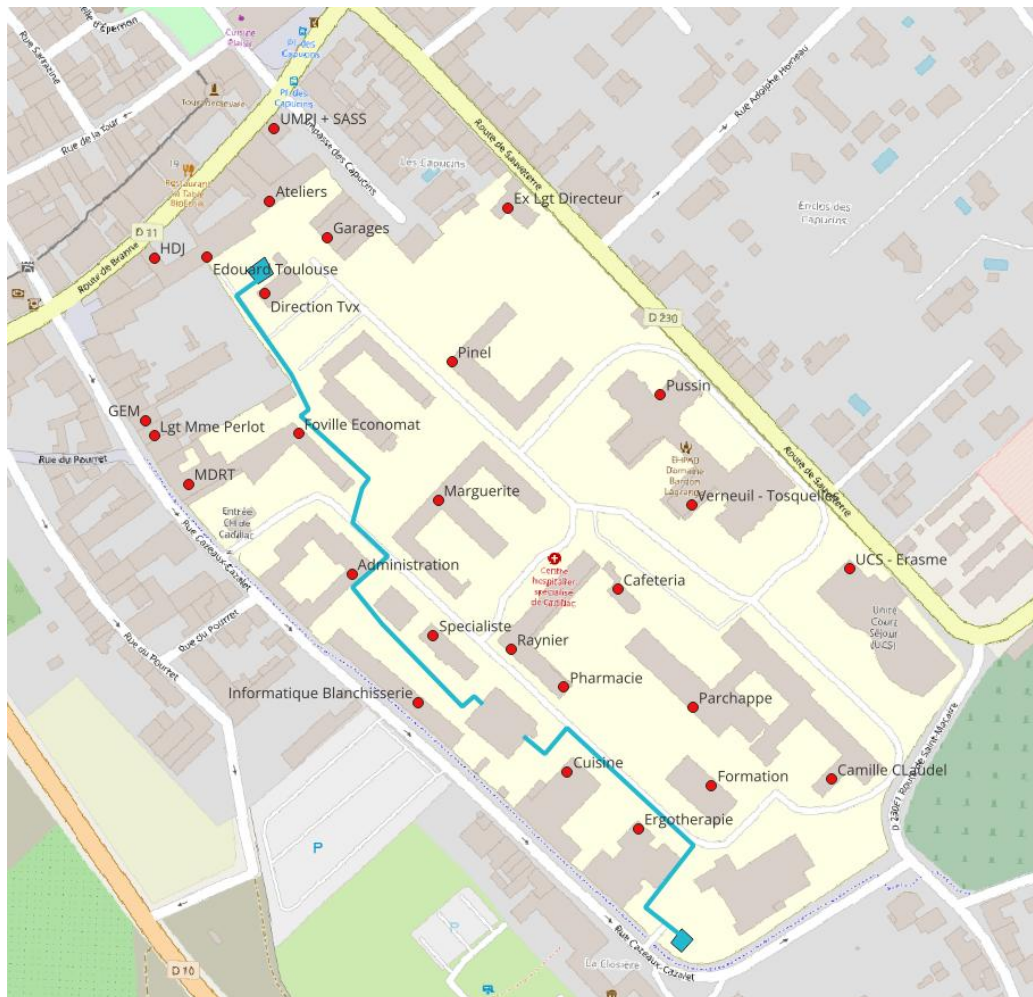


Figure 21 : Proposition d'implantation du réseau et des forages géothermiques

Sur cette implantation, on retrouve les installations suivantes :

- Un puit d'exhaure situé au Sud du site
- Un puit de réinjection au Nord du site
- Un réseau hydraulique permettant d'acheminer le fluide géothermique du puit d'exhaure vers la chaufferie, puis de la chaufferie vers le puit de réinjection.

5.3.2 Centrale de production thermique

La centrale de production de chaleur (et de froid), se situera dans la chaufferie actuelle du CH de Cadillac.

Le démantèlement des installations propres à la cogénération permet de libérer beaucoup d'espace au sein de la chaufferie.

Les équipements qui doivent être déposés :

- Local cogénération :
 - o Cogénération
 - o Aérocondenseurs
- Local ballons :
 - o Préchauffage ECS via la cogénération (échangeur, ballon, hydraulique et pompes)
- Local chaudières :
 - o Chaudières 2 et 3
 - o Production ECS
 - o Distribution chauffage

Les équipements à ajouter dans la chaufferie :

- PAC, échangeur et panoplie de circulation
- Ballons de stockage PAC
- Nouvelle panoplie primaire

L'implantation suivante pourrait être envisagée dans la chaufferie actuelle :

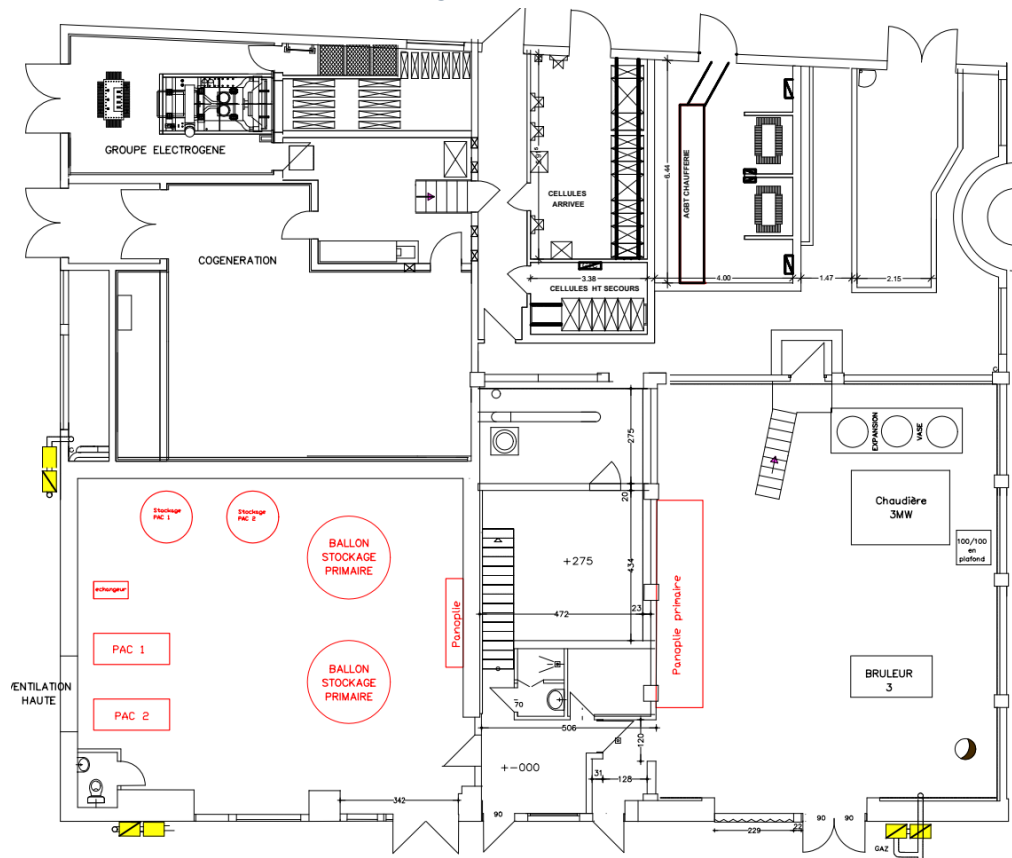


Figure 22 : Implantation des équipements dans la chaufferie actuelle

REMARQUE

Les ballons actuels de 15 m3 n'ont pas prévu d'être déposés, les candidats au MGP pourront étudier la possibilité de leur utilisation pour une optimisation des performances des installations.

5.3.2.1 Pompes à chaleur

La source de chaleur géothermique nécessite d'être réhaussée via un système de pompes à chaleur. En effet, la ressource issue du sous-sol n'est pas prélevée à une chaleur suffisante pour couvrir les besoins de chauffage et ECS. Les pompes à chaleur devront donc permettre de passer d'environ 20°C à 70°C.

Les pompes à chaleur sélectionnées sont de marque TRANE (ou équivalente), présentant les caractéristiques principales suivantes :

- Modèle : TRANE RTSF-110 HSE AAA
- Puissance unitaire côté condenseur : 450 kW
- Régime de température côté condenseur : 70/55°C
- COP machine : 3,1



Figure 23 : Exemple de PAC HFO

En cas de nécessité d'une température supérieure sur le réseau primaire (afin d'effectuer un choc thermique pour l'ECS par exemple), la chaudière pourra relever la température en appoint.

Les caractéristiques complètes sont présentées dans la fiche technique ci-dessous.

Tableau 15 : Caractéristiques techniques de la Pompe à Chaleur

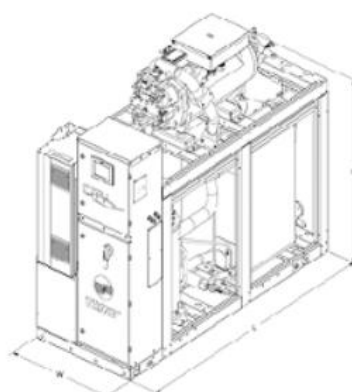
Coditions projet N°1		
	Evap	Cds
Temp. Entrée EVP	20,0 C	55,0 C
Temp. Sortie EVP	11,7 C	70,0 C
Refrigerant saturation temp.		69,2 C
Type fluide EVP	Eau	Eau
Point de congélation fluide	0,0 C	0,0 C
Facteur d'encrassement EVP	0,000000 m2-deg C/kW	0,000000 m2-deg C/kW

Performances aux conditions projet N°1		
	Evap	Cds
Puissance brute	305,17 kW	447,77 kW
Puissance nette	305,03 kW	447,88 kW
Puissance absorbée	145,95 kW	145,95 kW
Puissance totale absorbée nette	146,36 kW	146,36 kW
EER / COP Brut	2,090 kW/kW	3,070 kW/kW
EER / COP Net	2,080 kW/kW	3,060 kW/kW
Débit EVP	8,75 L/s	7,25 L/s
Pertes de charge EVP	10,7 kPa	9,7 kPa
Débit mini EVP	6,37 L/s	2,74 L/s
Débit maxi EVP	38,60 L/s	38,60 L/s

Les PAC présentent un EER/COP Net de 3,06, ce qui est une valeur tout à fait satisfaisante du fait de l'écart de température importante entre la température de la source froide et la température de production primaire. La fiche Fond Chaleur – Géothermie Profonde de l'ADEME ne mentionne plus de valeur minimale de COP pour les pompes à chaleur.

En ce qui concerne les caractéristiques de mises en œuvre, ces machines présentent l'avantage d'être très compactes et de pouvoir être intégrées dans un bâtiment déjà existant. L'implantation de ces PAC est tout à fait compatible avec la surface disponible dans le local cogénération.

Dimensions and weight	
Longueur	2241 mm
Largeur	901 mm
Hauteur	2050 mm
Poids à l'expédition (avec emballage)	1986 kg
Poids	2127 kg



REMARQUE

Il a été étudié la mise en parallèle des pompes à chaleur, mais il pourra être étudié par les candidats du MGP, la mise en série des PAC, afin d'optimiser les régimes de température et d'améliorer le COP global du projet.

Les candidats du MGP pourront bien évidemment consulter d'autres fournisseurs afin d'identifier les équipements présentant les meilleures caractéristiques techniques pour répondre au projet.

Dans le cas du scénario 2 et de la production de froid, si ce scénario est retenu en étude dans le cadre du MGP, les candidats pourront étudier le recours à des Thermofrigopompes. Ces équipements permettent de produire en simultanée, de la chaleur et du froid. Néanmoins la thermofrigopompes viendrait réduire la chaleur réinjectée dans la nappe en été, et de ce fait, viendrait réduire le rééquilibrage thermique de la nappe.

5.3.2.1 Focus conformités - fluide frigorigène

L'un des fluides frigorigènes retenu est le R-1234ze, fluide HFO de 4^e génération à pouvoir de réchauffement global très faible (GWP $\approx$ 7).

La PAC retenue utilise le fluide frigorigène **R-1234ze**, appartenant à la famille des HFO (4^e génération) :

- Classe de sécurité **A2L** (légèrement inflammable) ;
- Pouvoir de réchauffement global (GWP) très faible : $\approx$ 7 ($\approx$ 700 pour le propane et $>$ 1 000 pour le R-134a) ;
- Caractéristiques proches de substances naturelles comme le CO₂, ce qui en fait un fluide robuste vis-à-vis des évolutions réglementaires sur les F-gaz.

L'utilisation d'un fluide A2L impose de respecter les **prescriptions du fabricant** relatives au traitement du risque de fuite de fluide frigorigène, notamment :

- **Ventilation** adaptée du local de chaufferie ;
- Mise en place éventuelle d'une **détection de fuite** de fluide frigorigène ;
- **Asservissements** de sécurité en cas de fuite de fluide (arrêt automatique de l'installation, fermeture du circuit frigorifique, mise en route de la ventilation forcée) ;
- **Signalisation** et dispositifs d'alerte adéquats ;

5.3.2.1.2 Comparatif des technologies de PAC

Le tableau ci-dessous présente un comparatif des technologies de PAC type HFO (R1234ze) et CO₂ :

Tableau 16 : Comparaison PAC HFO / PAC CO₂

Site	PAC - R1234 ze	PAC - CO2	Avantages/Inconvénients	
Cycle thermodynamique	Cycle subcritique	Cycle Transcritique	SO	SO
Potentiel Réchauffement Global	7	1	+	++
Températures départ côté condenseur	Départ eau optimal : 50/70°C Jusqu'à 90-100°C désormais	Départ eau optimal : 70/90°C Jusqu'à 120°C pour des applications spécifiques	+	++
Température de retour côté condenseur	Optimal avec un ΔT modéré, de 5 à 20°C	Très performant pour ΔT important : 20 à 40 °C)	++	-/+
COP (selon régime de température du projet)	COP élevé sur de la moyenne température (50-70°C) : 4 à 6 Projet : 2,8 - 3,1	COP élevé sur de la haute température (>70 °C) : 3 à 5 Projet : 2,3-2,5	++	+
Technologie de compresseurs	Vis, scroll, centrifuge	Piston transcritique, semi-hermétiques renforcés	SO	SO
	Les technologies de compresseurs sont adaptées aux gammes de puissances des machines			
Régimes de pression	Standard HP : 10-15 bars BP : 2-5 bars	Très élevés HP : 80-130 bars BP : 25-45 bars	SO	SO
Contrainte de maintenance	Maintenance standard HVAC	Maintenance spécialisée (Haute Pression)	++	+
Coûts de maintenance	Entretien classique 7 000 €/an	Entretien complexe 12 000 €/an	++	+
Contraintes Fluide	Coût du kg de fluide : ~90 €/kg	Coût du kg de fluide : ~10 €/kg	+	++
	Charge en fluide : 47 kg Taux normal de fuite : 5% Soit environ 210 €/an	Charge en fluide : 180 kg Taux normal de fuite : 5% Soit environ 90 €/an		
Coûts machine (selon consultations fournisseurs)	Pour une machine de 450 kW : 60 à 80 k€	Pour une machine de 450 kW : 120 à 240 k€	++	-/+

5.3.2.2 Appoint/Secours au gaz naturel

On rappelle ici l'importance de la production d'appoint dans l'équilibre économique d'un réseau : une production EnR quelle qu'elle soit (Géothermie, Biomasse, Solaire) représente toujours un coût d'investissement très élevé. En effet, en général 90% des besoins sont couverts par 50% de la

puissance, ce qui signifie que toute puissance installée au-dessus de 50% de la puissance max ne sont utilisés que pour produire 10% des besoins. Pour obtenir un réseau économiquement équilibré, il est donc préférable de produire ces 50% de la puissance max avec une énergie non renouvelable présentant des coûts d'installation plus bas comme le gaz. La disponibilité et modulation d'une installation gaz étant élevée, cet appoint participera également à secourir l'ensemble du site.

Dimensionnement

L'objectif de dimensionnement de la production gaz est de permettre de couvrir 100% de la puissance maximale appelée sur le réseau en cas de défaillance d'une production principale. Elle doit également permettre de constituer un appoint efficace et modulable.

L'appel de puissance maximal sur le réseau de 2,1 MW.

Le CH dispose d'une chaudière gaz de 3 MW, en bon état de fonctionnement. Cette chaudière sera réutilisée dans le cadre du projet afin de réaliser l'appoint/secours du réseau.

5.3.3 Réseau de chaleur

Les différents réseaux existants sont présentés au 4.1.2. Ils sont rappelés ci-dessous :

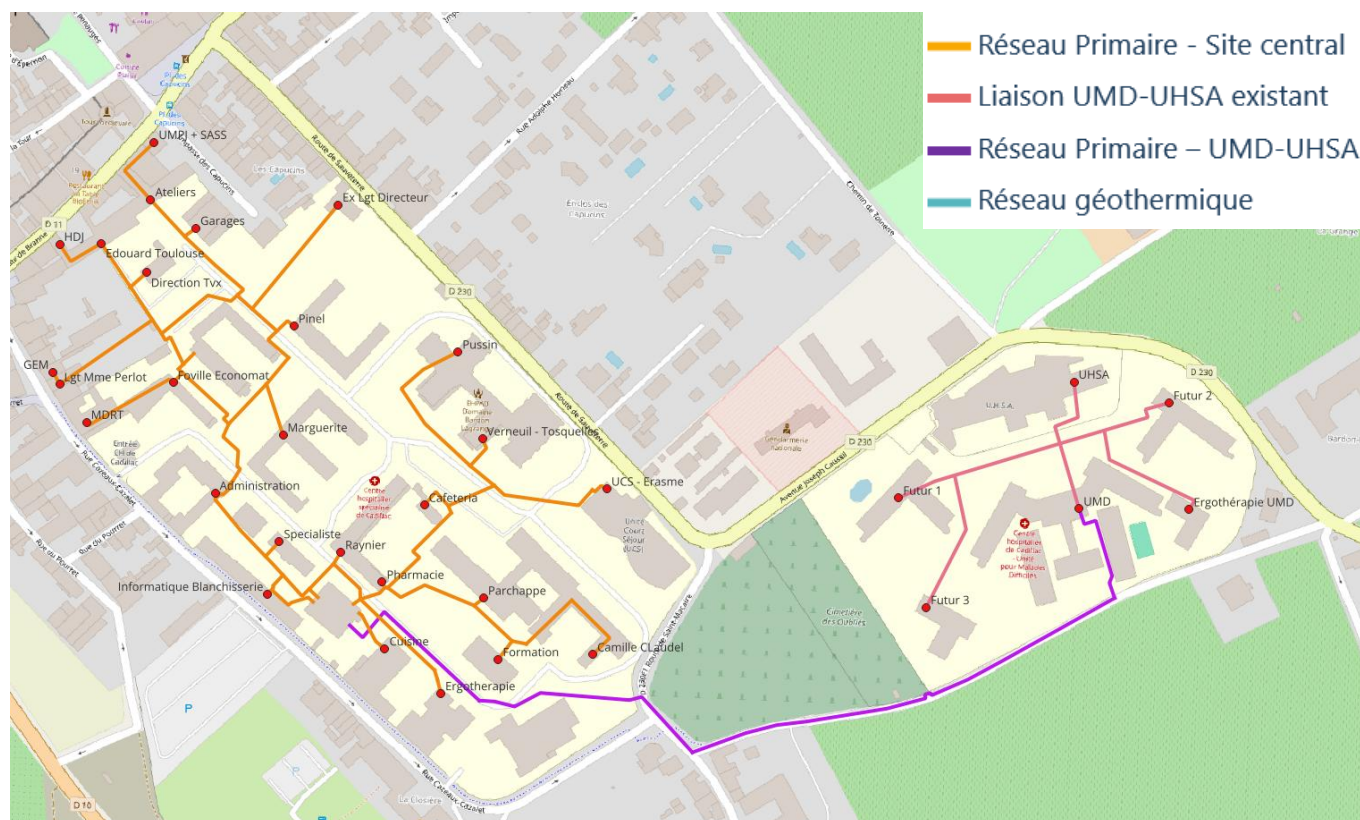


Figure 24 : Réseaux de distribution existants

Les principaux réseaux sont les suivants :

- Deux réseaux sur le site central, cheminant en parallèle, l'un pour le chauffage, l'autre pour la production ECS.
- Un réseau primaire (chauffage et ECS) entre le site central et l'UMD
- Un autre réseau primaire (chauffage et ECS) sur le site de l'UHSA.

Pour les scénarios, et afin d'optimiser les investissements, il est prévu :

- De conserver la liaison Site central - UMD
- D'intégrer la réfection des réseaux au sein de l'UMD, au sein du projet de rénovation de l'UMD
- De déposer les réseaux chauffage et ECS du site central qui sont vétustes et de poser un nouveau réseau primaire destinier à la production de chauffage et d'ECS.

Focus - Mutualisation des réseaux

Nous avons simulé via notre outil interne l'avantage de mutualiser les réseaux chauffage et ECS afin de limiter les pertes thermiques. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau 17 : Pertes thermiques dans le cas de la mutualisation chauffage et ECS

	Besoin CH (MWh)	Besoin ECS (MWh)	Livraisons chaleur en SST (MWh)	Pertes thermique (MWh)	Conso totale (MWh)
Réseau commun CH+ECS	3533	991	4533	440	4973
CH uniquement	3533	0	3533	238	3771
ECS uniquement	0	991	992	445	1437
Réseau dissocié – Total	3533	991	4535	683	5218

Il apparait que les pertes thermiques pour la mutualisation de la production de chauffage et d'ECS sont de l'ordre de 440 MWh annuels. En maintenant un réseau pour le chauffage et un réseau pour l'ECS, nous avons un cumul de pertes thermique de l'ordre de 680 MWh, soit une augmentation de 55%.

La mutualisation a également un intérêt économique concernant les travaux de mise en œuvre des réseaux. La mutualisation permet de réduire le DN du réseau et de ne pas simplement cumuler les DN pour chaque usages (foisonnement). En revanche, en cas de remplacement des réseaux chauffage et ECS en parallèle, le poste VRD sera mutualisée.

Tableau 18 : Evolution économique du fait de la mutualisation des réseaux chauffage et ECS

		VRD (€/ml)	Tubes (€/ml)	Total (€/ml)
Chauffage + ECS	DN 150	600 €	500 €	1 100 €
Chauffage seul	DN 100	600 €	450 €	1 500 €
ECS seul	DN 100		450 €	

A la vue du tableau précédent, il apparaît que la mise en œuvre de deux réseaux dans la même tranchée engendre un coup supplémentaire de l'ordre de 35%.

A l'échelle du projet, sur le site central (1745 ml de réseau) si l'on considérait conserver 2 réseaux chauffage et ECS en parallèle, cela représenterait un surcoût de l'ordre de 700 k€.

REMARQUES

Le fait de mutualiser via un réseau primaire la production de chauffage et d'ECS présente divers avantages :

- Mutualisation du réseau enterré

Le fait d'utiliser le même réseau pour le chauffage et l'ECS permet de réduire les coûts d'investissement. Le réseau primaire est dimensionné pour un DN un peu plus important afin de pouvoir délivrer la puissance chauffage et ECS, mais cela permet de ne pas poser 2 tubes complémentaires à destination de l'ECS.

Les pertes thermiques sur le réseau enterré sont également réduites

L'avantage d'agir sur les installations ECS serait également :

- Homogénéisation des production ECS sur le site

La mutualisation permettra d'agir sur les installations ECS, et d'homogénéiser les productions en sous-station. A l'heure actuelle, et suite à l'évolution permanente du site, l'ECS est produite dans certaines sous-station via le primaire ECS, et dans d'autres via le primaire chauffage. Cela implique que les 2 réseaux sont en fonctionnement sur la totalité de l'année, générant des pertes thermiques plus importantes. Avec un primaire chauffage + ECS, la totalité des sous-stations sera alimentée par ce réseau.

Il est prévu dans les scénarios, de remplacer les sous-stations, afin d'améliorer les équipements, autant sur leur hétérogénéité que leur vétusté.

Également, la majorité des sous-stations n'est pas équipée ni d'échangeurs de chaleur (bouteilles de découplage seulement), ni de vannes de régulation primaire, etc.

Les équipements qui seront mis en œuvre au niveau de la sous-station d'échange sont les suivants :

- Un échangeur à plaques, calorifugé ;
- Une vanne de régulation primaire ;
- Un compteur d'énergie ;
- Un coffret électrique.

Les productions d'eau chaude sanitaire en sous-station seront également remplacées, afin d'optimiser les conditions de fonctionnement.

REMARQUES

L'avantage d'agir sur les installations ECS serait également :

- **Homogénéisation des production ECS sur le site**

La mutualisation permettra d'agir sur les installations ECS, et d'homogénéiser les productions en sous-station. A l'heure actuelle, et suite à l'évolution permanente du site, l'ECS est produite dans certaines sous-station via le primaire ECS, et dans d'autres via le primaire chauffage. Cela implique que les 2 réseaux sont en fonctionnement sur la totalité de l'année, générant des pertes thermiques plus importantes. Avec un primaire chauffage + ECS, la totalité des sous-stations sera alimentée par ce réseau.

Pour la mise en œuvre du scénario 2 et l'intégration de froid, il sera également nécessaire de créer une sous-station d'échange dédiée pour le réseau de froid avec des équipements similaires.

5.4 SCENARIO 1 – CHALEUR

Le scénario 1 constitue le scénario de base de l'étude. Les grands principes sont les suivants :

- Production de chaleur uniquement (chauffage et ECS)
- Mise en place de 2 PAC (450 kW unitaire) sur géothermie profonde
- Conservation d'un appoint/secours gaz existant de 3 MW
- Rénovation du réseau et des sous-stations

Deux variantes à ce scénario seront développées :

- Variante 2 : PAC HFO avec COP dégradé (2,5)
- Variante 3 : PAC CO2

Pour rappel, les besoins en chaleur présentés au chapitre 3 sont les suivants :

Tableau 19 : Rappel des besoins de chaleur

Site	Gaz ECS (MWh PCI/an)	Gaz chauffage (MWh PCI/an)
Site Cadillac - UMD - UHSA	991	3533

5.4.1 Appels de puissance

Notre outil de simulation nous a permis de simuler au pas de temps horaire les consommations du site, et les appels de puissance associés.

On obtient les résultats sous forme d'une monotone des appels de puissance et d'appels de puissance répartis sur l'année :

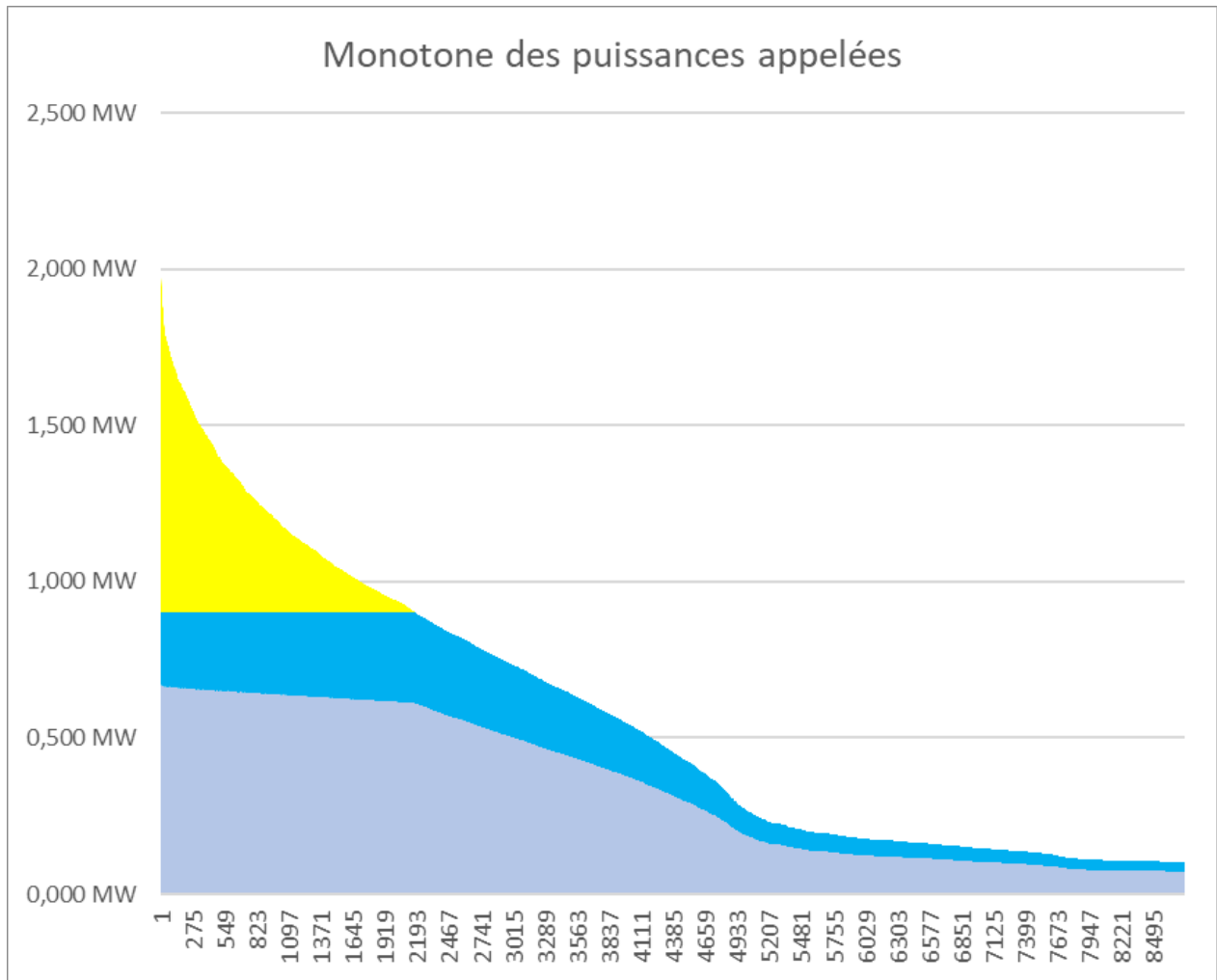


Figure 25 : Monotone des puissances appelées

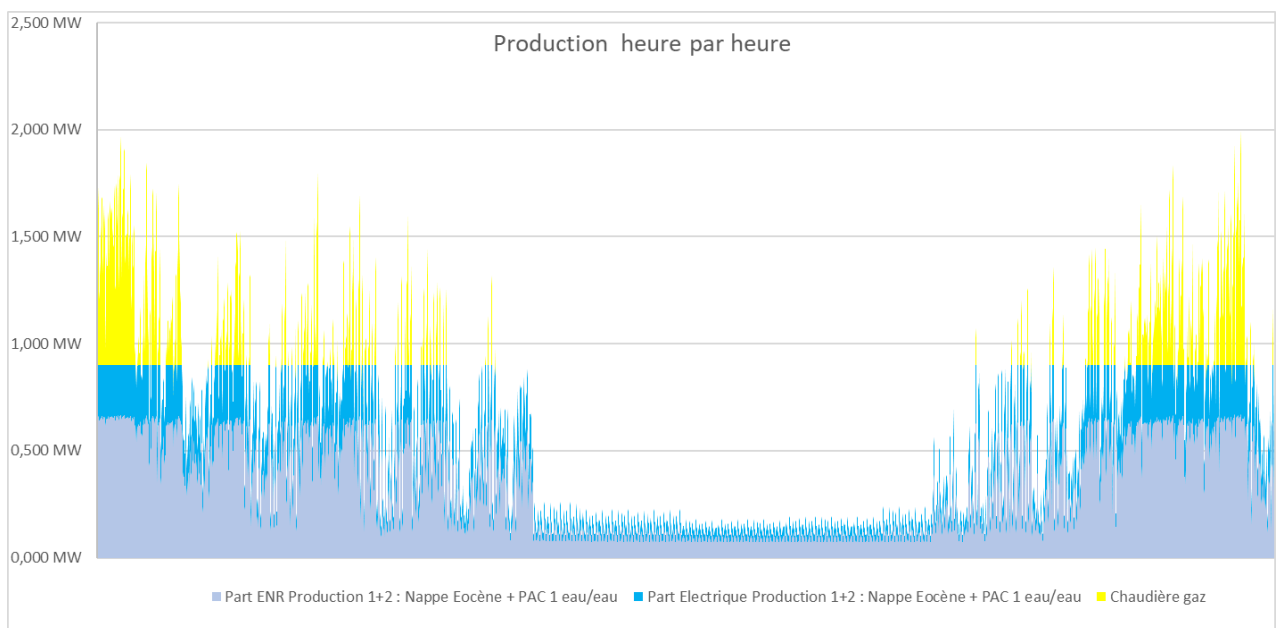


Figure 26 : Besoins de chaleur annuels

Les graphiques ci-dessus nous permettent d'observer les éléments suivants :

- Appels de puissance maximal de l'ordre de 2 MW.
- Forte couverture des appels de puissance par les pompes à chaleur

5.4.2 Performances énergétiques des scénarios

Tableau 20 : Performances énergétiques des scénarios

		SC1 V1	SC1 V2	SC1 V3
Livraisons de chaleur	MWh	4 524		
Densité énergétique	MWh/ml	1,6		
PAC	-	R1234ze	R1234ze	CO2
SCOP	-	3,1	2,5	2,5
Taux EnR - Géo	-	60%	54,5%	54,5%
Taux EnR - PAC	-	26%	31,5%	31,5%
Taux EnR Global	-	86%		

On observe un taux EnR global du projet de l'ordre de 86%, ce taux est très correct pour le projet, et la recherche d'un taux supérieur engendrera un surcôt important des installations vis-à-vis des gains EnR réalisables.

A noter également que la densité énergétique du projet est de l'ordre de 1,6 MWh/ml, ce qui est très proche de la limite d'éligibilité aux subventions du Fonds Chaleur fixé à 1,5 MWh/ml par l'ADEME.

5.5 SCENARIO 2 – CHALEUR & FROID

Il a été étudié un second scénario, avec l'intégration du froid. La réflexion a été faite d'anticiper les besoins en rafraîchissement des bâtiments, et de profiter du remplacement du réseau de chaleur primaire, pour poser un réseau de froid en parallèle.

Ce scénario va présenter les différences par rapport au scénario de base.

Pour rappel, les besoins en froid estimés au chapitre 3 sont les suivants :

Tableau 21 : Rappel des besoins de froid

Site	Surface rafraîchie (m²)	Froid (MWh/an)
Site Cadillac - UMD - UHSA	12 477	794

5.5.1 Réseau de chaleur et de froid

Le réseau de chaleur n'est pas modifié dans ce scénario. La seule modification consiste dans l'ajout d'un réseau de froid en parallèle du réseau de chaleur.

La desserte du réseau de froid a été optimisée afin d'obtenir la meilleure densité énergétique possible, en priorisant les bâtiments accueillant des patients.

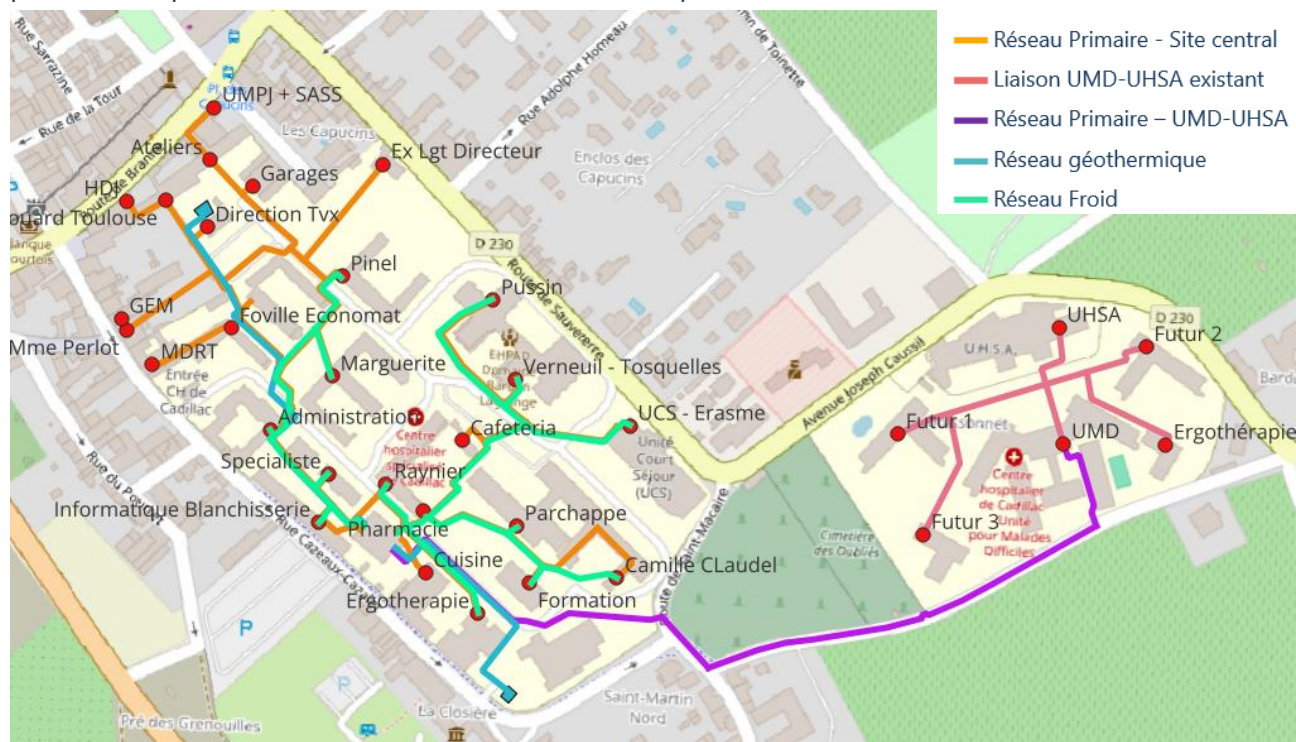


Figure 27 : Réseaux de chaleur et de froid

Ce tracé permet d'obtenir une densité énergétique de l'ordre de 0,84 MWh/ml, valeur qui reste faible.

5.5.2 Appels de puissance

Notre outil de simulation nous a permis de simuler au pas de temps horaire les consommations du site, et les appels de puissance associés.

On obtient les résultats sous forme d'une monotone des appels de puissance et d'appels de puissance répartis sur l'année :

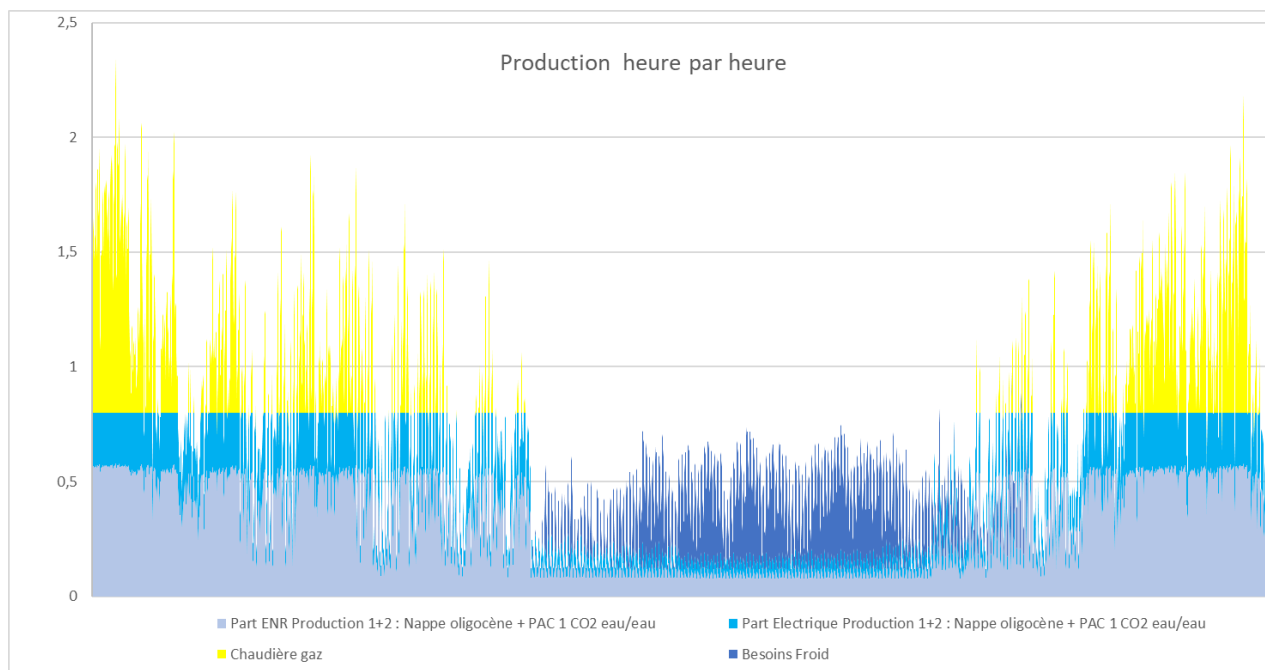


Figure 28 : Besoins de chaleur et de froid annuels

Le graphique ci-dessus nous permet d'observer les éléments suivants concernant le froid :

- Appels de puissance maximal de l'ordre de 650 kW.

5.5.3 Performances énergétiques des scénarios

Tableau 22 : Performances énergétiques du scénario

		SC2
Livraisons de chaleur	MWh	4 524
Densité énergétique – C	MWh/ml	1,6
Livraisons de froid	MWh	794
Densité énergétique – F	MWh/ml	0,84
PAC	-	R1234ze
COP - Global	-	3,1
Taux EnR - Géo	-	61%
Taux EnR - PAC	-	26%
Taux EnR - Global	-	87%

Comme pour le scénario 1, on observe un taux EnR global du projet de l'ordre de 87%, ce taux est très correct pour le projet, et la recherche d'un taux supérieur engendrerai un surcôt important des installations vis-à-vis des gains EnR réalisables.

6 BILAN ENVIRONNEMENTAL

6.1 HYPOTHESES DE L'ETUDE

- Émission GES :
 - Électricité : 0,064 kg eqCO₂ /kWh EF
 - Gaz Naturel : 0,227 kg eqCO₂ /kWh EF

Valeurs issues de la base empreinte de l'ADEME.

Tableau 23 : Performances environnementales des scénarios

Poste	Unité	Référence	SC1 V1	SC1 V2	SC1 V3	SC2
Consommation électrique PAC	MWh	0	1302	1571	1571	1535
Consommation gaz	MWh PCI	4964	750	750	750	750
Emissions de CO ₂	Teq CO ₂	1126,8	253,6	270,8	270,8	268,5
Livraisons de Chaleur & Froid	MWh	4524	4524	4524	4524	5318
Contenu CO ₂	kg eq CO ₂ / MWh livré	249,1	56,1	59,9	59,9	50,5
Ecart	%	-	-77%	-76%	-76%	

Les résultats de l'ensemble des variantes du scénario 1 montrent que la réduction des émissions de CO₂ serait de l'ordre de 75%.

La référence pour le scénario 2 n'est pas quantifiable, en effet il y a beaucoup d'inconnues en ce qui concerne le froid :

- Période de fonctionnement de chaque équipement
- Performances moyenne de chaque équipement
- Consommation énergétique associée à chaque équipement

6.2 PERIMETRE DE PROTECTION DE CAPTAGES D'EAU POTABLE

Le site central du secteur d'étude n'est pas localisé dans un périmètre de protection de captage d'eau potable (Figure 29). **Le projet n'est donc pas concerné** par les zonages d'alimentation en eau potable à ce stade. Cependant, le site UHSA – UMD se situe au sein d'un périmètre de protection éloigné en projet (Figure 29) sans pour autant que cela n'engendre des contraintes supplémentaires. Le captage situé au sud-ouest du site d'étude correspond à un ouvrage non exploité à l'heure actuelle.

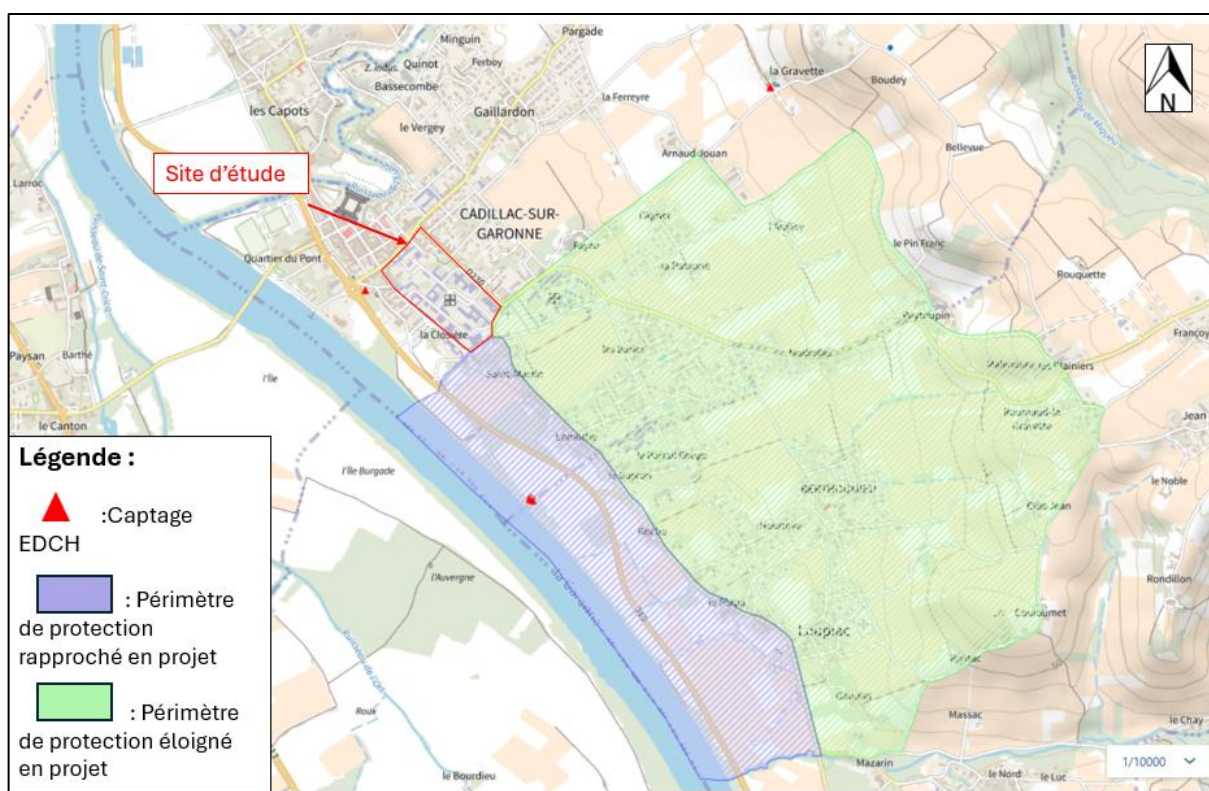


Figure 29 : Périmètre de protection de captage d'eau potable à proximité de la zone d'étude (source : Atlasanté)

6.3 ZONES DE REPARTITIONS DES EAUX

La commune de Cadillac-sur-Garonne est localisée en zone de Répartition des Eaux (ZRE). Dans le cadre d'une solution sur nappe, l'eau pompée est intégralement réinjectée dans son aquifère d'origine, les prélèvements sur la nappe sont inexistants (seul un échange thermique est réalisé)

Le projet n'est donc pas concerné par les mesures de prélèvements en ZRE.

6.4 RISQUES NATURELS ET INDUSTRIELS

6.4.1 Risques naturels

Le site est exposé aux risques naturels suivants (source : géorisque.gouv) :

Tableau 24 : Récapitulatif des risques naturels

Risque naturel	Niveau de risque sur le site d'étude
Inondation	Inconnu
Remontée de nappe	Existant
Séisme	Faible
Mouvements de terrain	Inconnu
Retrait gonflement des argiles	Modéré
Feu de forêt	Pas de risque connu
Radon	Faible

6.4.2 Risques industriels

Le site d'étude est exposé aux risques industriels suivants (source : géorisque.gouv) :

Tableau 25 : Récapitulatif des risques industriels

Risque industriel	Niveau de risque sur le site d'étude
Canalisations et transport de matières dangereuses	Existant – Présence d'une canalisation de transport de Gaz naturel en limite sud du site
Pollution des sols	Concerné – présences d'anciens sites industriels à proximité du CH (figurés par les carrés bleus sur la carte ci-dessous)



Figure 30 : Emplacement des anciens sites industriels (source : Géorisques)

Le site n'est pas situé sur une ancienne zone industrielle.

6.5 SITUATION VIS-A-VIS DES ESPACES PROTEGES

6.5.1 Zone NATURA 2000 et Zone Naturelles d'Intérêts Ecologiques Faunistiques et Floristiques

Les zones Natura 2000 sont issues de la directive européenne n° 92/43/CEE concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvage et forment un réseau écologique européen soumis à des règles précises de protection.

Initiées en 1982 par le Ministère de l'Environnement, les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Floristique et Faunistique (ZNIEFF) ont été créées pour la connaissance des espaces naturels, terrestres et marins, dont l'intérêt repose soit sur l'équilibre et la richesse de l'écosystème soit sur la présence d'espèces, de plantes ou d'animaux rares et menacés. Deux types de zones sont définis : Zones de type I : territoires correspondant à une ou plusieurs unités écologiques homogènes. Ces zones abritent obligatoirement au moins une espèce ou un habitat caractéristique, remarquable ou rare, justifiant le périmètre ;

Zones de type II : grands ensembles naturels, riches et peu modifiés, ou qui offrent des potentialités biologiques importantes.

Le projet se trouve à plus de 280 m au nord de la Zone Natura 2000 « La Garonne en Nouvelle-Aquitaine » et à plus de 500 m à l'est de la zone Natura 2000 « La vallée de l'Euille »

Le projet géothermique n'aura pas d'influence sur ces zones protégées (Figure 31).



Figure 31 : Zone Natura 2000 à proximité du site d'étude

Également, le site se situe à 270 m de la ZNIEFF de type I « Zones de frai à aloses feintes de la Garonne », 1km de la ZNIEFF de type I « Vallée de l'Euille et de la Boye » et 2,3 km de la ZNIEFF de type II « Vallées et coteaux de l'Euille et de ses affluents » (Figure 32).

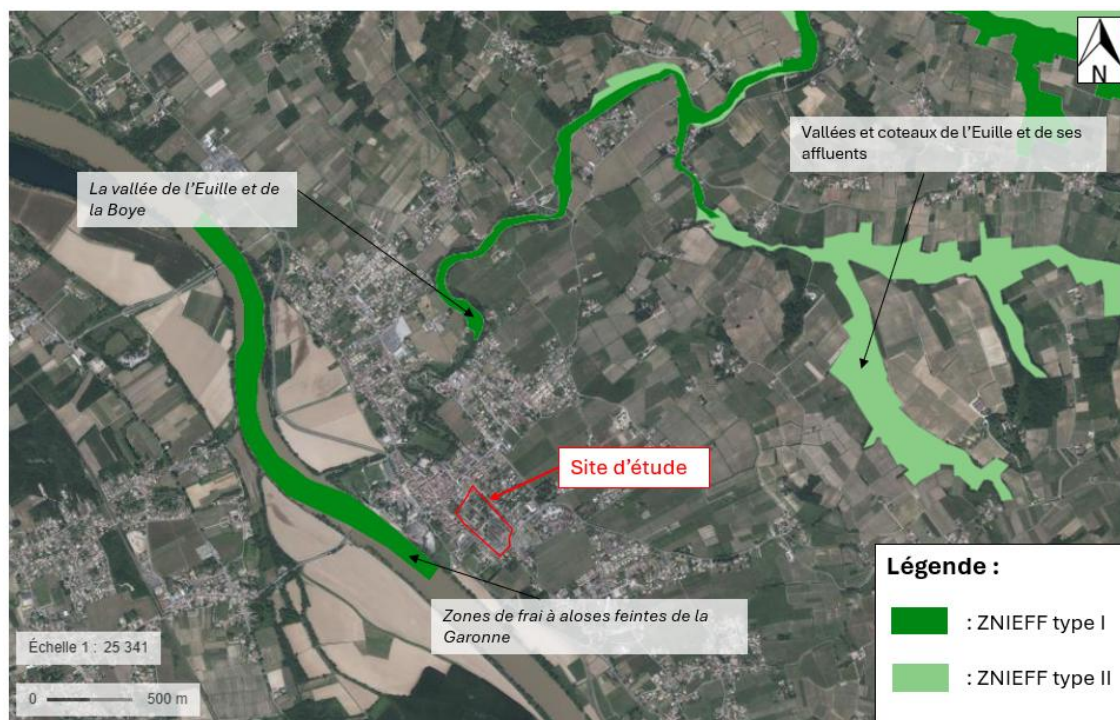


Figure 32 : ZNIEFF type I et II à proximité du secteur d'étude

6.6 COMPATIBILITE AVEC SDAGE ADOUR GARONNE

Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) ont été élaborés pour chacun des 6 grands bassins hydrographiques français. Ils déterminent les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau et les aménagements à réaliser pour les atteindre.

L'ensemble des secteurs étudiés sont inscrits dans le périmètre du SDAGE du bassin Adour-Garonne. Le SDAGE pour la période 2022-2027 a été adopté par le comité de bassin le 3 avril 2022.

Le SDAGE Adour-Garonne précise l'organisation et le rôle des acteurs, les modes de gestion et les dispositions à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs qualitatifs et quantitatifs qu'il fixe pour l'ensemble des milieux aquatiques, en prenant en compte les impacts à moyen et longs termes du changement climatique.

Ce document est l'un des outils dont dispose chaque bassin hydrographique pour déployer sur son territoire une politique visant à assurer un bon état écologique des eaux d'ici à 2027 conformément aux objectifs fixés par la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE).

Un programme de mesures (PDM) est associé au SDAGE. Il traduit ses dispositions sur le plan opérationnel en liste les actions à réaliser au niveau des territoires pour atteindre ces objectifs.

Les principaux problèmes et enjeux identifiés lors de l'instruction de ce SDAGE sont :

- un état des eaux en progression ;
- une pression domestique qui se réduit mais des équipements à maintenir en bon fonctionnement ;
- une pression industrielle ciblée ;
- une pression liée aux nitrates et aux pesticides toujours forts ;
- des perturbations hydromorphologiques toujours présentes ;
- une pression de prélèvement toujours présente ;
- un risque que les masses d'eau du bassin n'atteignent pas le bon état en 2027.

Les orientations et dispositions du SDAGE 2022-2027 sont proches de celles du précédent (2016-2021), avec un accent plus marqué sur la gestion quantitative et sur la restauration des zones humides. Ainsi, le SDAGE Adour Garonne 2022-2027 s'est fixé 4 orientations fondamentales pour atteindre les objectifs de bon état établis par la DCE :

- A – Créer les conditions de gouvernance favorables à l'atteinte des objectifs du SDAGE ;
- B – Réduire les pollutions ;
- C – Agir pour assurer l'équilibre quantitatif ;
- D – Préserver et restaurer les fonctionnalités des milieux aquatiques et humides.

L'arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 fixe les prescriptions générales applicables aux sondages, forages, créations de puits ou d'ouvrages souterrains soumis à déclaration. L'objectif est de garantir l'absence d'introduction de polluants par le biais d'inondations, de ruissellements de surface ou de fuites de fluides et d'éviter les mises en relation des nappes traversées.

La réalisation de forage d'eau selon la norme AFNOR NFX 10-999 implique une protection des venues d'eau et des nappes non captées par une cimentation par injection ascendante.

Sous conditions de respect des normes en vigueur et règles de l'art, il n'y aura pas de contact entre les différentes nappes.

Le projet est localisé dans le bassin versant de gestion de « Adour de transition ». En première approche, **Le projet n'est pas concerné par les enjeux du SDAGE.**

Le bassin versant de gestion est concerné par diverses mesures à mettre en place selon plusieurs thématiques telles que présentées ci-dessous. Le projet géothermique n'est concerné par aucune de ces mesures.

Mesures répondant aux pollutions diffuses	
AGR01 : Etude globale et schéma directeur	Réaliser une étude globale ou un schéma directeur portant sur la réduction des pollutions diffuses ou ponctuelles d'origine agricole
AGR02 : Limitation du transfert et de l'érosion	Limiter les transferts de fertilisants dans le cadre de la Directive nitrates
AGR03 : Limitation des apports diffus	Limiter les apports en pesticides agricoles et/ou utiliser des pratiques alternatives au traitement phytosanitaire
AGR04 : Pratiques pérennes	Mettre en place des pratiques pérennes (bio, surface en herbe, assolements, maîtrise foncière)
Mesures répondant aux pollutions ponctuelles	
ASS01 : Etude globale et schéma directeur	Réaliser une étude globale ou un schéma directeur portant sur la réduction des pollutions associées à l'assainissement
ASS02 : Pluvial	Réaliser des travaux d'amélioration de la gestion et du traitement des eaux pluviales
ASS13 : Nouveau système d'assainissement ou amélioration du système d'assainissement	Réhabiliter un réseau d'assainissement des eaux usées dans le cadre de la Directive ERU (agglomérations ≥ 2000 EH)
	Réhabiliter et ou créer un réseau d'assainissement des eaux usées hors Directive ERU (agglomérations de toutes tailles)
	Reconstruire ou créer une nouvelle STEP dans le cadre de la Directive ERU (agglomérations de toutes tailles)
	Equiper une STEP d'un traitement suffisant dans le cadre de la Directive ERU (agglomérations de toutes tailles)
	Equiper une STEP d'un traitement suffisant hors Directive ERU (agglomérations ≥ 2000 EH)
	Supprimer le rejet des eaux d'épuration en période d'étiage et/ou déplacer le point de rejet
Mesures améliorant la gouvernance liée à l'eau	
GOU01 : Etude transversale	Gouvernance Connaissance - Etude transversale
GOU02 : Gestion concertée	Mettre en place ou renforcer un SAGE
	Mettre en place ou renforcer un outil de gestion concertée (hors SAGE)
GOU03 : Formation, conseil, sensibilisation ou animation	Mettre en place une opération de formation, conseil, sensibilisation ou animation
Mesures répondant aux pollutions ponctuelles	
IND01 : Etude globale et schéma directeur	Réaliser une étude globale ou un schéma directeur portant sur la réduction des pollutions associées à l'industrie et à l'artisanat
IND13 : Ouvrage de dépollution et technologie propre - Principalement hors substances dangereuses	Créer et/ou aménager un dispositif de traitement des rejets industriels visant à réduire principalement les pollutions hors substances dangereuses
Mesures répondant aux altérations hydromorphologiques	
MIA01 : Etude globale et schéma directeur	Réaliser une étude globale ou un schéma directeur visant à préserver les milieux aquatiques
MIA02 : Gestion des cours d'eau - hors continuité ouvrages	Réaliser une opération d'entretien d'un cours d'eau
	Réaliser une opération classique de restauration d'un cours d'eau
MIA03 : Gestion des cours d'eau - continuité	Aménager un ouvrage qui contraint la continuité écologique (espèces ou sédiments)
	Aménager, supprimer ou gérer un ouvrage qui contraint la continuité (à définir)
MIA07 : Gestion de la biodiversité	Mener d'autres actions diverses pour la biodiversité
MIA14 : Gestion des zones humides, protection réglementaire et zonage	Réaliser une opération d'entretien ou de gestion régulière d'une zone humide
	Mettre en place une protection réglementaire ou réaliser un zonage sur un milieu aquatique (hors ZSCE)
Mesures répondant aux prélèvements	
RES03 : Règles de partage de la ressource	Mettre en place les modalités de partage de la ressource en eau

Figure 33 : mesures du SDAGE Adour Garonne pour le bassin versant "Adour de transition" (source : plan de mesures SDAGE Adour Garonne)

6.7 COMPATIBILITE AVEC LES SAGE

La commune de Cadillac-sur-Garonne est localisée dans le périmètre du SAGE « Nappes profondes de Gironde » approuvé par arrêté préfectoral le 6 août 1996.

Les deux nappes étudiées dans le présent rapport sont donc concernées par ce SAGE.

L'objectif du SAGE est de garantir, le cas échéant après l'avoir restauré, le "bon état" des ressources de son périmètre selon deux axes :

- Qualitatif : en assurant un bon état chimique (respect de normes de qualité, absence de dégradation liée aux activités humaines) ;
- Quantitatif : assurer que les volumes prélevés n'excèdent pas la capacité de renouvellement de la ressource et ne perturbent pas le fonctionnement hydrodynamique.

Le projet géothermique du CH de Cadillac-sur-Garonne consiste à extraire les calories de l'eau pompée puis à réinjecter la totalité du volume pompée. Le projet géothermique ne génère donc pas d'incidence quantitative sur la ressource.

D'un point de vue qualitatif, l'eau prélevée a pour objectif un échange uniquement de calories. Aucune dégradation chimique significative de la ressource n'est attendue. Seule la température à la réinjection sera modifiée. Les modélisations développées dans le présent rapport montrent des températures contrôlées à long terme, avec un effet qui reste très limité spatialement. Le projet géothermique n'est donc pas de nature à compromettre le bon état global de la nappe.

Il n'existe donc pas d'incidence quantitative ou qualitative significative sur la ressource en eau.

7 BILAN ECONOMIQUE

7.1 SITUATION DE REFERENCE

7.1.1 Référence chaleur

La situation de référence a été construite à partir des données du marché d'exploitation actuel, étudiées lors de la phase d'audit énergétique.

Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- P1 : PEG à 50 €/HT/ MWh PCS
 - P1 = 640 k€.TTC/an
- P2 & P3 : Avenant 14 du Marché d'exploitation
 - P2 = 93 k€.TTC/an
 - P3 = 53 k€.TTC/an
- P4 : rénovation de la chaufferie gaz et des sous-stations, remplacement du réseau enterré
 - P4 = 163 k€.TTC/an

Le prix de référence de la chaleur est de l'ordre de 209,9 €/TTC/MWh. Le prix de la chaleur issu de nos scénarios sera comparé à cette valeur. Pour indication, le prix de la chaleur hors coûts de rénovation serait de 175 €/TTC/MWh.

7.1.2 Référence froid

La situation de référence pour le froid est difficilement constructible. En effet, le site n'est actuellement pas équipé d'un réseau centralisé de froid et les consommations des équipements actuels servant au rafraîchissement des locaux ne sont pas connues. Également, la projection de rafraîchissement du scénario 2 n'est pas sur le même périmètre que le rafraîchissement actuel car plus étendu.

7.2 HYPOTHESES DE L'ETUDE

- Coût électricité * : 131,30 €/HT/MWh
- Coût gaz * : 95,40 €/HT/MWh PCS (équivalent à un PEG à 50 €/HT/MWh PCS)
- Émission GES :
 - Électricité : 0,064 kg eqCO₂ /kWh EF
 - Gaz naturel : 0,227 kg eqCO₂ /kWh EF

**Les coûts gaz et électricité sont issus des contrats actuels.*

7.3 SUBVENTIONS ET CEE

Le montant des subventions et CEE mobilisables pour les différents scénarios sont présentés ci-dessous.

7.3.1 Certificats d'Economies d'Energies

Les montants des CEE coup de pouce sont pris en compte comme suit :

- « x4 » pour les opérations relevant de la fiche BAT-TH-164 "Pompe à chaleur de type eau/eau" pour de la substitution d'installations gaz (possibilité de garder un secours pour les hôpitaux) ;

Le montant de valorisation des CEE retenu est de 7,5 €/MWh cumac

Le coup de pouce retenu est « x4 ».

Tableau 26 : Calculs des CEE récupérables

CEE (compris coup de pouce)			
	Fiche CEE	kWh cumac	Montant
BAT - TH 164	Pompe à chaleur de type air/eau	36 680 000	950 400 €

7.3.2 Fond Chaleur – Géothermie Profonde ADEME

Les projets tertiaires de chauffage géothermique sont fortement aidés. Ces aides peuvent permettre de rendre ces solutions plus compétitives que les solutions traditionnelles. Pour être recevable, le dossier de demande d'aide doit impérativement être déposé avant la notification de marché de travaux et satisfaire les conditions d'éligibilité suivantes (fond chaleur 2026) :

- Respect de la réglementation relative au sous-sol : décret de Minime Importance (en vigueur depuis le 1er juillet 2015).
- Respect de la réglementation relative aux milieux naturels.
- Respect des normes pour les forages d'eau (NFX 10-999).
- Evaluation préalable du potentiel de la nappe et étude d'impact thermique sur la ressource EnR.
- Réinjection du fluide géothermal extrait dans l'aquifère d'origine.
- Pour les PAC destinées au chauffage ou au chauffage et à la production d'ECS :
 - Il n'est pas précisé de condition de performance des PAC dans la fiche 2026
- Recommandation 1 000 h de chauffage par an.

Le montant des subventions possibles relatives à la géothermie de surface sont les suivantes pour les PAC sur nappe aquifère (hors cas particulier soumis à étude spécifiques) :

- Projet de création incluant aide à la production géothermie et aide au réseau de distribution : 20 €/MWh EnR&R/an

- Projet d'extension incluant aide à la production géothermie et aide au réseau de distribution (hors interconnexion de réseau) : 14 €/MWh EnR&R/an

Ces montants ont été revus et simplifiés dans la fiche 2026.

Les études de faisabilité ainsi que la réalisation d'un forage test qui pourra être utilisé pour l'installation, sont également subventionnables par l'ADEME via une demande d'aide à la décision à une hauteur de 45% pour les grandes entreprises.

Dans le cas de notre étude, nous sommes dans la situation numéro 2, à savoir, une production EnR supérieure à 2000 MWh/an.

Tableau 27 : Calculs des aides Fond Chaleur ADEME

Scénario	MWh ENR / an	Aide sur 20 ans (€)
SC1 – V1	2 972	1 188 800 €
SC1 – V2	2 704	1 081 600 €
SC1 – V3	2 704	1 081 600 €
SC2	3 554	1 421 600 €

7.4 EVALUATION DES COUTS

7.4.1 Coûts d'investissement (CAPEX)

Tableau 28 : CAPEX par scénarios (€.TTC)

Poste	SC1 V1	SC1 V2	SC1 V3	SC2
Doublet géothermique + réseau	1 866 181 €	1 866 181 €	1 866 181 €	1 866 181 €
PAC + hydraulique chaufferie	523 446 €	523 446 €	928 236 €	523 446 €
Appoint/secours gaz	- €	- €	- €	- €
PAC + hydraulique froid	- €	- €	- €	406 549 €
Appoint/secours froid	- €	- €	- €	201 600 €
Réseau de chaleur	2 133 919 €	2 133 919 €	2 133 919 €	2 133 919 €
Sous-stations chaleur	804 589 €	804 589 €	804 589 €	804 589 €
Réseau de froid	- €	- €	- €	692 802 €
Sous-stations froid	- €	- €	- €	244 800 €
MOE - Frais divers	692 658 €	692 658 €	745 280 €	893 605 €
Total	6 020 794 €	5 328 136 €	6 478 206 €	7 767 492 €

Les principaux facteurs de hausse du CAPEX entre les scénarios sont :

- La différence entre les technologies de PAC : PAC HFO / PAC CO₂, dans la variante 3 du scénario 1 ;
- La prise en compte des installations de froid dans le scénario 2

7.4.1.1 Focus sur la partie géothermie profonde

Les coûts prévisionnels du forage géothermique sont détaillés ci-dessous :

Tableau 29 : Coûts des travaux forage géothermique

	Doublet à l'Eocène
Coût forage	1 050 000 €.TTC (2100 €.TTC du mètre linéaire, basé sur un ouvrage de 250 m de profondeur)
Coût équipement (hors tranchées)	240 000 €.TTC
Coût total (ouvrages géothermies)	1 290 000 €.TTC

7.4.2 Coûts d'exploitation (OPEX)

Les coûts d'exploitation annuels (OPEX) intègrent :

- Les **consommations d'énergie** :
 - Électricité des PAC, pompes ;
 - Gaz Naturel pour les chaudières.
- Les **charges d'exploitation et de maintenance** (P2/P3).

Les valeurs synthétiques, comparées à la situation de référence (exploitation chaudières et tours), sont les suivantes :

Tableau 30 : OPEX par scénarios (€.TTC)

Poste	Référence	SC1 V1	SC1 V2	SC1 V3	SC2
P1	640 792 €	300 595 €	342 989 €	342 989 €	346 456 €
P2	92 849 €	122 953 €	122 953 €	140 953 €	179 221 €
P3	52 723 €	50 568 €	50 568 €	55 426 €	62 554 €
TOTAL	786 364 €	474 116 €	516 510 €	539 368 €	588 231 €
Ecart	-	-40%	-34%	-31%	-

7.4.2.1 Focus sur la partie géothermie profonde

Tableau 31 : Coût d'exploitation (OPEX) (€.TTC)

Fonctionnement de la pompe du puits de production (P1)	12 000 €.TTC/an
Changement de pompe du puits de production (P2)	18 000 €.TTC soit 1 800 €.TTC/an
Diagnostic des puits (tous les 5 ans)	12 000 €.TTC / puits
Nettoyage du puits (tous les 10/15 ans)	12 000 €.TTC/ puits (<i>Brossage des tubages et crépines & curage du fond</i>)
Régénération du puits (tous les 10/15 ans)	42 000 €.TTC

Les temps de récurrence (excepté le diagnostic d'ouvrage) sont donnés à titre indicatif et peuvent être modulés selon le vieillissement de l'ouvrage.

7.4.3 Coûts globaux

Les couts globaux intègrent l'ensemble des postes, à savoir :

- Les consommations d'énergies P1 ;
- Les charges d'exploitation P2/P3 ;
- Les Investissements P4 avec déduction des subventions.
 - Référence : Remplacement des chaudières + réseau + sous-stations – lissé sur 20 ans
 - Scénarios : Investissement géothermie + réseau + sous-stations – lissé sur 20 ans

Tableau 32 : Coût globaux (€.TTC)

Poste	Référence	SC1 V1	SC1 V2	SC1 V3	SC2
P1	640 792 €	300 595 €	342 989 €	342 989 €	346 456 €
P2	92 849 €	122 953 €	122 953 €	140 953 €	179 221 €
P3	52 723 €	50 568 €	50 568 €	55 426 €	62 554 €
P4	163 227 €	254 133 €	263 599 €	297 256 €	362 103 €
TOTAL	949 591 €	728 249 €	780 109 €	836 624 €	950 334 €
Ecart	-	-23%	-18%	-12%	-

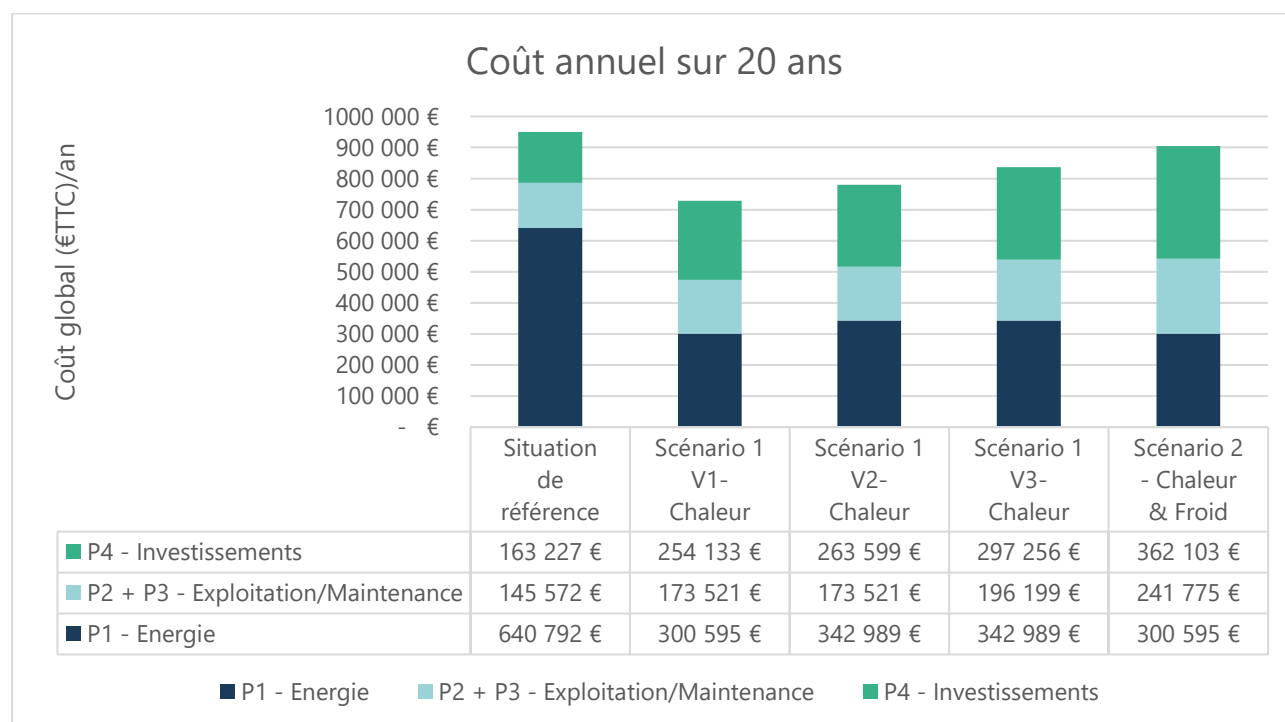


Figure 34 : Coûts annuels sur 20 ans

8 CONCLUSION

La présente étude de faisabilité avait pour objectif de vérifier la pertinence d'une solution de géothermie sur nappe pour le Centre Hospitalier de Cadillac, en premier lieu au regard de la ressource disponible dans le sous-sol, puis d'en apprécier les conditions de mise en œuvre techniques et économiques à l'échelle du site.

Les analyses réalisées reposent sur l'étude des besoins du site, sur l'examen des caractéristiques hydrogéologiques des nappes mobilisables et sur l'évaluation technico-économique des solutions envisagées, en comparaison avec la situation de référence. Dans ce cadre, une attention particulière a été portée à la disponibilité de la ressource, à la productivité des ouvrages, aux conditions de réinjection, ainsi qu'à l'intérêt d'une éventuelle production de froid.

Au regard de ces hypothèses, l'étude conclut que la ressource géothermique est bien présente et mobilisable sur le site du CH de Cadillac. En revanche, contrairement aux premières orientations envisagées en phase d'audit, le projet ne pourrait pas relever du régime de la géothermie de minime importance. L'analyse met en effet en évidence que la nappe de l'Oligocène présente des contraintes trop importantes au droit du site pour permettre une exploitation satisfaisante, notamment du point de vue de la productivité et de la réinjection. À l'inverse, la nappe de l'Éocène présente des caractéristiques favorables pour une valorisation géothermique, avec une profondeur, une productivité et une température cohérentes avec les besoins du site.

Sur le plan économique, l'étude montre que la solution géothermique permet d'atteindre un coût de la chaleur plus favorable que la solution de référence, malgré un niveau d'investissement initial élevé. La géothermie apparaît ainsi comme une solution pertinente pour décarboner la production thermique du site, sous réserve de confirmer les conditions de réalisation et d'exploitation en phases ultérieures.

Les principaux points d'attention portent toutefois sur le cadre réglementaire (code minier) et technique de l'opération, du fait d'un projet hors GMI, ainsi que sur la nécessité de sécuriser en phase suivante les performances réelles des ouvrages de production et de réinjection. Par ailleurs, l'extension du projet à une production de froid génère des surcoûts significatifs. Dans ce contexte, il apparaît préférable de préciser en amont les bâtiments réellement concernés par un besoin de rafraîchissement, ainsi que le niveau de service attendu, avant d'engager des investissements à l'échelle de l'ensemble du centre hospitalier.

Enfin, cette étude sécurise la faisabilité d'une production géothermique sur la base d'une solution technique, mais d'autres alternatives pourraient être envisagées ne remettant pas en cause les conclusions principales du projet (énergétiques environnementales et économiques) :

- La dissociation des réseaux chauffage et ECS afin de préserver une meilleure évolutivité vers d'autres solutions complémentaires, comme le solaire thermique ou, le cas échéant, le rechargement de la nappe,
- La mise en place de réseaux différenciés chauffage/froid et ECS,

- L'optimisation du nombre et du séquençement des pompes à chaleur,
- Une approche par phasage des usages froid afin d'adapter au plus juste les investissements au besoin réels du site.

9 ANNEXES

Annexe 1 – Liste des sous-stations

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du site d'étude (fond de carte : IGN).....	5
Figure 2 : Localisation du site d'étude (fond de carte : image satellite)	6
Figure 3 : Extrait de la carte géologique au 1 / 50 000 (BRGM)	7
Figure 4 : Coupe géologique du forage BSS002AEFL (source : Infoterre)	8
Figure 5 : Carte piézométrique de l'Oligocène (2023, BRGM).....	10
Figure 6 : Carte piézométrique de l'Eocène (2023, BRGM).....	11
Figure 7 : Réseaux existants.....	17
Figure 8 : Principe de fonctionnement d'un réseau de chaleur.....	19
Figure 9 : Log hydrogéologique au droit du site d'étude (source : MONA BRGM)	22
Figure 10 : carte de localisation des ouvrages alentours (source : BSS) avec en rouge les ouvrages à l'Eocène et en bleu les ouvrages à l'Oligocène.....	23
Figure 11 : Carte des risques liés aux phénomènes de remontée de nappe au droit de la zone d'étude.	24
Figure 12 : Demande calorifique au sous-sol en MW (source Manergy).....	26
Figure 13 : Implantation possible des forages	28
Figure 14 : canalisation de transports de produits dangereux au droit du site.....	29
Figure 15 : Exemple de propagation des fronts chauds et froids dans le cas d'un doublet à balayage	30
Figure 16 : Evolution de l'amplitude des variations de température au puits de production en fonction de différents temps de percée (source : rapport BRGM 82-SGN-023-EAU)	30
Figure 17 : Puissance issue du sous-sol nécessaire pour répondre aux besoins en chaud et en froid (source : MANERGY).	31
Figure 18 : Exemple d'un environnement de chantier de forage.....	35
Figure 19 : Exemple d'équipement en tête de forage	36
Figure 20 : Exemple de tête de forage en exploitation avec capotage.....	36
Figure 21 : Proposition d'implantation du réseau et des forages géothermiques	39
Figure 22 : Implantation des équipements dans la chaufferie actuelle	40
Figure 23 : Exemple de PAC HFO	41
Figure 24 : Réseaux de distribution existants.....	45
Figure 25 : Monotone des puissances appelées.....	50
Figure 26 : Besoins de chaleur annuels	50
Figure 27 : Réseaux de chaleur et de froid	52
Figure 28 : Besoins de chaleur et de froid annuels.....	53
Figure 29 : Périmètre de protection de captage d'eau potable à proximité de la zone d'étude (source : Atlasanté).....	55
Figure 30 : Emplacement des anciens sites industriels (source : Géorisques)	57
Figure 31 : Zone Natura 2000 à proximité du site d'étude.....	58
Figure 32 : ZNIEFF type I et II à proximité du secteur d'étude	59
Figure 33 : mesures du SDAGE Adour Garonne pour le bassin versant "Adour de transition" (source : plan de mesures SDAGE Adour Garonne).....	61
Figure 33 : Coûts annuels sur 20 ans.....	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Consommations de référence 2024	12
Tableau 2 : Consommations Gaz de référence 2024 – corrigées DJU	13
Tableau 3 : Travaux prévus hors MGP	13
Tableau 4 : Consommations Gaz de référence - avec prise en compte des travaux hors MGP	13
Tableau 5 : Consommations Gaz de référence avec prise en compte des AAPE scénario MGP	14
Tableau 6 : Estimations des besoins froid – Site	14
Tableau 7 : Estimations des besoins froid – Périmètre restreint	15
Tableau 8 : Equipements chaleur – CH Cadillac	16
Tableau 9 : Equipements froid – CH Cadillac	18
Tableau 10 : Paramètres hydrodynamiques issus de la bibliographie autour de la zone d'étude	23
Tableau 11 : Prédimensionnement d'un doublet sur nappe considérant un delta T de 8°C	26
Tableau 12 : Simulations de doublets à l'Eocène	27
Tableau 13 : Prédimensionnement d'un doublet sur nappe à balayage	32
Tableau 14 : résultats des simulations obtenues pour un doublet à balayage	32
Tableau 15 : Caractéristiques techniques de la Pompe à Chaleur	42
Tableau 16 : Comparaison PAC HFO / PAC CO2	44
Tableau 17 : Pertes thermiques dans le cas de la mutualisation chauffage et ECS	46
Tableau 18 : Evolution économique du fait de la mutualisation des réseaux chauffage et ECS	47
Tableau 19 : Rappel des besoins de chaleur	49
Tableau 20 : Performances énergétiques des scénarios	51
Tableau 21 : Rappel des besoins de froid	51
Tableau 22 : Performances énergétiques du scénario	53
Tableau 23 : Performances environnementales des scénarios	54
Tableau 24 : Récapitulatif des risques naturels	56
Tableau 25 : Récapitulatif des risques industriels	56
Tableau 26 : Calculs des CEE récupérables	64
Tableau 27 : Calculs des aides Fond Chaleur ADEME	65
Tableau 28 : CAPEX par scénarios (€.TTC)	66
Tableau 27 : Coûts des travaux forage géothermique	66
Tableau 30 : OPEX par scénarios (€.TTC)	67
Tableau 29 : Coût d'exploitation (OPEX) (€.TTC)	67
Tableau 32 : Coût globaux (€.TTC)	68