

RAPPORT D'ETUDE









Etude de faisabilité géothermique - Phase PRO

Station de primatologie

13790 Rousset



Emetteur	Destinataire
GEOSYNERGIE	CNRS - Station de Primatologie

			Date	Rédacteur	Rédactrice	Relecteur
GEOSYNERGIE		Ind B	28/05/2025	Siffrein CROSET	Fantine PEREIRA HARI	Nicolas BELLON
				Visa 	Visa 	Visa 
ENERSIM				Franck BULCOURT	Laure QUINQUARLET	Rémy SAULNIER
				Visa 	Visa 	Visa 

Sommaire

GLOSSAIRE	7
1 INTRODUCTION	8
1.1 GENERALITES	8
1.2 PRESENTATION DU PROJET	10
2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET ENVIRONNEMENTAL	11
2.1 LE CODE CIVIL.....	11
2.2 LE CODE MINIER	11
2.3 LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT.....	14
2.4 LES PERIMETRES DE PROTECTION.....	14
2.5 SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX.....	14
2.6 SCHEMA D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX	15
2.7 PLAN LOCAL D'URBANISME	15
2.8 ZONES NATURELLES REGLEMENTEES	16
2.9 RISQUES TECHNOLOGIQUES	20
2.10 RISQUES NATURELS	22
3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	24
3.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE	24
3.2 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	27
3.3 SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE ET LOG PREVISIONNEL.....	31
4 SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE	33
4.1 DOCUMENTS RECUEILLIS	33
4.2 VISITE	33
4.3 FONCTIONNEMENT DU SITE	33
4.4 PROJET DE CONSTRUCTION/RENOVATION.....	33
5 ETAT DES LIEUX DES BATIMENTS EXISTANTS	37
5.1 VUES EXTERIEURES DES BATIMENTS	37
5.2 PLANS DES BATIMENTS	37
5.3 LE BATI.....	39
5.4 CHAUFFAGE / REFROIDISSEMENT	41
5.5 EAU CHAUDE SANITAIRE.....	44
5.6 VENTILATION	45
5.7 ECLAIRAGE	47
6 ANALYSE ENERGETIQUE DE L'ETAT EXISTANT	48
6.1 ELECTRICITE.....	48
6.2 PROPANE.....	50
6.3 MODELISATION THEORIQUE ET RECOLLEMENT	51
7 PROJET DE RENOVATION	52
7.1 DESCRIPTION DU PROJET	52
7.2 APPELS DE PUISSANCE	53
7.3 HYPOTHESES DE CALCUL DES BATIMENTS NEUFS	53

8	CONCLUSION ET SYNTHÈSE DE LA STD	56
9	DIMENSIONNEMENT GEOTHERMIQUE	57
9.1	DETERMINATION DU TAUX DE COUVERTURE GEOTHERMIQUE	60
9.2	COURBES MONOTONES DES BESOINS EN GEOTHERMIE	61
9.3	TAUX DE CHARGE/DECHARGE DU SOUS-SOL	63
5.5	LOI D'EAU	67
9.6	SYNTHÈSE DU SCENARIO DE COUVERTURE GEOTHERMIQUE	69
10	5. CONTEXTE THERMIQUE AU DROIT DU PROJET	70
10.1	5.1 DEFINITIONS DES PARAMETRES THERMIQUES DU TERRAIN	70
11	DIMENSIONNEMENT D'UN DISPOSITIF DE GEOTHERMIE SUR SONDES	71
11.1	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	71
11.2	DEFINITION DE LA SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE	72
11.3	DEFINITION DE LA METHODE DE CALCUL	73
11.4	PARAMETRES DE DIMENSIONNEMENT	74
12	PARAMETRES DE LA MODELISATION	75
12.1	RAPPEL DES BESOINS THERMIQUES DU PROJET	75
12.2	PARAMETRES RETENUS POUR L'OUVRAGE GEOTHERMIQUE	76
13	RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT	77
13.1	MODELISATION DU CHAMP DE SONDES GEOTHERMIQUES	77
14	PHASE DE RECONNAISSANCE & TEST DE REPONSE THERMIQUE	82
15	CONTRAINTES DE MISES EN ŒUVRE ET EXPLOITATION DES SONDES GEOTHERMIQUES	83
15.1	CONTRAINTES DE REALISATION DES TRAVAUX	83
15.2	CONTRAINTES D'EXPLOITATION	83
15.3	ACCESSIBILITE ET PERENNITE DE L'INSTALLATION	84
15.4	CONTRAINTES DE REGULATION ET DE MAINTENANCE	86
15.5	AUTRES PRECONISATIONS	87
16	ASSURANCES ET SUBVENTIONS	90
16.1	ASSURANCES EN TERMES DE GEOTHERMIE	90
16.2	SUBVENTIONS PAR L'ADEME	90
16.3	AUTRES SUBVENTIONS	91
16.4	VERIFICATION DES CRITERES D'ELIGIBILITES	92
16.5	MONTANT INDICATIF DES SUBVENTIONS	94
16.6	ENVELOPPE BUDGETAIRE PREVISIONNELLE	95
17	BILAN ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL PAR RAPPORT A UNE SOLUTION DE REFERENCE	96
17.1	DONNEES D'ENTREE POUR LES ANALYSES TECHNICO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES	96
12.2	ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE	98
17.3	BILAN ENVIRONNEMENTAL	102
18	CONCLUSION	103
14	BIBLIOGRAPHIE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
15	ANNEXES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

LISTES DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION DU PROJET.....	8
FIGURE 2 : LOCALISATION DES BATIMENTS DU SITE ROUSSET.....	9
FIGURE 3 : CARTOGRAPHIE DU ZONAGE REGLEMENTAIRE GMI (GEOTHERMIES.FR).....	12
FIGURE 4: CONDITIONS D'IMPLANTATION COMMUNES AUX BOUCLES OUVERTES ET FERMEES – BRGM DREAL 2021	13
FIGURE 5 : ZONES NATURA 2000 (DIRECTIVES HABITAT ET OISEAUX) - INPN	16
FIGURE 6 : ZONES ZNIEFF DE TYPES I ET II - INPN	17
FIGURE 7 : ZONES ZICO - INPN	18
FIGURE 8 : ZONAGE DES PARCS NATURELS REGIONAUX - INPN	19
FIGURE 9 : EXPOSITION AU RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES (GEORISQUES).....	22
FIGURE 10 : ZONES SENSIBLES AUX REMONTEES DE NAPPE (GEORISQUES).....	23
FIGURE 11 : CARTE GEOLOGIQUE IMPRIMEE 1/50 000 DU BASSIN DE L'ARC (INFOTERRE)	24
FIGURE 12 : CARTE GEOLOGIQUE IMPRIMEE 1/50 000 DU SECTEUR ET OUVRAGES A PROXIMITE (INFOTERRE)	25
FIGURE 13 : COUPE GEOLOGIQUE N-S DU FLANC SUD DU SYNCLINAL DE L'ARC – PAC05A & PAC07B (BRGM)	26
FIGURE 14 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE PRESENT AU DROIT DU PROJET	27
FIGURE 15 : MOYENNE MENSUELLE DES DEBITS ENTRE LE 01/06/1972 ET LE 01/09/2024 A LA STATION Y402 2010 (HYDROPORTAIL, EAUFRANCE)	28
FIGURE 16 : LOG FORAGE SUR 200 METRES (LOGICIEL FORAGES).....	32
FIGURE 17 : SCENARIOS D'IMPLANTATION DES FUTURS BATIMENTS	34
FIGURE 18 : PLAN DU BATIMENT ROU140 APRES RENOVATION/EXTENSION	35
FIGURE 19 : PLAN DE MASSE DU SITE	37
FIGURE 20 : PLAN ACTUEL DU BATIMENT ROU140	38
FIGURE 21 : PLAN DU BATIMENT ROU150.....	38
FIGURE 22 : PLAN DU BATIMENT ROU160.....	39
FIGURE 23 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA CHAUFFERIE ROU160	42
FIGURE 24 : CONSOMMATIONS ELECTRIQUES MENSUELLES	49
FIGURE 25 : APPEL DE PUISSANCE EN CHAUD DU BATIMENT	57
FIGURE 26 : APPELS DES PUISSANCES EN FROID DU BATIMENT	58
FIGURE 27 : MONOTONE DES BESOINS DE CHAUFFAGE DU BATIMENT	59
FIGURE 28 : MONOTONE DES BESOINS DE RAFRAICHISSEMENT DU BATIMENT	59
FIGURE 29 : COUVERTURE ENERGETIQUE DE LA PAC EN FONCTION DE SA PUISSANCE – CHAUFFAGE & REFROIDISSEMENT.....	60
FIGURE 30 : COURBE MONOTONE DE CHAUFFAGE OPTIMISEE	61
FIGURE 31 : COUVERTURE DES BESOINS ENERGETIQUES DE CHAUD EN GEOTHERMIE	61
FIGURE 32 : COUVERTURE DES BESOINS ENERGETIQUES DE FROID EN GEOTHERMIE.....	62
FIGURE 33 : MONOTONE DE REFROIDISSEMENT OPTIMISE	62
FIGURE 34 : EVOLUTION HORAIRE DU COP DE L'INSTALLATION GEOTHERMIQUE EN CHAUD ET EN FROID	64
FIGURE 35 : PUISSANCE ECHANGEES AVEC LE SOUS-SOL	66
FIGURE 36 : EVOLUTION DU COP EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE PRODUCTION	68
FIGURE 37 : TEMPERATURE D'EAU CHAUDE SORTIE PAC EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE	68
FIGURE 38 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE INSTALLATION SUR SONDAS GEOTHERMIQUES - GEOTHERMIES.FR	71
FIGURE 39 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE – BRGM - DREAL	72
FIGURE 40 : PUISSANCE ECHANGEES AVEC LE SOUS-SOL	77
FIGURE 41 : RESULTAT DU CALCUL DE LA TEMPERATURE MOYENNE DU FLUIDE CALOPORTEUR	78
FIGURE 42 : SCHEMA D'IMPLANTATION THEORIQUE DU FUTUR CHAMP DE SONDAS	78
FIGURE 43 : RESULTAT DU CALCUL DE LA TEMPERATURE MOYENNE DU FLUIDE CALOPORTEUR DANS LES SONDAS SUR 25 ANS DE FONCTIONNEMENT	79
FIGURE 44: RESULTAT DU CALCUL DE LA TEMPERATURE MOYENNE DU FLUIDE CALOPORTEUR	80
FIGURE 45 : PHOTO DU MODULE DE TEST DE REPONSE THERMIQUE, CONNECTE A LA SONDE GEOTHERMIQUE PILOTE.....	82

FIGURE 46 : EXEMPLE D'UN ENSEMBLE CUVE/COLLECTEUR ENTERRE 31 SORTIES – Ø 50 MM COTE SONDES ET Ø 160 MM COTE PAC	84
FIGURE 47 : EXEMPLE D'UN ENSEMBLE CUVE/COLLECTEUR ENTERRE 38 SORTIES EN COURS DE RACCORDEMENT	85
FIGURE 48 : EXEMPLE D'UN COLLECTEUR MURAL 21 SORTIES – Ø 50 MM COTE SONDES ET Ø 225 MM COTE PAC.....	85
FIGURE 49 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE INSTALLATION SUR SONDES - SOURCE DTU65.16.....	87
FIGURE 50 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE INSTALLATION BI-ENERGIE AVEC APPOINT GAZ	88
FIGURE 51 : INSTRUMENTATION POUR UN FONCTIONNEMENT EN PRODUCTION DE CHAUD OU DE FROID - SOURCE : CDC-ADEME- ETUDE-FAISABILITE-POMPE-CHALEUR-GEOTHERMIQUE-V17122020	89
FIGURE 52 GRAPHIQUE DU TEMPS DE RETOUR SUR INVESTISSEMENT BRUT ENTRE LA SOLUTION GEOTHERMIQUE ENVISAGEE ET LA SOLUTION DE REFERENCE AIR/EAU	99
FIGURE 53 : TABLEAU DE RENTABILITE ENTRE LA SOLUTION DE REFERENCE AIR/EAU ET LA SOLUTION GEOTHERMIQUE	101

LISTES DES TABLEAUX

TABEAU 1 : CONDITIONS D'ELIGIBILITE A LA GEOTHERMIE DE MINIME IMPORTANCE.....	11
TABEAU 2 : RECAPITULATIF DES SITE BASIAS A PROXIMITE DU PROJET (GEORISQUES)	20
TABEAU 3 : RECAPITULATIF DES SITE BASOL A PROXIMITE DU PROJET (GEORISQUES)	20
TABEAU 4 : RECAPITULATIF DES INSTALLATIONS CLASSEES A PROXIMITE DU PROJET (GEORISQUES)	20
TABEAU 5 : EVALUATION ET SUIVI DE MESURES DE LA STATION N°06194800 (ARC A ROUSSET 1) (EAUFRANCE)	29
TABEAU 6 : EVALUATION ET SUIVI DE MESURES DE LA STATION N°06194810 (ARC A ROUSSET 3) (EAUFRANCE)	29
TABEAU 7 : BATIMENTS CONCERNES PAR LE PROJET DE RENOVATION	36
TABEAU 8 : RAPPEL DES BESOINS ENERGETIQUES DU PROJET, PAR BATIMENT	56
TABEAU 9 : RAPPEL DES PUISSANCES ET BESOINS ENERGETIQUES DE L'ENSEMBLE DU PROJET	57
TABEAU 10 : EVOLUTION MENSUELLE DU COP EN PRODUCTION DE CHAUD SUR UNE ANNEE TYPE	65
TABEAU 11 : EVOLUTION MENSUELLE DU EER EN PRODUCTION DE FROID SUR UNE ANNEE TYPE	65
TABEAU 12 : SCENARIO DE COUVERTURE GEOTHERMIE OPTIMISE	69
TABEAU 13 : PARAMETRES DU TEST DE REPOSE THERMIQUE	70
TABEAU 14 : RESULTATS DU TEST DE REPOSE THERMIQUE	70
TABEAU 15 : RAPPEL DES PUISSANCES ET COUVERTURES ENERGETIQUES POUR LE SCENARIO GEOTHERMIQUE ENVISAGE	75
TABEAU 16 : PARAMETRES RETENUS POUR L'OUVRAGE GEOTHERMIQUE	76
TABEAU 17 : DISTANCES PRECONISEES POUR L'IMPLANTATION DES SONDAS GEOTHERMIQUES VERTICALES	81
TABEAU 18 : LISTE DES CRITERES NON EXHAUSTIVE POUR L'OBTENTION DES AIDES « FONDS CHALEUR » DE L'ADEME EN 2023	91
TABEAU 19 : AIDE FORFAITAIRE EN €/MWh ENR POUR LA PRODUCTION DE CHAUFFAGE OU DE REFROIDISSEMENT	94
TABEAU 20 : ENVELOPPE BUDGETAIRE PREVISIONNELLE	95
TABEAU 21 : COMPARAISON ECONOMIQUE DE LA SOLUTION GEOTHERMIQUE ENVISAGEE AVEC UNE SOLUTION DE REFERENCE AEROTHERMIQUE AIR/EAU	98
TABEAU 22 : COMPARAISON ENVIRONNEMENTAL DE LA SOLUTION GEOTHERMIQUE ENVISAGEE ET LA SOLUTION DE REFERENCE PAC AIR/EAU	102

LISTES DES ANNEXES

ANNEXE 1 : ZONAGE DU PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS PREVISIBLES - MOUVEMENTS DIFFERENTIELS DE TERRAIN (BOUCHE-DU-RHONE.GOUV.FR)	106
ANNEXE 2 : CARTOGRAPHIE DE LA VITESSE D'ECOULEMENT DE L'ARC POUR UNE CRUE TRENTENNALE (ÉTUDE HYDRAULIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'ARC DANS LE CADRE DE L'IDENTIFICATION DES TERRITOIRES A RISQUES IMPORTANTS, 2015, SAFEGE, DDTM13).....	107
ANNEXE 3 : CARTOGRAPHIE DE L'ALEA DE REFERENCE DE LA CRUE DE REFERENCE DE L'ARC (ÉTUDE HYDRAULIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'ARC DANS LE CADRE DE L'IDENTIFICATION DES TERRITOIRES A RISQUES IMPORTANTS, 2015, SAFEGE, DDTM13).....	108
ANNEXE 4 : LOG DU FORAGE BSS002JNWU (INFOTERRE)	109
ANNEXE 5 : LOG DU FORAGE BSS002JPCQ (INFOTERRE)	110
ANNEXE 6 : LOG DU FORAGE BSS002JNZZ (INFOTERRE)	111
ANNEXE 7 : LOG DU FORAGE BSS002JPCZ 1/2 (INFOTERRE)	112
ANNEXE 8 : LOG DU FORAGE BSS002JPCZ 2/2 (INFOTERRE)	113
ANNEXE 9 : LOG DU FORAGE BSS002JQDB (INFOTERRE)	114

Glossaire

AEP : Alimentation en Eau Potable ou Adduction en Eau Potable

ANC : Assainissement Non Collectif

BASIAS : Base de données des anciens sites industriels et activités de services. Rassemble les données issues des inventaires historiques régionaux (IHR) qui recense les sites qui auraient pu utiliser des substances polluantes pour les sols et eaux souterraines

BASOL : Base de données qui recense les sites et sols pollués (SSP) qui ont engendré un appel à l'action des pouvoirs publics

COP : Coefficient de Performance

ICPE : Installation Classée Pour l'Environnement

Nappe captive : nappe d'eau souterraine emprisonnée entre deux niveaux imperméables et dont le niveau piézométrique ne se situe pas au-dessus du sol

NHEPP : Nombre d'Heures Equivalent Pleine Puissance

PAC : Pompe A Chaleur

SAGE : Schéma d'Aménagement de Gestion des Eaux

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement de Gestion des Eaux

SEER : Seasonal Energy Efficiency Ratio

STEP : Station d'ÉPuration des eaux usées

Transgression/régression : Transgression : élévation du niveau de la mer ; Régression : abaissement du niveau de la mer

ZICO : Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux

ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique

ZRE : Zone de Répartition des Eaux

1 Introduction

1.1 Généralités

Maître d'Ouvrage : CNRS ;

Projet : Construction / Rénovation de la station de Primatologie de Rousset ;

Adresse du chantier : CNRS - Station de Primatologie - 2230 Route des quatre tours, route Provençale D56 - 13790 - Rousset ;

Numéros de parcelles : AR 162-163-164-167-168-170-171-282-305-307-325-327-329-331 ;

Superficie actuelle estimée des bâtiments : 1592 m² ;

Le projet est localisé au sud de la Montagne Sainte-Victoire et au nord du Parc Naturel de la Sainte-Beaume.

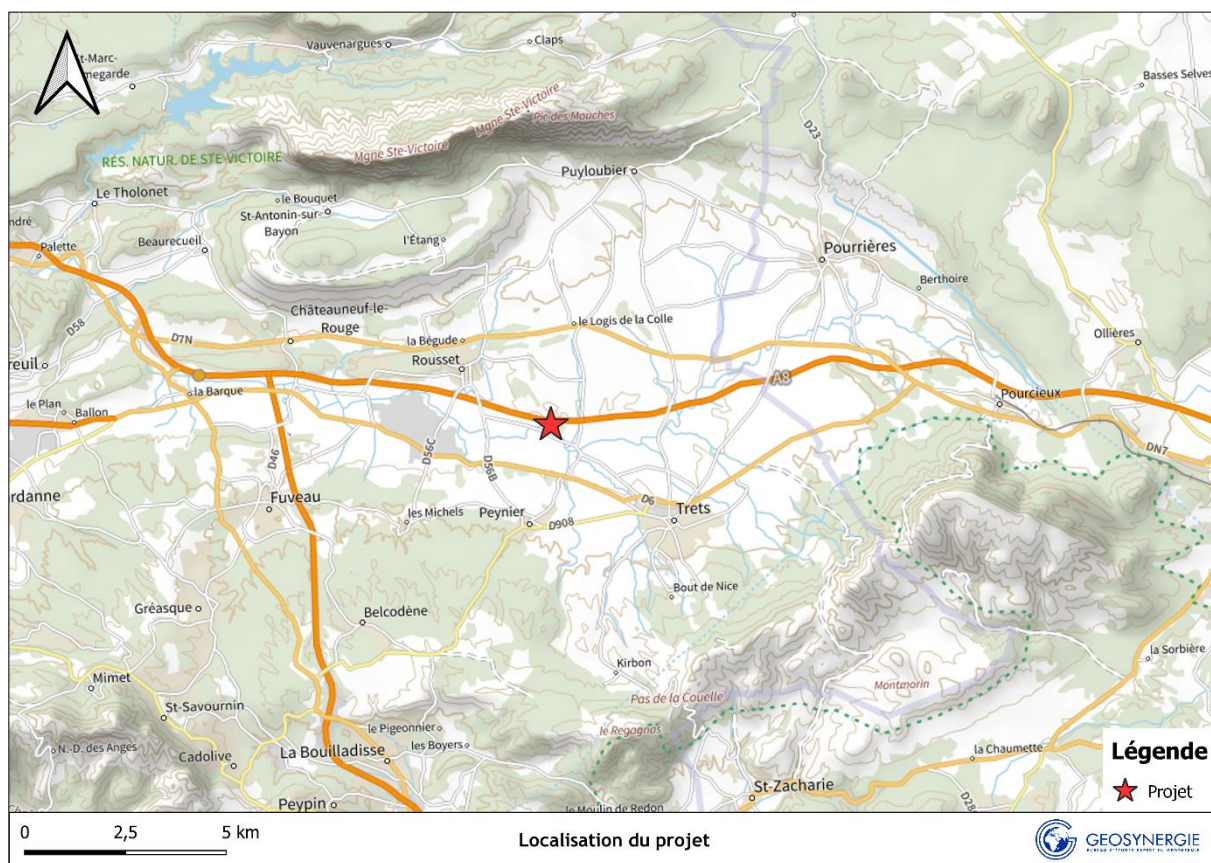


Figure 1 : Localisation du projet



Figure 2 : Localisation des bâtiments du site Rousset

1.2 Présentation du projet

Dans le cadre du projet de construction du Centre National de Primatologie, se situant sur la route Provençale D56 à Rousset (13790), le CNRS-Délégation Provence et Corse souhaite étudier la faisabilité d'une installation géothermique pour chauffer et climatiser l'ensemble des bâtiments. Le projet comprend de nombreux bâtiments, mais seulement 3 d'entre eux vont être conservés et les autres bâtiments seront détruits et reconstruits.

C'est dans ce cadre que le CNRS a mandaté la société GEOSYNERGIE afin de l'assister dans la conception d'une solution énergétique de type géothermie.

Dans un premier temps et tel que recommandé par l'ADEME, l'étude de faisabilité permettra de caractériser le potentiel géothermique sur site et de le faire corrélérer avec les besoins énergétiques du projet. Dans un second temps, un prédimensionnement et le chiffrage d'une solution technique pertinente seront proposés à la Maîtrise d'Ouvrage du projet.

Conformément au cahier des charges de l'ADEME, l'étude qui va suivre contiendra à minima les éléments suivants :

- Analyse documentaire géologique et hydrogéologique ;
- Coupe géologique prévisionnelle ;
- Contexte réglementaire du projet ;
- Dimensionnement des ouvrages en fonction du choix de géothermie et grâce à un outil de modélisation adapté ;
- Taux de couverture géothermique ;
- Investissement lié aux forages géothermiques (phase de reconnaissance comprise) ;
- Justification de la proposition d'implantation et de l'écartement des ouvrages ;
- Préconisations et contraintes d'exploitation ;
- Description technique de l'installation.

2 Contexte réglementaire et environnemental

Plusieurs textes régissent les dispositions administratives et réglementaires applicables aux projets de géothermie :

- Le Code civil ;
- Le Code minier ;
- Le Code de l'environnement ;
- Les Périmètres de Protection des captages d'eau ;
- Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) ;
- Les zones naturelles ;
- Le Plan de Prévention des Risques naturels.

2.1 Le code civil

Du point de vue du Code civil (Article 2270), le constructeur d'un ouvrage est responsable des dommages éventuels causés par l'ouvrage. Cette responsabilité est engagée pendant une période de 10 ans (garantie décennale). Ainsi, Le Maître d'Ouvrage devra s'assurer que l'entreprise de forage est bien titulaire d'une police « responsabilité civile décennale ».

2.2 Le code minier

Le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 et l'arrêté du 25 juin 2015 relatif au Code minier modifie :

- Le décret n°78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie
- Le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la Police des mines et des stockages souterrains
- L'article R122-2 et l'article R414-27 du Code de l'environnement.

Pour toute opération de géothermie, les projets sont considérés comme relevant du régime de la minime importance (soumis à déclaration au titre du Code minier) s'ils remplissent les conditions suivantes :

Tableau 1 : Conditions d'éligibilité à la Géothermie de Minime Importance

	Géothermie sur sonde	Géothermie sur nappe
Régime de température	[-3 ; + 40 °C]	Eau réinjectée < 32 °C Eau prélevée < 25 °C
Débit prélevé	Nul	< 80 m ³ /h (doit être réinjectée dans le même aquifère)
Zones réglementaires GMI	Située hors zone rouge GMI	
Profondeur	[10 à 200 m]	
Puissance thermique max prélevée du sous-sol	< 500 kW	

En outre, dans le cadre de cette nouvelle réforme, une cartographie réglementaire pour les opérations de minime importance a été mise en place. D'après la cartographie ci-dessous le projet se situe en zone verte et est donc « Eligible à la GMI ».

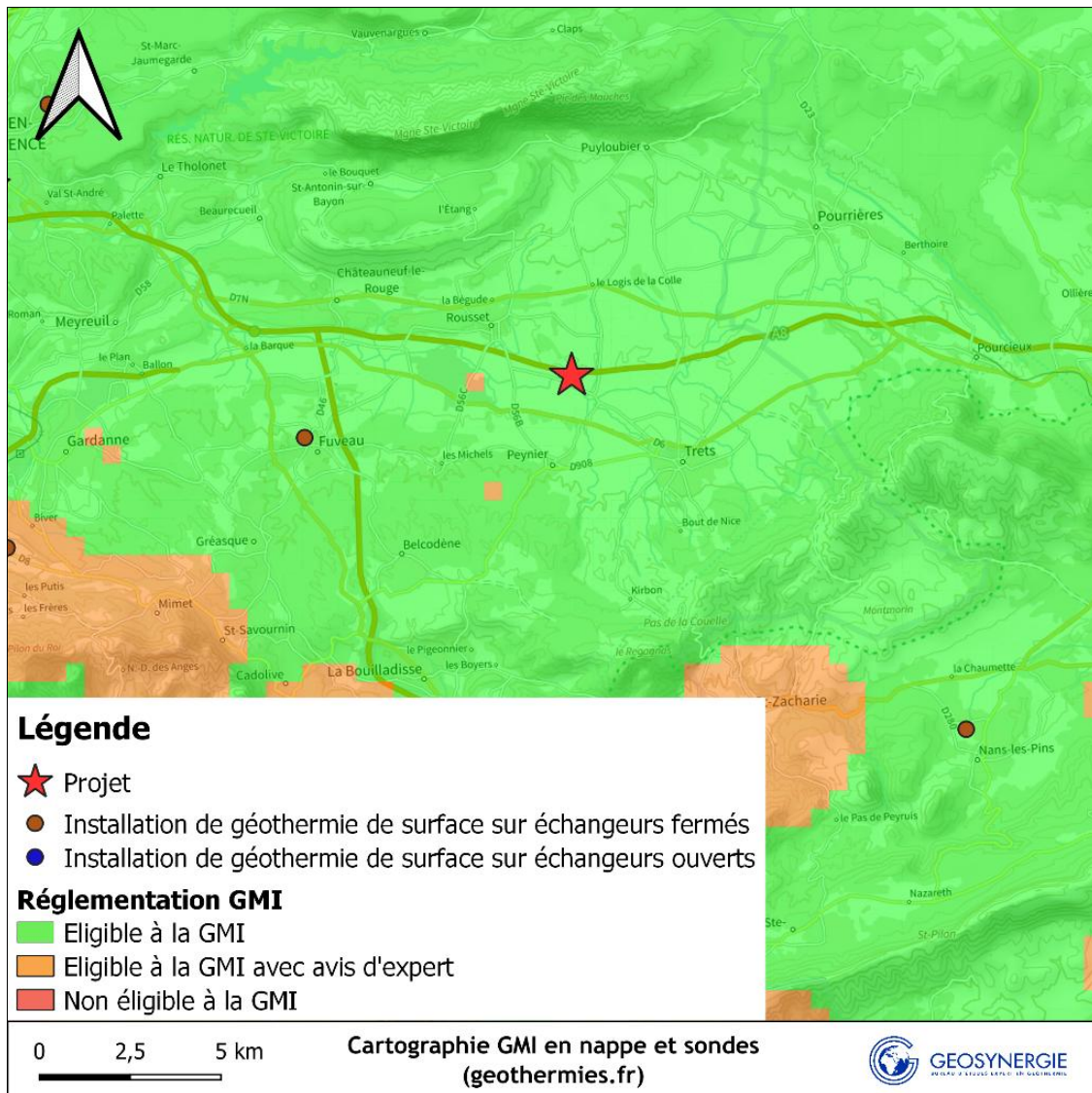


Figure 3 : Cartographie du zonage réglementaire GMI (geothermies.fr)

De manière générale, le régime de la minime importance impose de respecter les règles de l'arrêté du 25 juin 2015 concernant l'implantation des ouvrages, notamment de ne pas être situé :

- Dans les périmètres de protection immédiate et rapprochés des captages d'eau destinés à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées.
- A moins de 35 mètres :
 - D'un ouvrage souterrain de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine ;

- Des stockages d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires ou autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines ;
 - Des bâtiments d'élevage et leurs annexes ainsi que des zones de stockage des déchets de l'exploitation d'élevage ;
 - Des ouvrages de traitement des eaux usées collectifs ou non collectifs ;
- A moins de 200 mètres d'une installation de stockage de déchets relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées
- A moins de 5 mètres :
- De la limite de propriété la plus proche, à défaut d'un accord écrit préalable des propriétaires voisins autorisant la réalisation de l'échangeur géothermique de minime importance ;
 - De conduites, collectives ou non collectives, d'eaux usées ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines lorsqu'une étanchéité est prévue ou dans le cas contraire à moins de 35 m ;

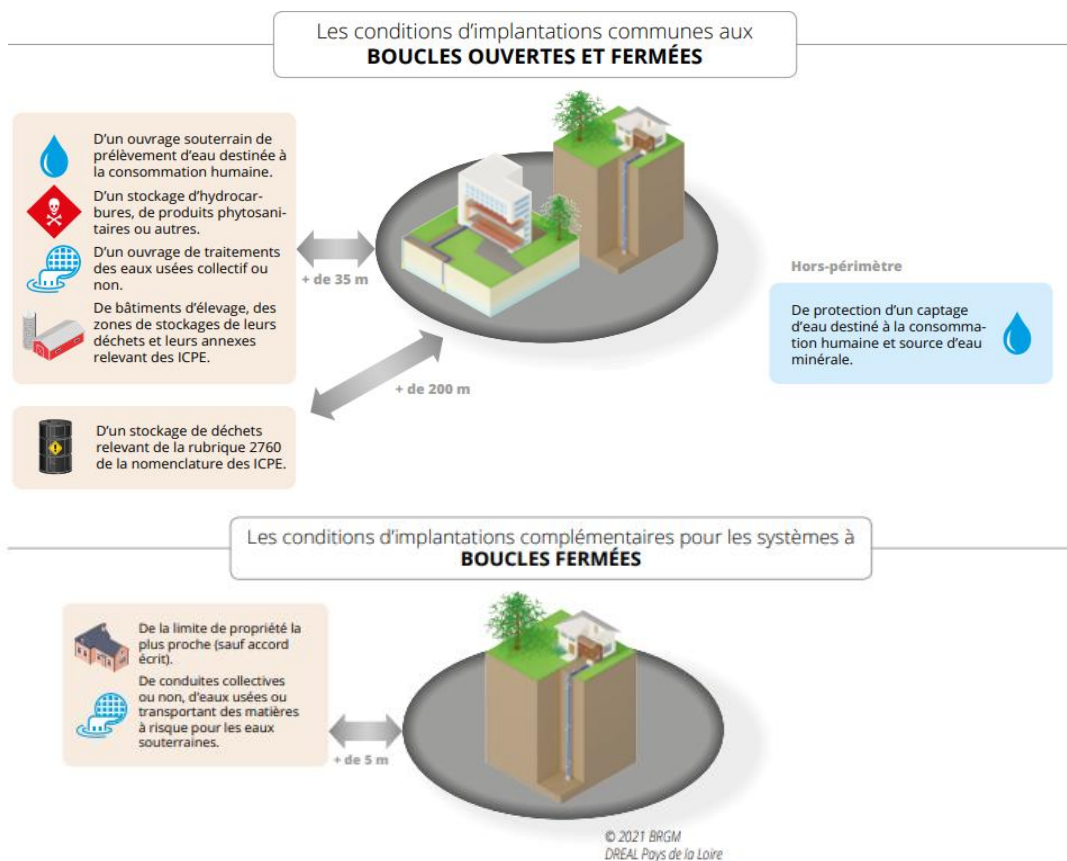


Figure 4: Conditions d'implantation communes aux boucles ouvertes et fermées - BRGM DREAL 2021

Les installations doivent, en outre, répondre aux exigences vis-à-vis des entreprises intervenantes (exploitant, entreprise de forage et installateur) avec notamment la qualification obligatoire RGE QUALIFORAGE, être conformes aux dispositions générales lors de la réalisation (chantier, matériaux et matériel), lors de l'exploitation et lors de l'arrêt des travaux d'exploitation, être conformes aux contrôles et surveillances et finalement aux documents réglementaires, dont notamment :

- Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) ;
- Les règlements des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) ;
- Les Plans de Prévention des Risques naturels ;
- Les servitudes d'utilité publique ;
- Les dispositions du règlement sanitaire départemental.

2.3 Le code de l'Environnement

Depuis le 8 Janvier 2015 et la publication du décret 2015-015, la géothermie n'est plus soumise à la réglementation du Code de l'Environnement.

Le régime réglementaire de la Géothermie de Minime Importance, s'appliquant uniquement aux travaux d'exploitation, est la déclaration, selon le décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié, le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié ainsi que l'arrêté du 25 juin 2015. La télédéclaration est réalisée en ligne sur le site [<https://geothermie.developpement-durable.gouv.fr/>].

2.4 Les périmètres de protection

Dans le cadre de la Géothermie de Minime Importance, les forages géothermiques ne devront pas se situer à l'intérieur d'un périmètre de protection rapproché (PPR) d'un captage d'eau potable. Le projet n'est pas situé dans un périmètre de protection sanitaire (<https://carto.atlasante.fr>).

2.5 Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Rhône-Méditerranée est un document de planification qui fixe les principales orientations de la politique de gestion de l'eau sur le bassin.

Le SDAGE 2022-2027 du bassin Rhône-Méditerranée a été approuvé et arrêté le 21/03/2022 puis publié au JO du 3 avril 2022, rendant effective sa mise en œuvre à compter du 4 avril 2022. Il fixe les objectifs, les orientations et les dispositions à mettre en œuvre pour une gestion équilibrée de l'eau et des milieux aquatiques.

La disposition D7-05 « Rendre compatible les politiques d'aménagement du territoire et les usages avec la disponibilité de la ressource » de l'orientation fondamentale N°7 du SDAGE « Atteindre et préserver l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir » préconise d'avoir une gestion responsable de l'eau afin d'économiser la ressource en eau, mais également d'anticiper et **de s'adapter à la rareté de la ressource en eau dans le but de la protéger.**

Cette mesure vise à éviter l'introduction de polluants et d'assurer l'isolation des nappes mais également d'assurer un retour à l'équilibre quantitatif des ressources en eau. Elle recommande :

- Que le maître d'ouvrage évalue les impacts du ou des forages d'ordre physique, thermique, qualitatif ou quantitatif sur le sous-sol et les milieux aquatiques et terrestres concernés ;
- Que l'autorité administrative recense les ouvrages et tienne compte de leurs impacts, notamment cumulés, dans le cadre de l'instruction administrative des dossiers ;
- Que les eaux soient restituées à leur réservoir d'origine ou valorisées par un autre usage, dans le cadre de projets de prélèvement de nappe.

La masse d'eau qui sera ici concernée par le projet (n° FRDG210) est considérée comme une masse d'eau à fort intérêt économique (alimentation en eau potable) et écologique (riche biodiversité et forte contribution des hydrosystèmes superficiels).

Les ouvrages géothermiques seront réalisés dans les Règles de l'Art (norme NF X10-999 ou NF X10-970), en prêtant une attention particulière à la cimentation des forages afin d'éviter toute pollution superficielle.

2.6 Schéma d'aménagement et de gestion des eaux

Le projet est situé dans le périmètre du SAGE du bassin versant de l'Arc Provençal qui a été publié le 01/05/2012. Les thèmes des enjeux de ce document sont :

- La gestion quantitative ;
- La gestion qualitative ;
- Crues et inondations ;
- Gouvernance et aménagement du territoire ;
- Milieux aquatiques et biodiversité.

Le projet est partiellement situé en zone d'expansion de crue

2.7 Plan Local d'Urbanisme

D'après le Plan Local d'Urbanisme (PLU) de la commune de Rousset disponible sur la plateforme ampmetropole.fr, aucune contrainte ne s'oppose à l'implantation de forages géothermiques.

2.8 Zones naturelles réglementées

Les ouvrages géothermiques n'ont pas d'impact sur l'écosystème local. Seules les étapes de chantier pourraient temporairement l'affecter avec des nuisances sonores, émissions de CO₂ ou des pollutions ponctuelles. L'inventaire des zones naturelles a tout de même été réalisé ci-dessous :

Natura 2000

Le projet n'est pas situé dans une zone Natura 2000. La zone Natura 2000 la plus proche concerne « La Montagne Sainte-Victoire » (Directive Habitat - n°FR9301605, Directive Oiseaux - n°FR9310067). Cette zone est située à 4 km au nord-ouest du projet.

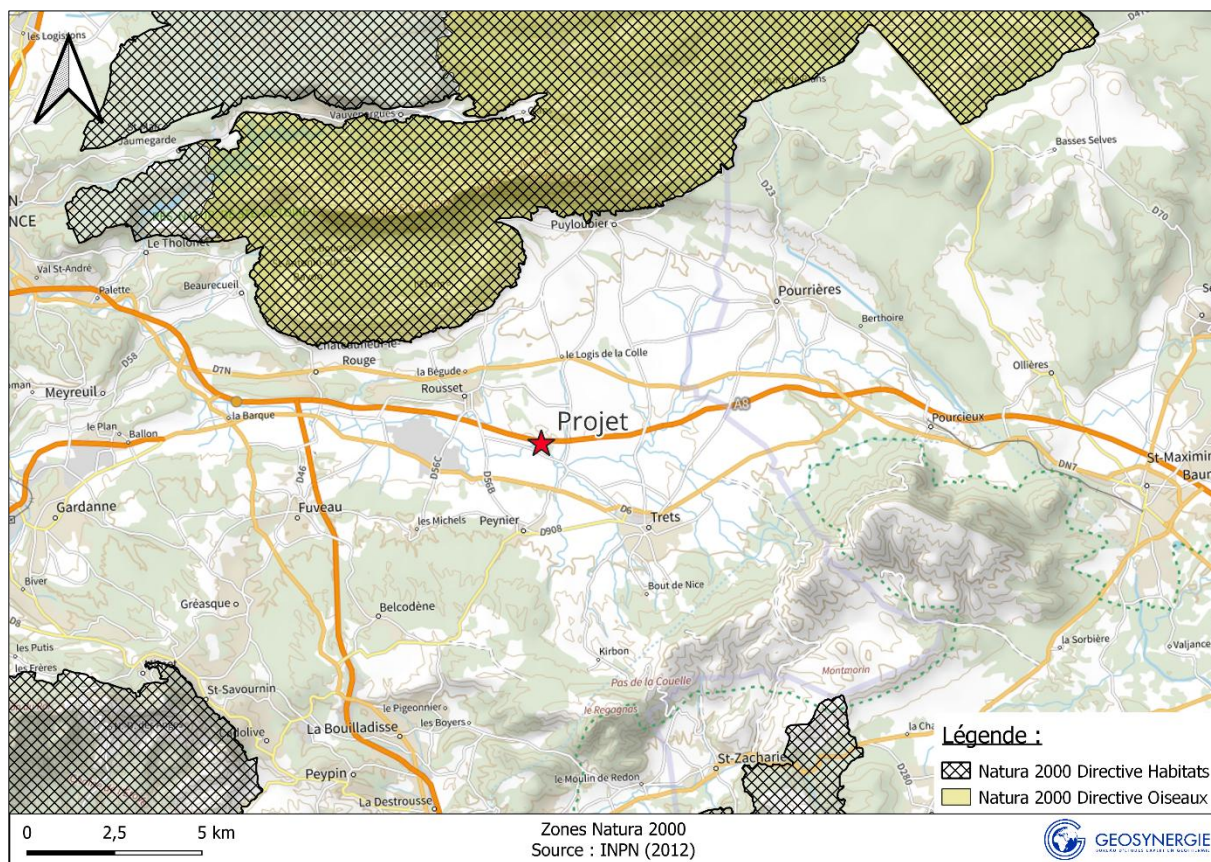


Figure 5 : Zones Natura 2000 (Directives Habitat et Oiseaux) - INPN

ZNIEFF

Le projet n'est pas situé dans une zone ZNIEFF. La zone ZNIEFF la plus proche est celle de « Montagne Sainte-Victoire » (Type II - n°930012450) situées à 3.2 km au nord-ouest du projet.

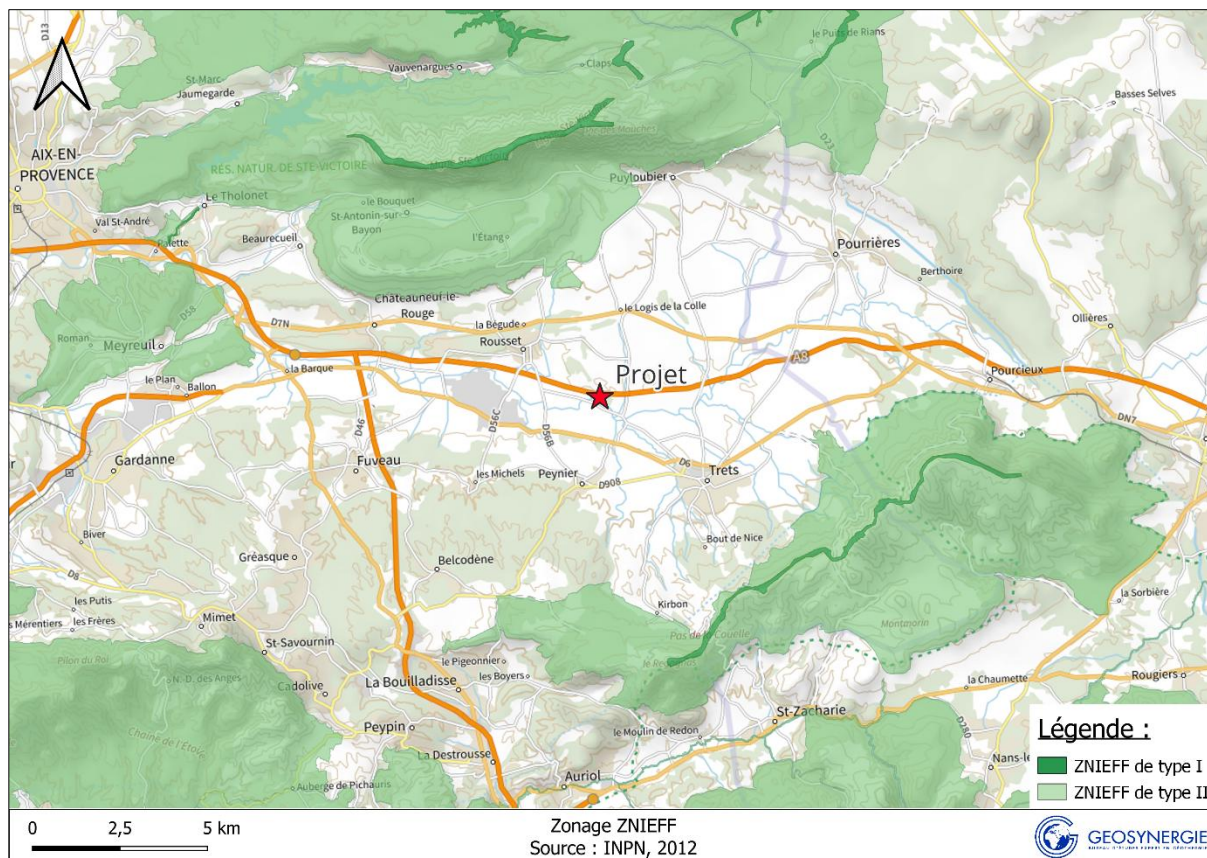


Figure 6 : Zones ZNIEFF de types I et II - INPN

ZICO

Le projet n'est pas situé dans une zone ZICO. La zone ZICO la plus proche concerne les « Montagne Sainte Victoire » (n°00238). Cette zone est située à 3.5 km au nord-ouest du projet.

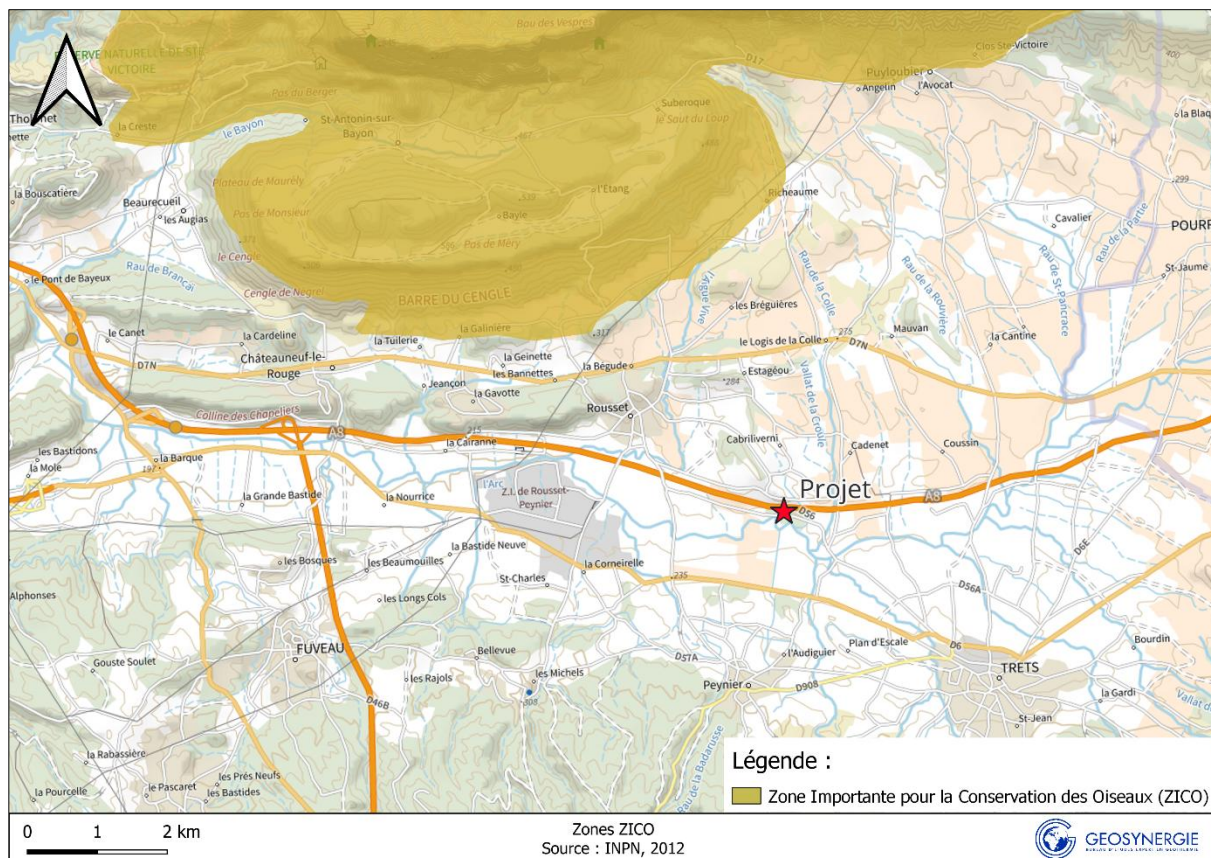


Figure 7 : Zones ZICO - INPN

Parcs naturels régionaux

Le projet est situé à 7.2 km à l'ouest du Parc Naturel de la Sainte-Baume (n° FR8000053).

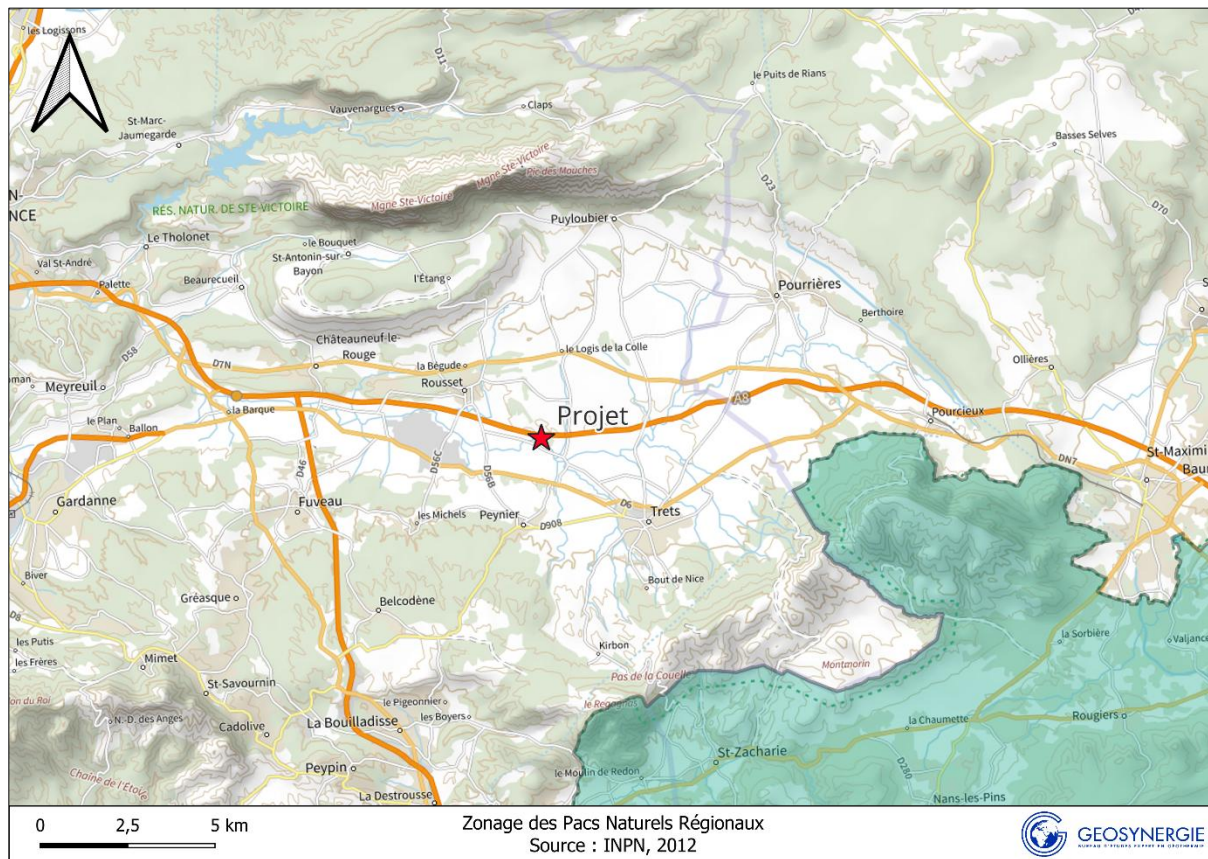


Figure 8 : Zonage des Parcs Naturels Régionaux - INPN

2.9 Risques technologiques

Aucun risque technologique n'est présent au droit du projet. Un inventaire des sites sensibles à proximité du projet est tout de même présenté ici.

BASIAS

Tableau 2 : Récapitulatif des site BASIAS à proximité du projet (Géorisques)

Distance au projet	N°	Nom
520 m (NE)	SSP3987776	Carrefour Autoroutes Commerce de carburants
590 m (NO)	SSP3987859	Compagnie française de raffinage Aire de service d'Aix 4 Tours

BASOL

Tableau 3 : Récapitulatif des site BASOL à proximité du projet (Géorisques)

Distance au projet	N°	Nom/activités
2.3 km (SO)	SSP408256001	Ancienne décharge de Peynier
2.5 km (O)	SSP000905301	Aventis Agriculture (ex Rhône Poulenc Agro) Fabrication de produits phytosanitaires

Installation classée

Tableau 4 : Récapitulatif des installations classées à proximité du projet (Géorisques)

Distance au projet	N°	Nom/activités
400 m (O)	0006402586	Thevenin & Ducrot Autoroutes SAS Stations-service
420 m (SO)	0006409406	Recyclage Stockage bois déclaré / Installations de traitement aérobie de déchets non dangereux
900 m (N)	0006411588	SOCAER Elevage de porcins

Conduite de matière dangereuse

Aucune conduite de matière dangereuse ne se situe au droit du projet. L'emprise d'une canalisation de gaz naturel et d'hydrocarbures est présente à 2.4 km au nord du projet.

STEP

La station d'épuration la plus proche se situe à 15.3 km à l'ouest du projet. Il faut noter qu'il faut respecter une distance de 5 m entre les forages géothermiques de toute conduites d'eau usée étanches ou à défaut, 35 m des conduites non étanches.

2.10 Risques naturels

Retrait-gonflement des argiles

Lors d'infiltration d'eau ou de sécheresse, les argiles présentes dans le sol peuvent se gonfler ou se rétracter. Ce risque concerne les sols superficiels jusqu'à 5 m de profondeur et n'a pas d'impact sur un échangeur géothermique. L'aléa au droit du projet est « fort ».

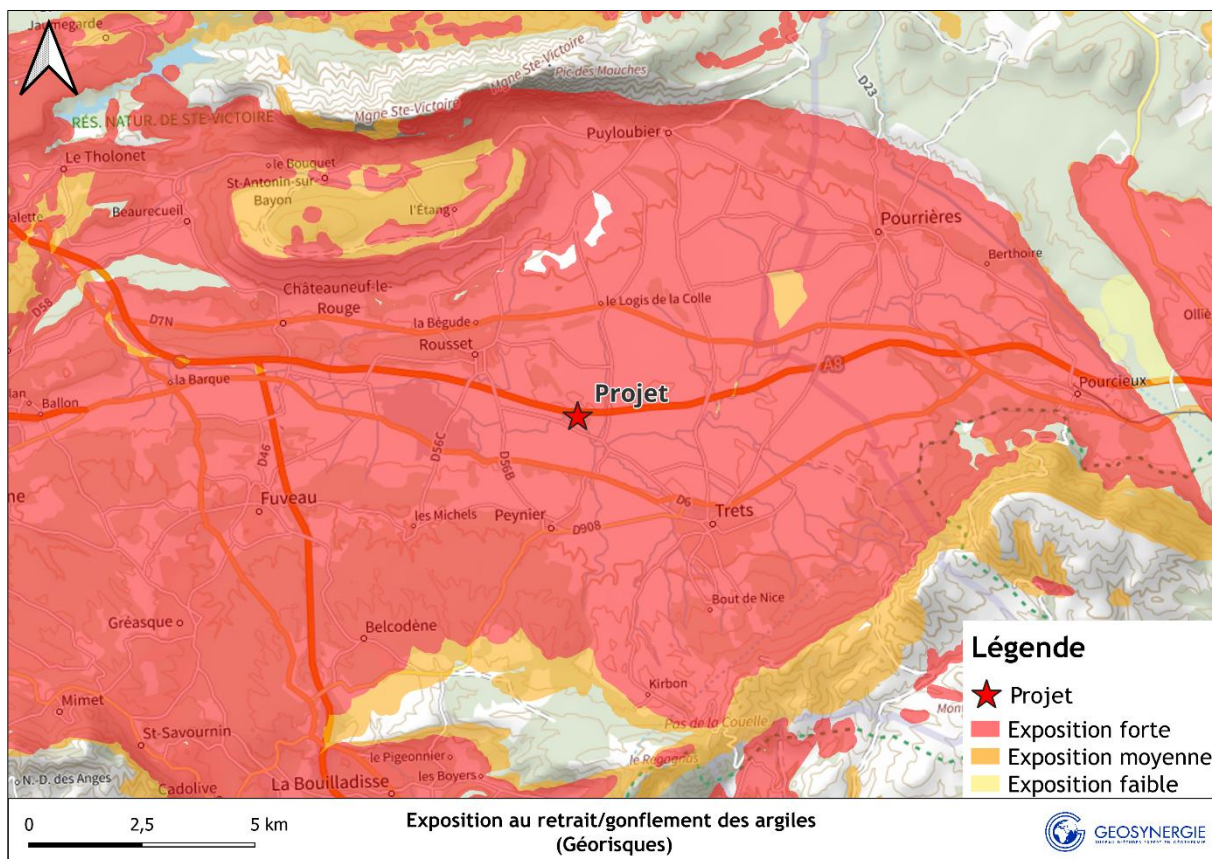


Figure 9 : Exposition au retrait gonflement des argiles (Géorisques)

Zonage sismique

Le projet est localisé dans une zone à risque sismique faible. Les normes parasismiques ne s'appliquent pas à ce niveau pour les forages géothermiques. Cela n'a donc aucun impact sur notre projet.

Mouvement de terrain

Le projet est situé dans une zone moyennement exposée au risque de mouvement de terrain (voir le zonage en Annexes).

Zone d'inondation

Le projet n'est pas concerné par un zonage de Plan de Prévention du Risque inondation (PPRI). Toutefois, le sud de la parcelle du projet est exposé à un aléa fort pour la crue de référence (plus forte crue connue ou d'occurrence centennale), voir la cartographie en **Annexes**. De même, le sud de la parcelle du projet est également sujet à une vitesse d'écoulement supérieure à 1 m/s pour les crues trentennales (voir la cartographie en **Annexes**).

Remontée de nappe

Le site est situé en zone potentiellement sujette aux débordements de nappe. Que ce soit un système en boucle ouverte (exploitation de nappe) ou en boucle fermée (sonde), ce zonage n'aura pas d'impact sur les ouvrages.

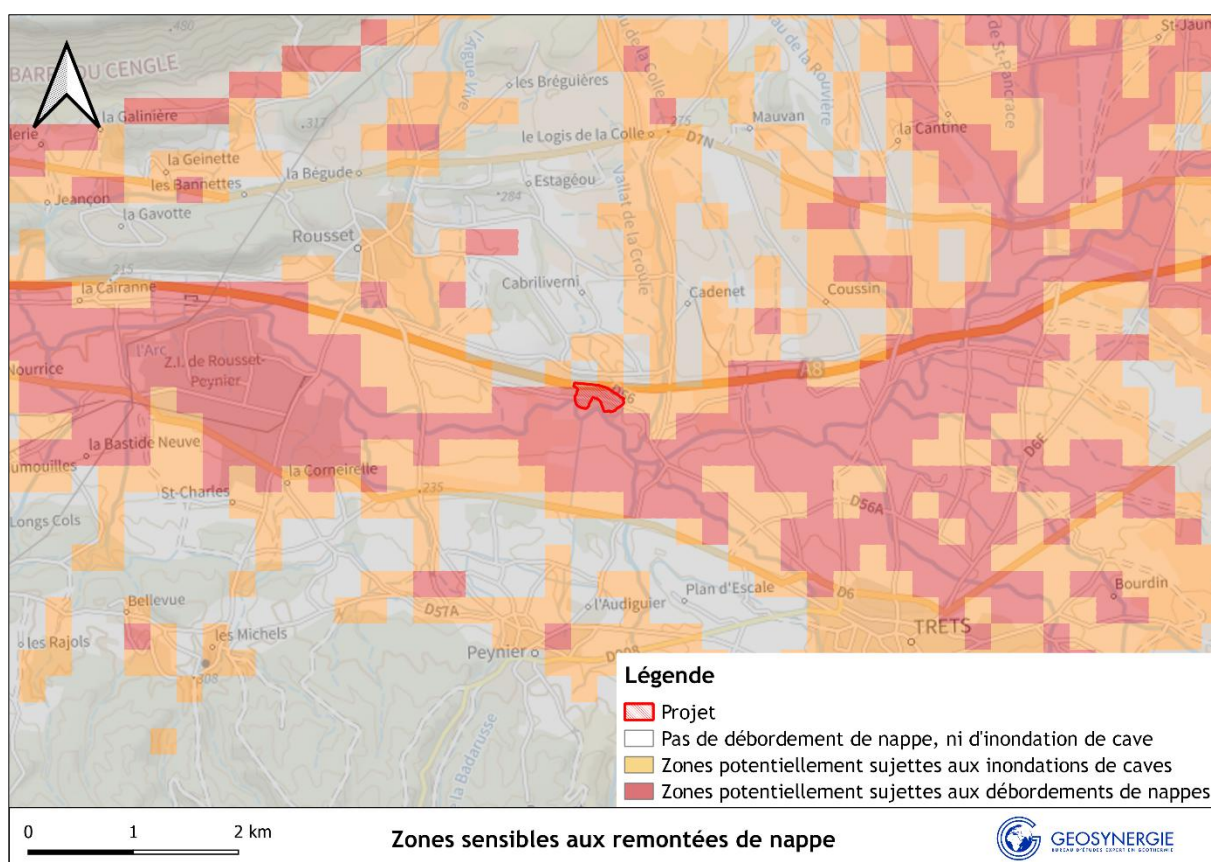


Figure 10 : Zones sensibles aux remontées de nappe (Géorisques)

Cavité

La zone d'étude n'abrite pas de cavité souterraine abandonnée d'origine non minière. La cavité la plus proche concerne le gouffre de la Jolie, à 3.6 km au sud-ouest du projet (n° PACAA0003841).

3 Contexte hydrogéologique

3.1 Contexte géologique

3.1.1 Contexte régional

La France est un pays riche d'une diversité géologique dans laquelle différentes formations sont présentes : chaînes de montagnes (Alpes, Pyrénées...), des fossés d'effondrements (sillon rhodanien), des bassins sédimentaires (bassin Parisien et Aquitain) ou encore des vestiges de zones volcaniques ou montagneuses (Massif Central, Massif Armoricain).

La zone d'étude se situe au sud/ouest du domaine alpin. Ce relief résulte de la collision des plaques continentales (européenne et adriatique) qui a eu lieu après la fermeture de l'océan Téthys il y a environ 250 millions d'années entraînant la formation de la ceinture alpine.

Le projet est situé sur le flanc sud du synclinal de l'Arc, d'orientation est-ouest, formé sous l'effet des déformations tectoniques induites par la compression des massifs alpins. Plusieurs cycles de transgressions et de régressions se sont produites en alternance dans ce synclinal, entraînant une accumulation de dépôts sédimentaires d'origine marines et continentales.

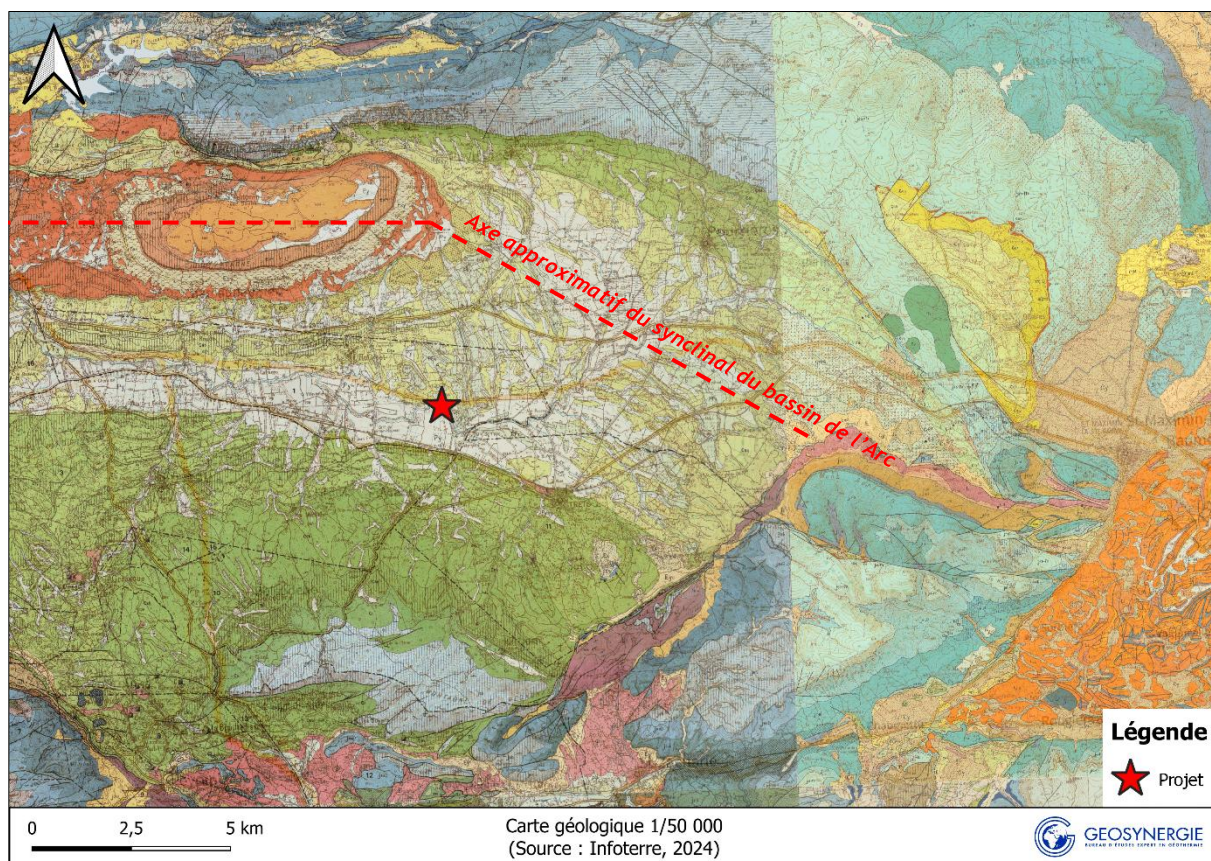


Figure 11 : Carte géologique imprimée 1/50 000 du bassin de l'Arc (Infoterre)

3.1.2 Contexte local

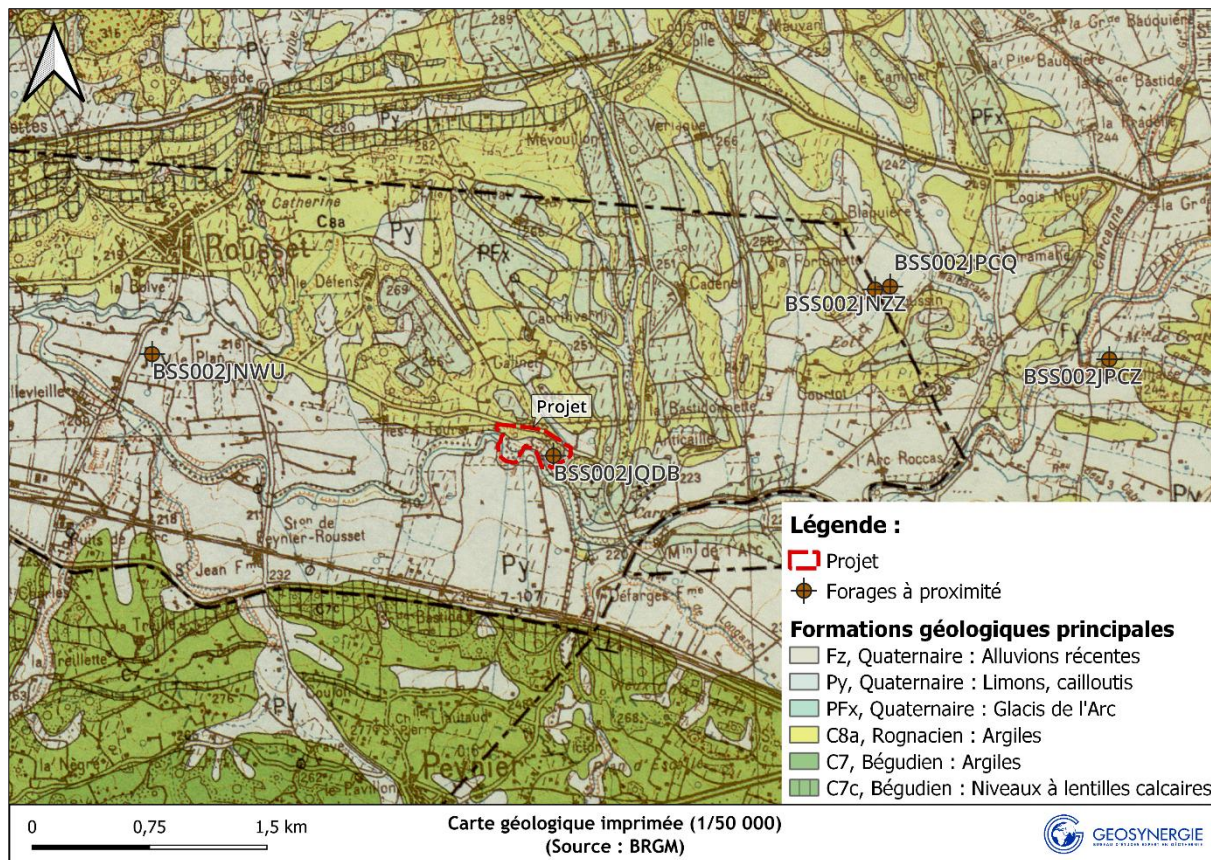


Figure 12 : Carte géologique imprimée 1/50 000 du secteur et ouvrages à proximité (Infoterre)

D'après la carte géologique imprimée 1/50 000 n°1021 de Aix-en-Provence (voir figure ci-dessus), le projet se situe environ entre 232 et 213 m/NGF sur des alluvions récentes du Quaternaire, notées Fz (au sud de la zone d'étude) et sur des formations du Rognacien, notées C8a (au nord de la zone d'étude). Les alluvions récentes sont principalement composées de sables, graviers et cailloutis provenant de l'Arc. Les formations du Rognacien, d'environ 250 m d'épaisseur, sont principalement composées d'argiles rouges et de lentilles gréseuses. Celle-ci repose sur 300 m d'argiles et marnes « lies de vin » du Béguvien (C7), difficilement distinguables des argiles du Rognacien. Ces formations du Béguvien sont surmontées par un niveau de lentilles calcaires (C7c).

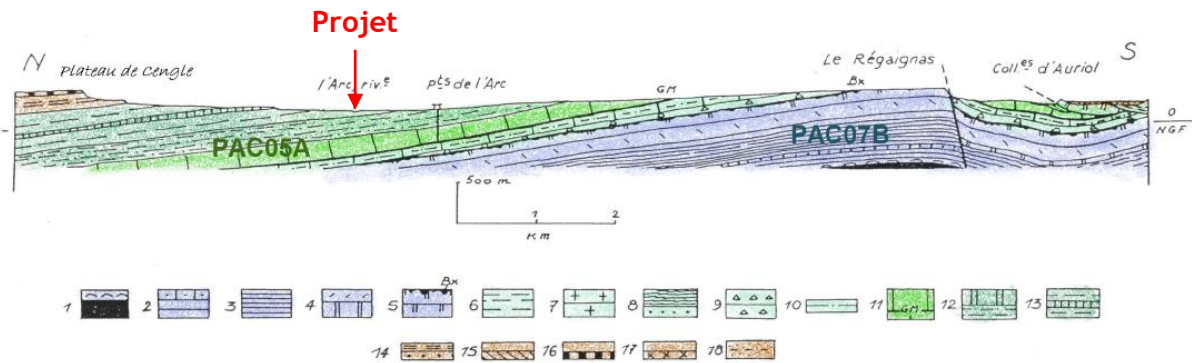


Figure 13 : Coupe géologique N-S du flanc sud du synclinal de l'Arc - PAC05A & PAC07B (BRGM)

3.2 Contexte hydrogéologique

3.2.1 Hydrologie

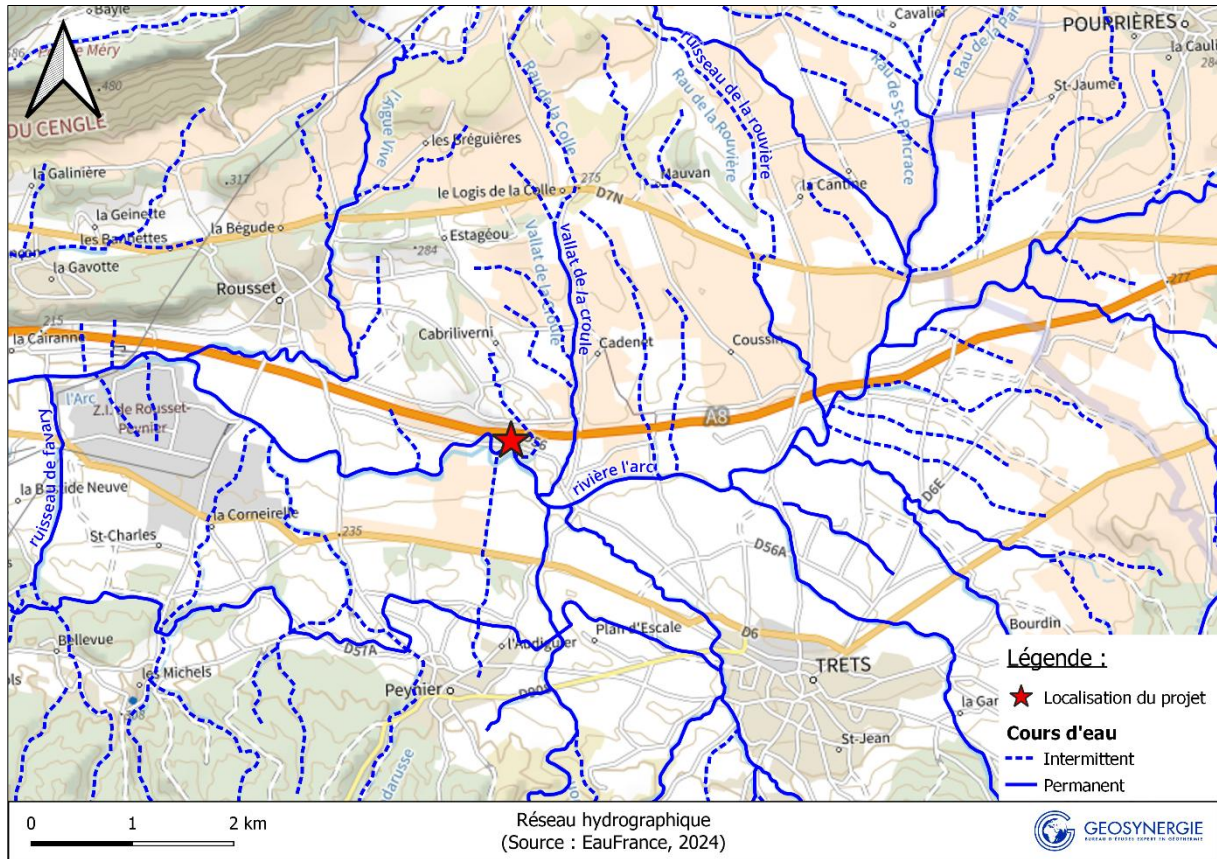


Figure 14 : Réseau hydrographique présent au droit du projet

Le fleuve de l'Arc est le cours d'eau principal de la zone d'étude. Il délimite d'ailleurs le sud de la parcelle du projet. L'Arc prend sa source à Saint-Maximin-la-Sainte-Baume et se jette dans l'étang de Berre, traversant presque exclusivement les Bouches-du-Rhône sur plus de 80 km.

ZRE : La commune de rousset n'est pas soumise à une ZRE.

Quantité : Le débit moyen annuel de l'Arc est d'environ 1.23 m³/s, selon les données entre le 01/06/1972 et 01/09/2024 à la station de mesures hydrométriques « l'Arc à Meyreuil » (n° Y402 2010), disponibles sur HydroPortail (voir Figure ci-dessous).

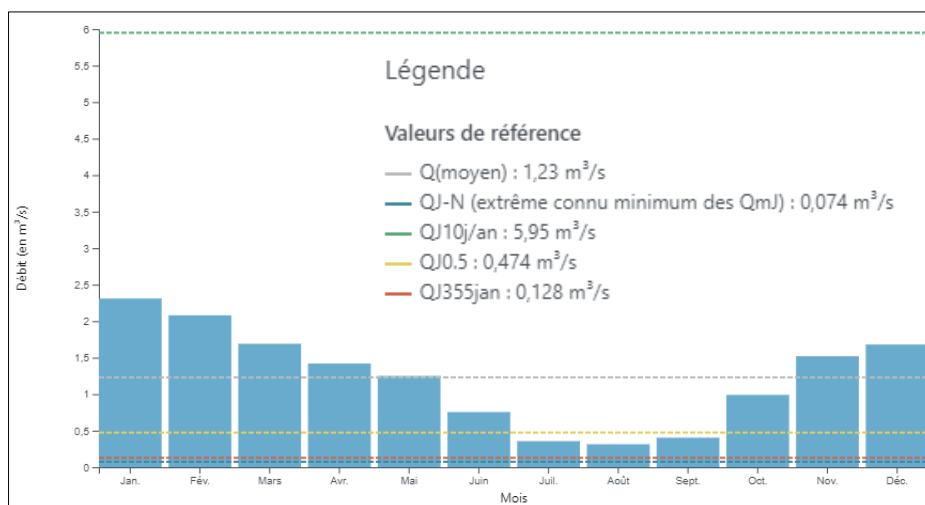


Figure 15 : Moyenne mensuelle des débits entre le 01/06/1972 et le 01/09/2024 à la station Y402 2010
 (HydroPortail, EauFrance)

Qualité de l'eau : En 2024, la qualité de l'eau de l'Arc est moyenne, avec un état écologique mauvais et un bon état chimique non atteint (voir le tableau de la station de mesure n°06194800 ci-dessous). Une station de mesure est également située en aval du CNRS et relève des teneurs très élevées de phosphate et d'ammonium (voir le tableau de la station de mesure n°06194810 ci-dessous).

Tableau 5 : Evaluation et suivi de mesures de la station n°06194800 (Arc à Rousset 1) (EauFrance)

Physico-chimie	2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017
Bilan de l'oxygène								
Température								
Nutriments azotés								
Nutriments phosphorés								
Acidification								
Polluants spécifiques								
Biologie	2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017
Invertébrés benthiques								
Diatomées								
Macrophytes								
Poissons								
Hydromorphologie								
Pressions Hydromorphologiques								
Etat écologique	2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017
Etat écologique								
Potentiel écologique	2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017
Potentiel écologique								
Etat chimique	2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017
Etat chimique								

Tableau 6 : Evaluation et suivi de mesures de la station n°06194810 (Arc à Rousset 3) (EauFrance)

Physico-chimie	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013
Bilan de l'oxygène							
Température							
Nutriments azotés							
Nutriments phosphorés							
Acidification							
Polluants spécifiques							

Légendes

Etat écologique

Très bon état	Bon état	Etat moyen	Etat médiocre
Etat mauvais	État indéterminé *	Non concerné	

Etat chimique

Bon état	Non atteinte du bon état
Information insuffisante pour attribuer un état	

3.2.2 Hydrogéologie régionale

Selon la cartographie des masses d'eau souterraines de 2013 disponible sur Infoterre, 2 masses d'eau sont situées au droit du projet : les alluvions de l'Arc (FRDG370) et les formations variées et calcaires fuvéliens et jurassiques du bassin de l'Arc (FRDG210).

L'aquifère des alluvions de l'Arc se distingue en 2 secteurs :

- Dans le bassin amont : une nappe libre et peu profonde, s'écoulant d'est en ouest ;
- Dans le bassin aval (à proximité de l'étang de Berre) : une nappe libre, localement captive s'écoulant vers le sud-ouest.

Etant donné la faible épaisseur d'alluvions au niveau du projet, environ 6 m, et de leur forte teneur en argiles, les caractéristiques de cette masse d'eau ne seront pas présentées dans ce rapport.

Masse d'eau n° FRDG210 :

Masse d'eau et entité hydrogéologique : La masse d'eau a une superficie totale de 1034 km² dont 97 km² sous couverture, et est présente majoritairement dans les Bouches-du-Rhône (13). L'aquifère concerné dans la zone d'étude est multicouche et composé de formations secondaires à tertiaires du Bassin de l'Arc (PAC05A). Ces formations poreuses sont à dominante sédimentaire. La composition de cette entité est très variable : calcaires, conglomérats, argiles, sables... Le projet est situé au niveau de l'aquifère du Rognacien.

Recharge de l'aquifère du Rognacien : L'aquifère est principalement rechargé par les précipitations et éventuellement par drainance ascendante des aquifères sous-jacents (aquifère du Bégudien).

3.2.3 Hydrogéologie locale

Paramètres hydrodynamiques et piézométrie : En raison de la faible perméabilité des formations du Rognacien (forte présence d'argiles), les uniques réservoirs d'eaux souterraines intéressants sont présents sous forme de lentilles gréseuses ou calcaires, répartis de manière hétérogène. Ces compartiments sont généralement de tailles réduites et cernés par les formations imperméables ou peu à semi-perméables. Le sens d'écoulement, le niveau d'eau statique et la transmissivité sont donc difficilement estimables dans l'aquifère du Rognacien. Toutefois, le niveau piézométrique de l'aquifère alluvial au niveau du projet est autour de 210 m/NGF, soit entre 3 et 6 m/TN (voir le forage BSS002JQDB).

Productivité : Très peu d'informations sur la productivité des formations du Rognacien sont disponibles. Selon la fiche descriptive de l'aquifère multicouche PAC05A, les niveaux aquifères du Rognacien ne pourraient répondre qu'à de faibles besoins, tels que ceux de particuliers. Le forage BSS002JNWU, situé à moins de 3 km à l'ouest du projet, recoupe entièrement les formations du Rognacien sur 230 m avant d'atteindre les calcaires du Bégudien. Aucune arrivée d'eau n'a été observée avant 300 m/TN, où celle-ci ne dépassait pas 3 m³/h.

Qualité et vulnérabilité de la nappe : L'eau est bicarbonatée calcique avec un risque de de concentration élevée en sulfates dans les zones avec des anciennes galeries minières. Sinon, l'eau est de bonne qualité malgré des teneurs en fer assez élevées.

3.3 Synthèse hydrogéologique et log prévisionnel

Le projet est localisé sur les alluvions de l'Arc d'environ 6 m d'épaisseur composées d'argiles sableuses. Cette formation alluviale semble peu productive au droit du projet et repose sur des argiles rouges du Rognacien contenant des lentilles aquifères gréseuses. Ces formations n'abriteraient que des réservoirs de petites tailles avec un faible débit. Ces deux aquifères ne semblent donc pas être suffisamment productifs pour couvrir les besoins du projet par une géothermie sur nappe.

Le contexte hydrogéologique a pu être confirmé lors de la campagne de reconnaissance menée par la société Luroforage en avril 2025. Bien que le forage ait atteint une profondeur de 200 mètres, la sonde, initialement prévue pour être installée sur toute cette longueur, n'a pu être descendue que jusqu'à 145 mètres.

En cause : une arrivée d'eau artésienne rencontrée entre 155 et 165 mètres de profondeur, ayant provoqué un éboulement des formations.

Pour la suite du projet, il conviendra de prévoir le dimensionnement du futur champ de sondes sur la base d'une profondeur de 150 mètres.

Ci-dessous le log lithologique réalisé à partir des échantillonnages de cuttings prélevés par la société LUROFORAGE lors du forage test.

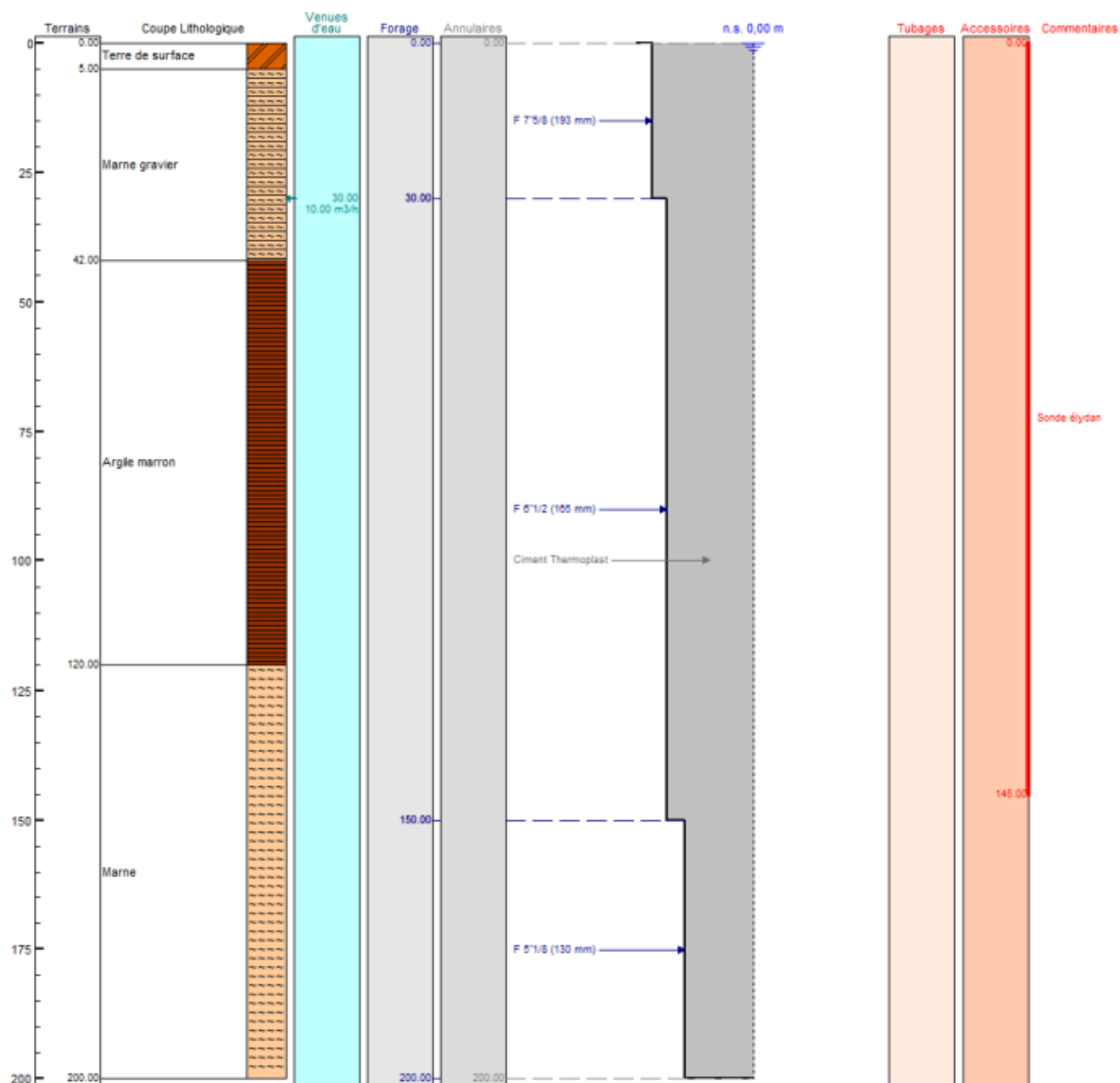


Figure 16 : Log forage sur 200 mètres (logiciel forages)

4 Simulation thermique dynamique

4.1 Documents recueillis

Les documents suivants ont pu être recueillis auprès du CNRS :

- Plans des bâtiments
- Plans de l'extension du bâtiment ROU140
- Plans des réseaux
- Plan topographique
- Dossier des Ouvrages Exécutés ROU150
- Documents récapitulant les informations demandées au sujet des bâtiments
- Extraits du programme fonctionnel du projet de construction
- Estimation des puissances de déperdition thermique des bâtiments en projet
- Factures énergétiques 2020 à 2024 (propane + électricité)
- Factures d'eau 2020 à 2024

4.2 Visite

La visite sur site a été réalisée le mercredi 24 juillet 2024 par Franck BULCOURT et Rémy SAULNIER de la société ENERSIM.

La température extérieure lors de la visite était de 26°C.

4.3 Fonctionnement du site

Le site est un centre de recherche en primatologie.

Des bâtiments existants seront conservés, mais la majorité des bâtiments étudiés vont être construits.

4.4 Projet de construction/rénovation

Le projet de réhabilitation du centre de primatologie comprend la destruction/reconstruction d'une grande partie des bâtiments. Un concours de maîtrise d'œuvre est en cours sur la conception du projet. Il n'est donc pas possible de connaître les caractéristiques des bâtiments pour le moment.

Deux scénarios d'implantation des futurs bâtiments ont été envisagés et les plans de la rénovation/extension du bâtiment ROU140 ont été fournis par le CNRS. Les bâtiments

existants qui seront conservés sont représentés en rouge sur les plans ci-dessous (ROU140 / ROU150 / ROU160)

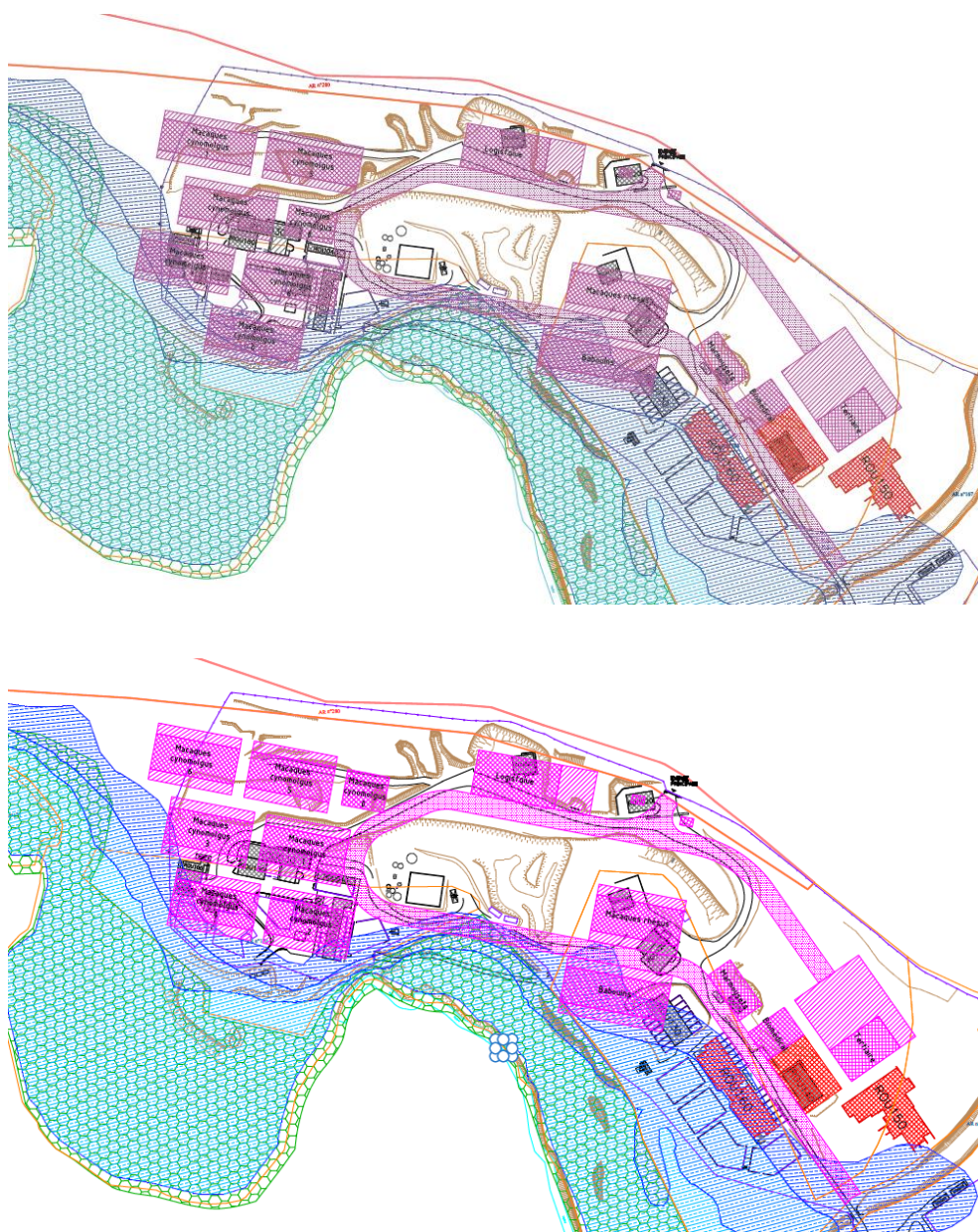


Figure 17 : Scénarios d'implantation des futurs bâtiments

Les deux scénarios d'implantation sont très similaires en termes d'espacement des bâtiments. Une hypothèse de réseau de chaleur ou d'eau glacée à réaliser pour alimenter les bâtiments pourra donc être réalisée et correspondre aux deux scénarios possibles.

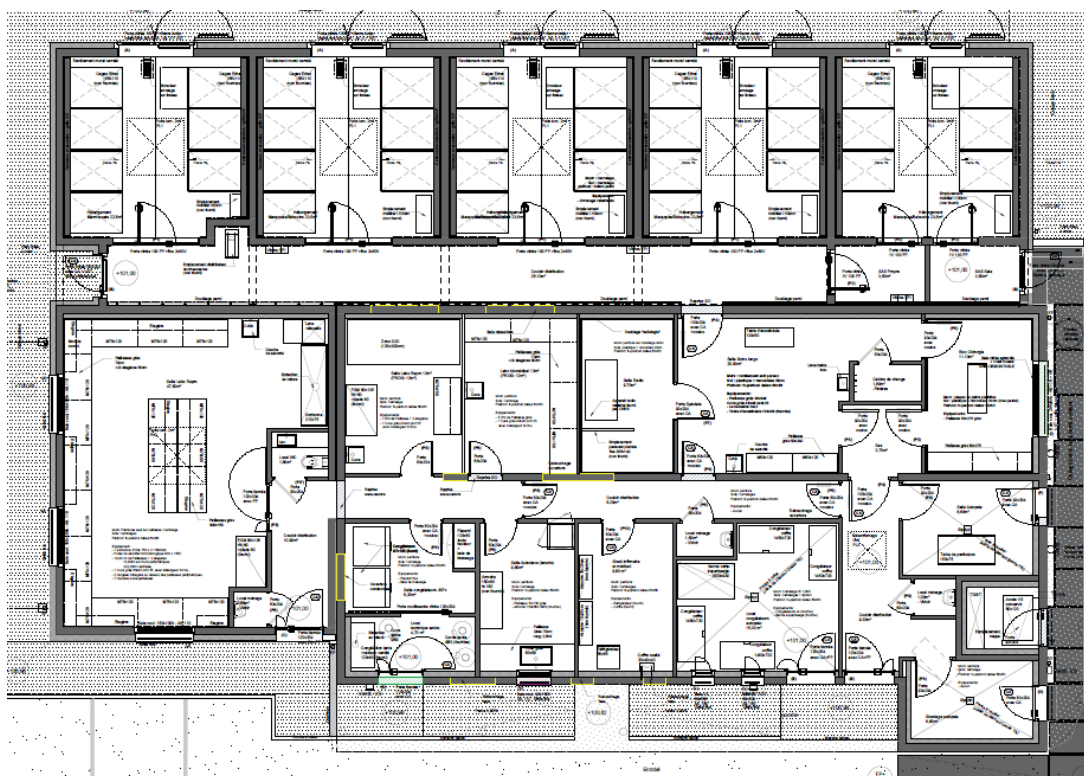


Figure 18 : Plan du bâtiment ROU140 après rénovation/extension

A l'heure actuelle il n'est pas possible d'obtenir les plans des bâtiments faisant l'objet du concours de maîtrise d'œuvre. Les besoins de chaleur et climatisation vont donc être évalués à l'échelle de l'année, puis répartis heure par heure sur la base des températures extérieures, de l'occupation (permettant d'évaluer les apports internes) et du rayonnement solaire.

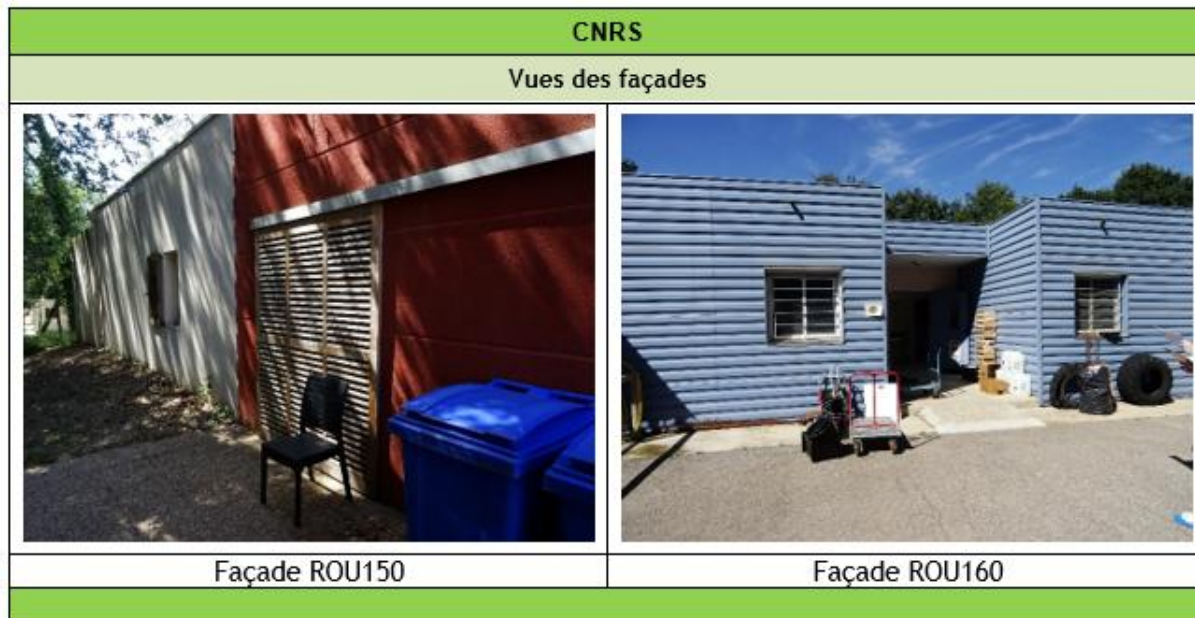
Les bâtiments faisant l'objet du projet de construction sont récapitulés ci-dessous. Seuls les bâtiments de la tranche ferme ont été pris en compte dans cette étude.

Tableau 7 : Bâtiments concernés par le projet de rénovation

Bâtiment	Découpage	Surface intérieure (m² SdP)	Surface extérieure (m²)
Poste de garde	Tranche optionnelle	22	165
Tertiaire (administration)	Tranche ferme	958	1 235
Poste de livraison	Tranche ferme	22	0
Logistique	Tranche ferme	808	355
Biomédical (services)	Tranche optionnelle	315	15
Babouins (reproduction)	Tranche optionnelle	806	328
Marmousets	Tranche ferme	309	0
Macaques rhésus	Tranche ferme	672	264
Macaques cynomolgus 0 (communs)	Tranche ferme	322	0
Macaques cynomolgus 1 (reproduction)	Tranche ferme	640	288
Macaques cynomolgus 2 (reproduction)	Tranche ferme	640	288
Macaques cynomolgus 3 (reproduction)	Tranche optionnelle	640	288
Macaques cynomolgus 4 (reproduction)	Tranche optionnelle	640	288
Macaques cynomolgus 5 (post-sevrage)	Tranche ferme	640	288
Macaques cynomolgus 6 (post-sevrage)	Tranche optionnelle	640	288
Total		8 075	4 090

5 Etat des lieux des bâtiments existants

5.1 Vues extérieures des bâtiments



5.2 Plans des bâtiments



Figure 19 : Plan de masse du site

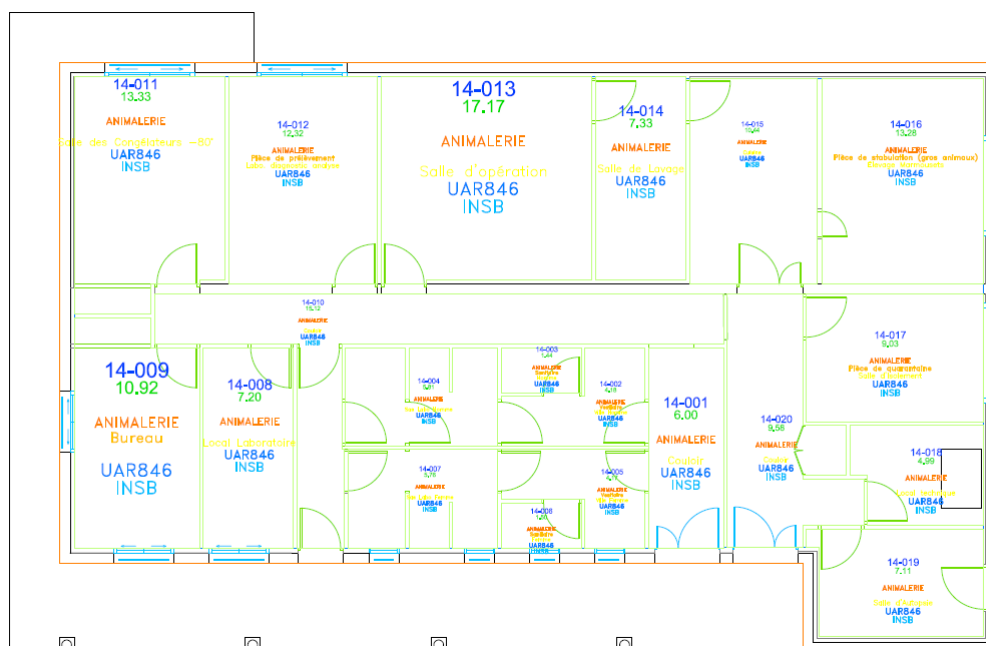


Figure 20 : Plan actuel du bâtiment ROU140

Le bâtiment ROU140 va faire l'objet d'une importante rénovation. Ses caractéristiques actuelles seront donc modifiées et l'étude portera sur l'état projeté uniquement.

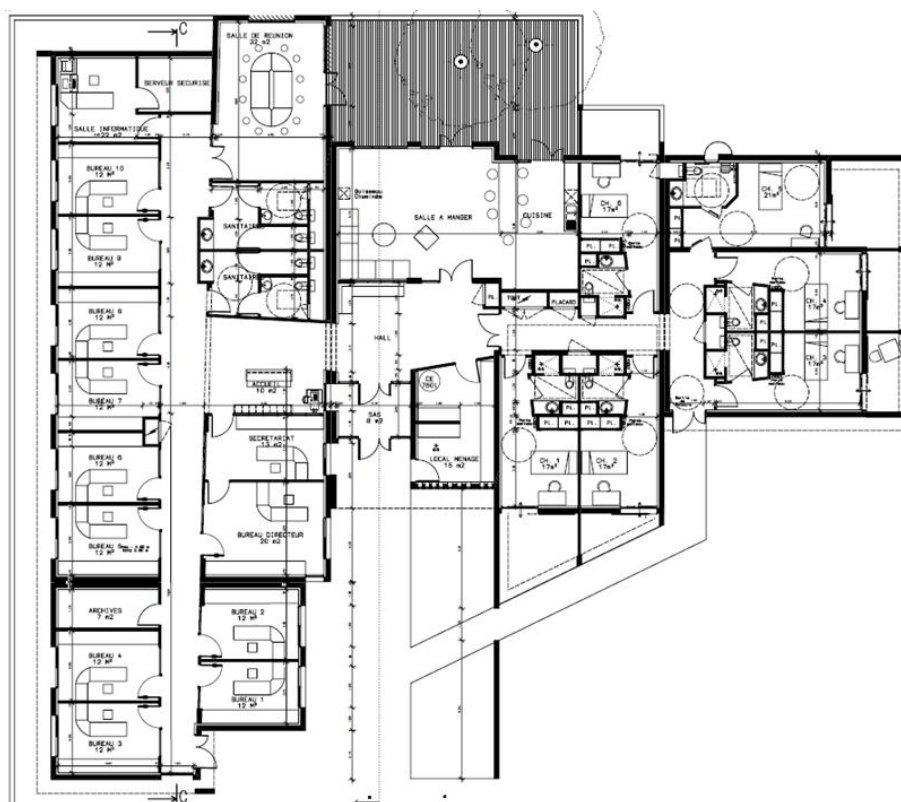


Figure 21 : Plan du bâtiment ROU150

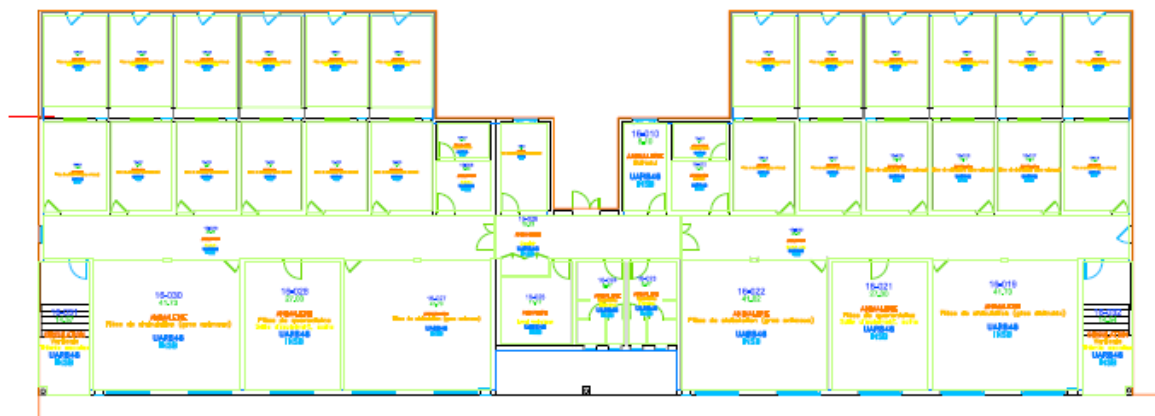
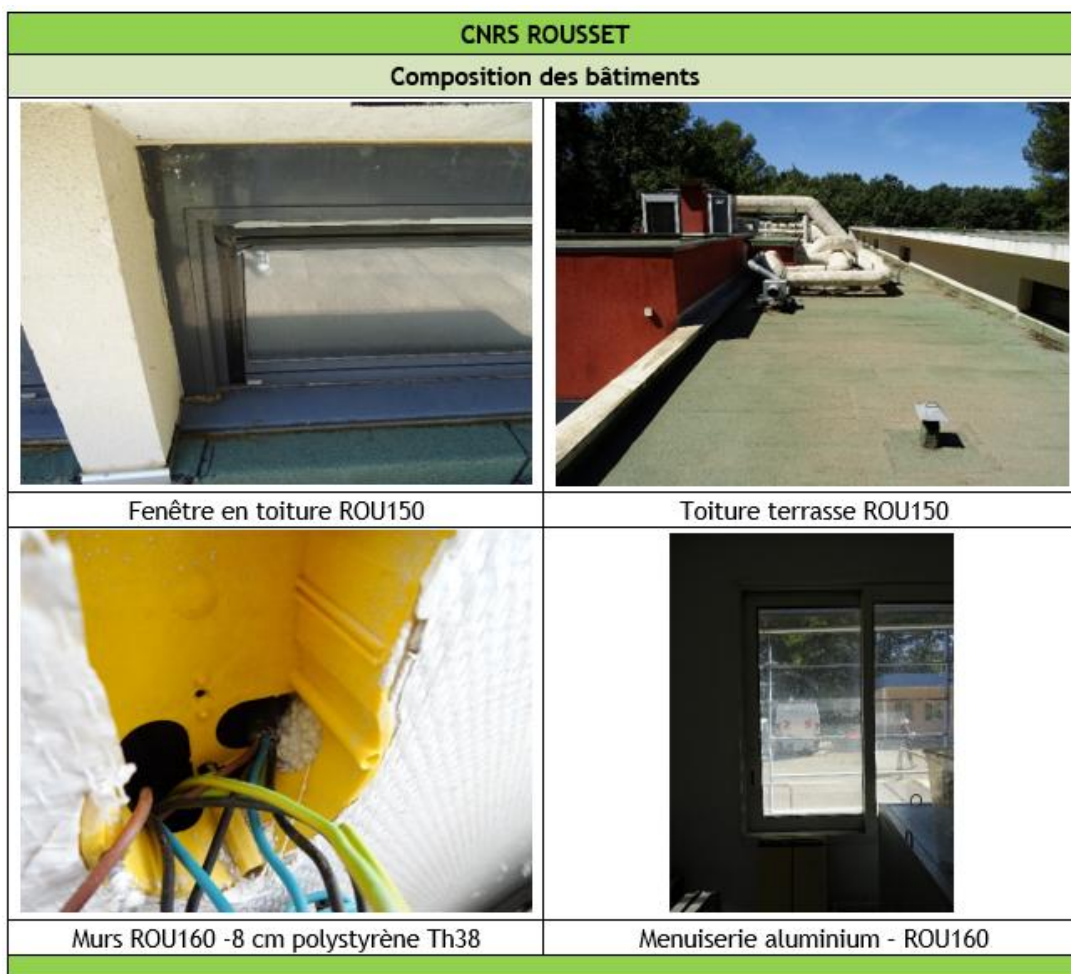



Figure 22 : Plan du bâtiment ROU160

5.3 Le bati

5.3.1 Reportage photographique



5.3.2 Détail des parois

DESCRIPTIF BATI							
Désignation de la paroi		Nature / composition	Surface thermique (m²)	Déperditions thermiques (W/m².K)	Vétusté	Performance	U maxi CEE (W/m².K)
menuiseries	menuiserie	porte entrée vitrée Aluminium 4/16/4	8	1,80	Satisfaisant	Satisfaisant	1,30
	menuiserie	fenêtre aluminium 4 /16 /4 faible emissivité	17	1,70	Satisfaisant	Satisfaisant	1,30
	menuiserie	fenêtre aluminium 4 /16 /4	24	2,40	Satisfaisant	Peu satisfaisant	1,30
	menuiserie	fenêtre aluminium 4 /18 /6 faible emissivité	21	1,70	Satisfaisant	Satisfaisant	1,30
	menuiserie	fenêtre aluminium 4 /20 /4 faible emissivité	34	1,70	Satisfaisant	Satisfaisant	1,30
	menuiserie	pavé de verre	1	3,00	Satisfaisant	Peu satisfaisant	1,30
murs	mur extérieur	agglo béton creux isolé par 10cm de laine de verre GR32	522	0,29	Satisfaisant	Satisfaisant	0,26
pl. haut	toiture terrasse	béton isolé par 10cm d'effigreen duo	648	0,21	Satisfaisant	Satisfaisant	0,21
plancher bas	plancher sur terre plein	dalle béton	648	U = 3,33 Ue = 0,84	Satisfaisant	Peu satisfaisant	0,00
Déperdition thermique totale du bâtiment				Ubat= (W/m².K)	0,61		
		Commentaires: Le bâtiment ROU150 est récent, en bon état et correctement isolé.					
Etat thermique du bâtiment		Satisfaisant					

5.4 Chauffage / refroidissement

5.4.1 Reportage photographique

CNRS ROUSSET	
Chauffage / refroidissement	
	
Unités extérieures ROU140	Pompe à chaleur + CTA ROU150
	
Chaufferie ROU160	Unité intérieure ROU140
	
Ventilo-convecteur ROU150	Aérothermes (eau chaude + électrique) ROU160

Une chaufferie gaz propane dessert alimente le bâtiment ROU160. Le schéma de principe est visible ci-dessous.

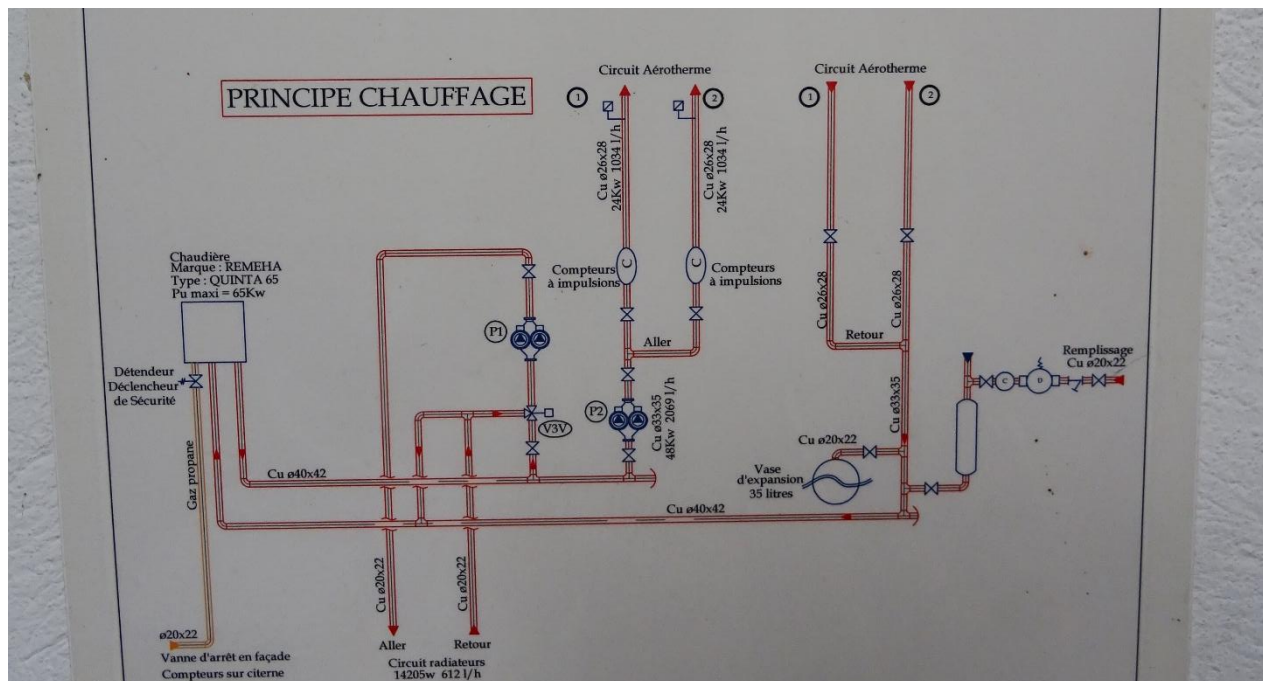




Figure 23 : Schéma de principe de la chaufferie ROU160

5.4.2 Production



PRODUCTION DE CHALEUR							
chaufferie	Modèle chaudière / bruleur	Année	type	Nbre	Puissance (kW)	Vétusté	Performance
ROU 160	CHAPPEE	NC	condensation	1	60	Satisfaisant	Peu satisfaisant
	INITIA+	NC	modulant				
Puissance totale installée			P (kW)		60		
				<div><div><u>Commentaires:</u> La chaudière à condensation fonctionne au propane, cependant elle alimente des aérothermes et des radiateurs. La température de retour est donc probablement supérieure à 45°C et ne permet probablement pas de faire condenser la vapeur d'eau des fumées.</div><div><u>Rendements estimés:</u> - CHAUDIERE : 93%</div></div>			
Performance Générale des producteurs			Peu satisfaisant				

Le bâtiment ROU160 est uniquement chauffé. Il ne dispose pas de système de refroidissement.


Les bâtiments ROU140 et ROU150 sont équipés de systèmes réversibles.

CHAUFFAGE / REFROIDISSEMENT - PRODUCTION							
Zone desservie	Modèle / type	Année	Réfrigérant Type / charge	Nbre	Puissance CH/FR (kW)	Etat	Performance
ROU 150	GROUPE D'EAU GLACEE	2011	R410a	1	30 / 39	Satisfaisant	Satisfaisant
	AQUACIAT2 150V ILDH		10,5 kg				
Local info ROU 150	Split MITSUBISHI	2010	R410a	1	3,2 / 2,5	Peu satisfaisant	Peu satisfaisant
	MUZ-FD25VABH		1,15 kg				
ROU 140	Détente directe (splits)	NC	R410a / R32	7	50 / 35 environ	Peu satisfaisant	Peu satisfaisant
	Nombreuses unités		-				
Puissance totale installée			,			83 kWc	Environ
				<p><u>Commentaires:</u> La production de chauffage et refroidissement est assurée une pompe à chaleur Air/Eau sur le bâtiment ROU 150 et par des unités à détente directe sur le bâtiment ROU 140.</p> <p>Performance moyenne des systèmes SCOP = 4,40 SEER = 3,80</p>			
Performance générale des producteurs			Satisfaisant				

5.4.3 Distribution

CHAUFFAGE - DISTRIBUTION							
Zone desservie		Equipement	Débit/ Régul	Puissance élec (W)	Calorifuge	Etat	Performance
ROU 160	Départ aérothermes	Pompe double SALMSON DCX50-50	Constant	340	Correct	Satisfaisant	Satisfaisant
		Sans objet	T° constante				
	Départ radiateurs	2 Pompes WILO	Variable	75	Correct	Satisfaisant	Satisfaisant
		Vanne 3 voies	T° extérieure				
				<p><u>Commentaires:</u> La distribution est réalisée en bitube.</p> <p>Le réseau radiateurs est régulé en fonction de la température extérieure.</p> <p>Les calorifuges sont corrects, mais les points singuliers (vannes, coudes, pompes, etc.) pourraient être calorifugés pour améliorer la performance de l'installation.</p>			
Performance Générale		Satisfaisant					

5.4.4 Emission

EMISSION CHAUFFAGE / REFROIDISSEMENT					
Bâtiment	Zone desservie	Emetteur	Régulation	Vétusté	Performance
ROU 140	Ensemble	Unités intérieures à détente directe	Thermostat	Peu satisfaisant	Peu satisfaisant
ROU 150	Bureaux / chambres	Ventilo-convecteurs avec batterie à eau chaude et eau glacée	Thermostat	Satisfaisant	Satisfaisant
	Salles de bain	Sèche-serviettes à eau chaude	Robinet	Satisfaisant	Satisfaisant
	Salle de réunion	Air soufflé par CTA	Température de soufflage	Satisfaisant	Satisfaisant
ROU 160	Ensemble	Bureaux : Radiateurs anciens sans robinet thermostatique	Sans objet	Peu satisfaisant	Peu satisfaisant
		Animaleries : Aérothermes à eau chaude et aérothermes électriques (appoint)	Thermostat	Peu satisfaisant	Peu satisfaisant
<div><div></div><div><p><u>Commentaires:</u></p><p>Les émetteurs et la régulation des bâtiments ROU140 et ROU160 sont peu satisfaisants.</p><p>Le bâtiment ROU150 étant plus récent, les équipements sont en meilleur état et la régulation est mieux pilotée, ce qui permet d'améliorer la performance énergétique.</p></div></div>					
Performance générale émission		Peu satisfaisant			

5.5 Eau chaude sanitaire


L'Eau Chaude Sanitaire est produite par des cumulus électriques de manière décentralisée sur les bâtiments ROU140 et ROU160. Le bâtiment ROU150 a des besoins plus importants car il comprend des logements pour les chercheurs, mais il est muni d'un système d'ECS solaire thermique qui couvre une grande partie des besoins.

Il semble donc que les besoins d'ECS soient trop faibles et ponctuels pour qu'il y ait un intérêt à raccorder les systèmes de production d'ECS à la géothermie.


L'ECS n'entre donc pas dans le périmètre de cette étude.

5.6 Ventilation


CNRS ROUSSET	
Ventilation	
	
Extracteur ROU140 (hors service)	CTA ROU150
	
Extracteur ROU150	Extracteur ROU150
	
Extracteur ROU160	Extracteur ROU160 (hors service)

VENTILATION									
Bâtiment	Type de Ventilation	Modèle	Nombre	Durée de fonctionmt	Puissance unitaire (W)	Débit unitaire (m3/h)	Vétusté	Performance	Qualité d'air
ROU140	Extraction	ESPACE CT 16/4	1	Permanent	245	820	Arrêté	Mauvais	Mauvais
ROU150	Extraction	CALADAIR	1	Permanent	260	1 040	Peu satisfaisant	Peu satisfaisant	Satisfaisant
	Extraction	CALADAIR MINIMAX 125 PHONIC	1	Permanent	58	232	Satisfaisant	Peu satisfaisant	Satisfaisant
	Extraction	CALADAIR MINIMAX 200	1	Permanent	260	1 040	Satisfaisant	Peu satisfaisant	Satisfaisant
	Extraction	CALADAIR MINIMAX 200	1	Permanent	245	980	Satisfaisant	Peu satisfaisant	Satisfaisant
ROU160	Extraction	ALDES VEKITA +300	1	Permanent	55	275	Satisfaisant	Peu satisfaisant	Satisfaisant
	Extraction	ESPACE CT 16/4	1	Permanent	52	208	Arrêté	Mauvais	Mauvais
Puissance installée:					1,2 kW				
<div><div></div><div><p><u>Commentaires:</u> La ventilation se fait majoritairement en simple flux par extraction.</p><p>Les équipements sont en état correct à l'exception des deux extracteurs de marque ESPACE VENTILATION qui sont dégradés et à l'arrêt.</p><p>Seul le bâtiment ROU150 dispose d'un système de ventilation double flux pour traiter l'air neuf des bureaux et salles de réunion (décrit ci-après).</p></div></div>									
Performance générale des VMC					Peu satisfaisant				
Qualité de l'air des bâtiments					Peu satisfaisant				

NOTA : les valeurs notées en noir sont les valeurs qui ont été relevées sur les équipements, tandis que celles notées en rouge ont été estimées.

CTA									
Zone desservie	Localisation	Equipement	Année	Type	Débit d'air (m3/h)	Type de régulation		Vestusté	Perf
Bureaux ROU150	Toiture	CTA CLIMACIAT Airtech 50	2010	DF récup échangeur à plaques	3 600	Programmation horaire	Sans variation du débit d'air neuf	S	S
<div>  <p><u>Commentaires:</u> L'air neuf des bureaux et salles de réunion du bâtiment ROU150 est traité par une CTA double flux avec récupération de chaleur d'efficacité 60%. La CTA est équipée de batteries à eau chaude et à eau glacée pour le prétraitement de l'air. Ces batteries sont alimentées par la pompe à chaleur Air/Eau située en toiture. Bien qu'en fin de vie (15 ans), la CTA est en bon état et semble pouvoir être conservée encore quelques années avant son remplacement par un équipement plus performant, notamment en termes d'efficacité de l'échangeur de chaleur.</p> </div>									
Performance générale des CTA					Satisfaisante				

5.7 Eclairage

ECLAIRAGE						
Locaux concernés	Type de commande	Détection de présence	Program-mation horaire	Eclairage zonal	Type de luminaire	Performance
					Type	
ROU140	Interrupteur	non	non	non	Majoritairement tubes fluos T8	Peu satisfaisant
ROU150	Interrupteur	partielle	oui	non	Majoritairement tubes fluos T5	Peu satisfaisant
ROU160	Interrupteur	non	non	non	Majoritairement tubes fluos T8	Peu satisfaisant
Puissance installée en W / m²Su :						12,0 W/m²
					<u>Commentaires</u> L'éclairage est géré par interrupteur dans la majorité des locaux.	
Performance générale Eclairage				Peu satisfaisant		

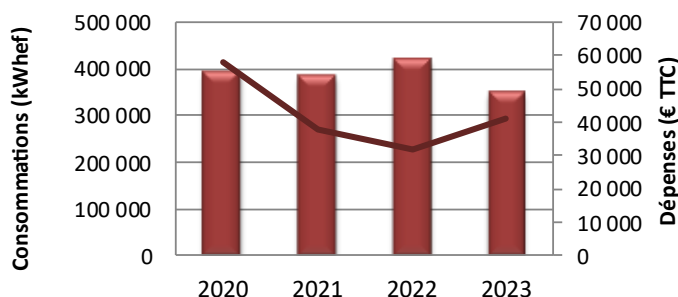
6 Analyse énergétique de l'état existant

6.1 Electricité

6.1.1 Consommations électriques actuelles

Le compteur électrique principal dessert l'intégralité du site de Rousset et il n'existe aucun sous-comptage. Il sera impossible d'évaluer précisément les consommations électriques des bâtiments étudiés. Cette étude portant sur les besoins thermiques des bâtiments, l'analyse des consommations électriques a pour but d'évaluer les besoins de chauffage et refroidissement du bâtiment ROU150. Ce bâtiment est chauffé et refroidi par des systèmes électriques et il représente la majeure partie des consommations électriques du site.

Evolution des consommations totales d'électricité



Compteur principal	2020	2021	2022	2023	Moyenne
Consommation en kWh EF	394 778	384 533	419 176	348 787	342 640
Evolution	-	-3%	+9%	-17%	-
€ TTC / MWhé	146,4	98,3	75,5	118,2	139,1
Evolution	-	-33%	-23%	+57%	-
Indicateur kWh EF / DJU	242	209	261	209	205
Evolution	-	-14%	+25%	-20%	-

Les consommations électriques sont stables entre 2020 et 2023 sur l'ensemble du site.

6.1.2 Consommations électriques détaillées

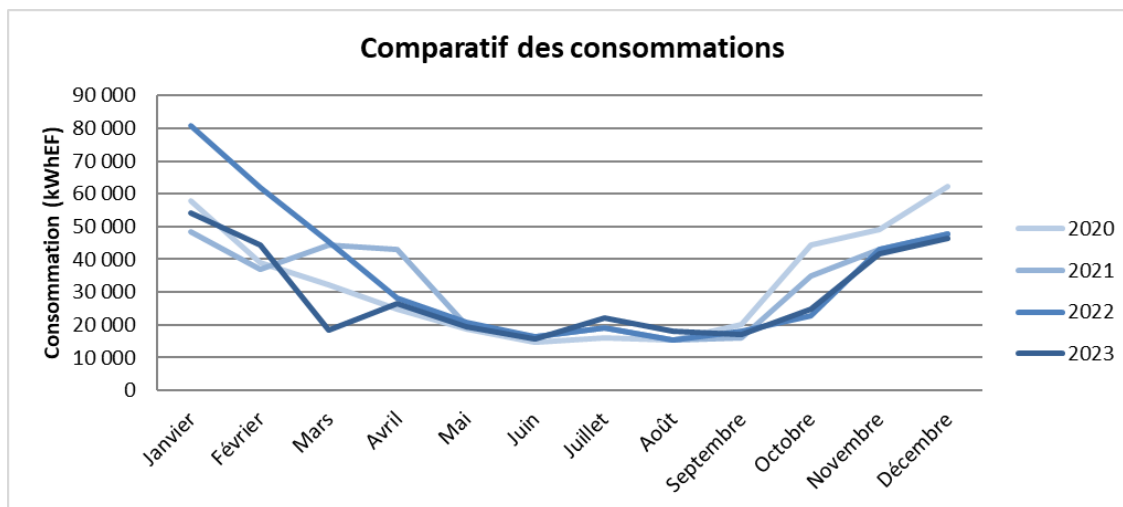


Figure 24 : Consommations électriques mensuelles

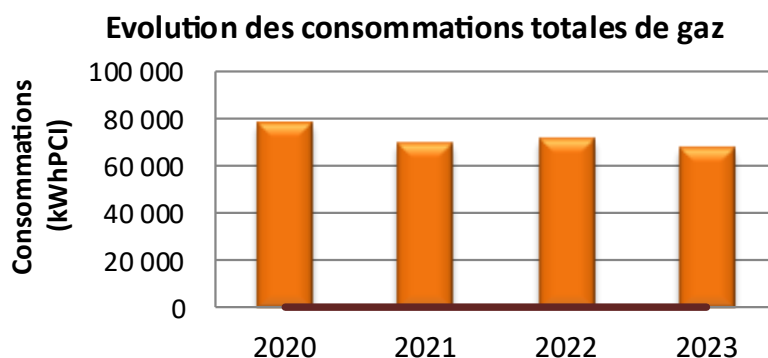
L'analyse des consommations mensuelles permet d'identifier une surconsommation en période chaude d'environ 100 MWh sur l'ensemble du site. Nous estimons à 30% la part de cette surconsommation due au bâtiment ROU150 étant données les caractéristiques des équipements présents sur le site.

La consommation électrique pour le chauffage du bâtiment ROU150 est donc estimée à 30 MWh par an en comprenant les auxiliaires de production, distribution et émission de chauffage. La consommation de production de chaleur est estimée à 19 MWh_u.

La production de chaleur étant réalisée par une pompe à chaleur de COP moyen 2,50 sur le bâtiment ROU150, les besoins de chaleur du ROU150 sont estimés à 47 MWh_u.

6.2 Propane

Le bâtiment ROU160 est chauffé par une chaudière au propane alimentée par une cuve située en face du bâtiment. Les livraisons de propane de cette cuve ont été analysées et permettent de connaître la consommation de ce bâtiment.



PROPANE	2020	2021	2022	2023	Moyenne
Consommation en kWh PCI	77 830	69 268	70 929	67 095	64 770
Evolution	-	-11%	+2%	-5%	-
Indicateur kWh PCI / DJU	45	46	53	48	40
Evolution	-	+4%	+15%	-11%	-

Les consommations de gaz sont stables entre 2020 et 2023. La consommation moyenne est de 65 MWh_{PCI} par an sur cette période, soit 59 MWh_u en considérant un rendement de la chaudière de 90%.

La part de besoins réalisée par appoint électrique (aérothermes électriques en appoint des aérothermes à eau chaude) est estimée à 15%.

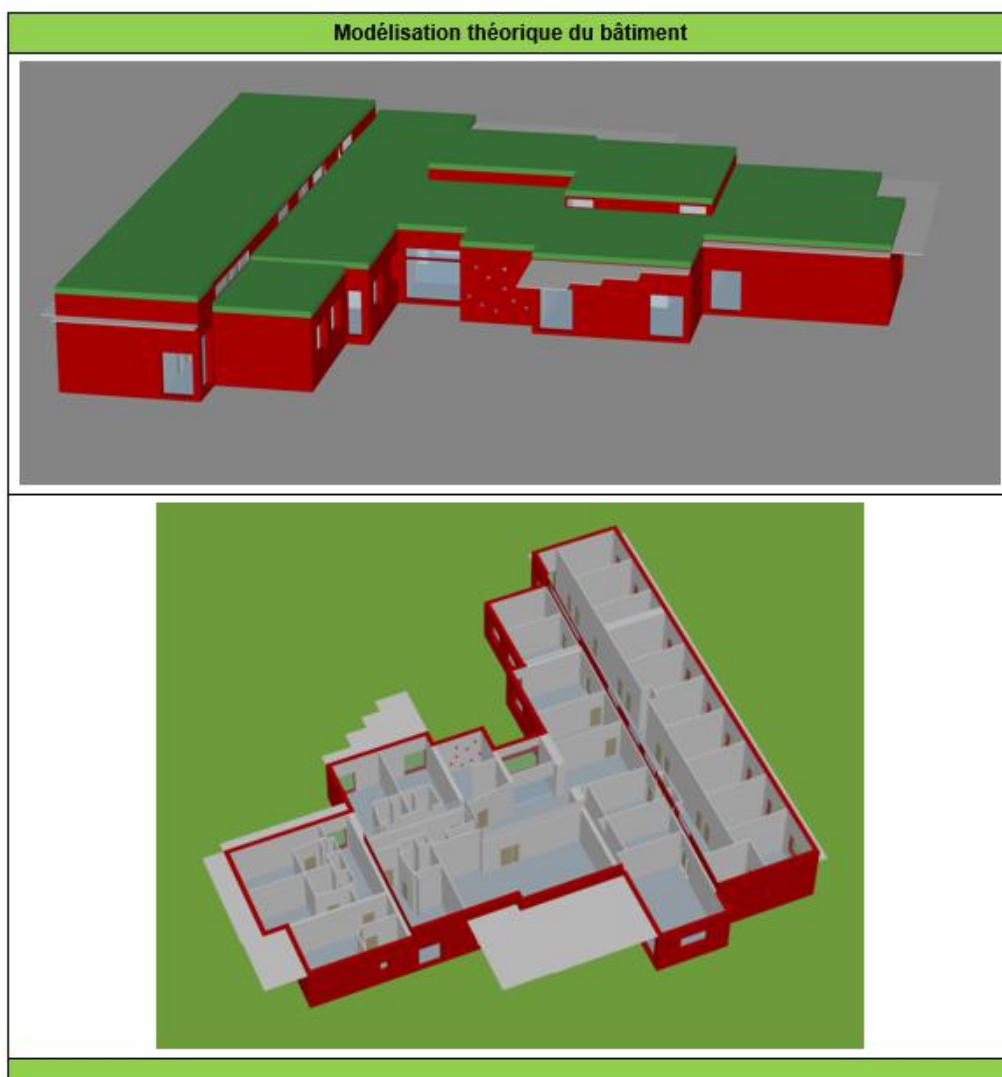
Les besoins de chaleur du bâtiment ROU160 sont donc estimés à 67 MWh_u, soit 112 kWh_u/m².

6.3 Modélisation théorique et recollement

La modélisation théorique des bâtiments a été réalisée à l'aide du logiciel PLEIADES.

Le logiciel prend en compte les éléments suivants :

- Architecture des bâtiments
- Composition des parois
- Caractéristiques des équipements de production, régulation, distribution et émission de chauffage
- Caractéristiques des équipements de ventilation
- Caractéristiques des équipements d'éclairage
- Apports internes et externes du bâtiment



7 Projet de rénovation

7.1 Description du projet

Le projet de rénovation énergétique de l'ensemble de bâtiments comprend plusieurs modifications par rapport à l'état actuel des bâtiments :

- Réhabilitation et extension du bâtiment ROU140
- Construction des bâtiments suivants :

	Surface (m ²)	Volume (m3)
Administration	958	2490,8
Hébergement marmousets	309	803,4
Hébergement M.Rhesus	672	2016
Hébergement M.Cyno MC0	322	966
Hébergement M.Cyno MC1	640	1920
Hébergement M.Cyno MC2	640	1920
Hébergement M.Cyno MC3	640	1920
Hébergement M.Cyno MC4	640	1920
Hébergement M.Cyno MC5	640	1920
Hébergement M.Cyno MC6	640	1920
Logistique	808	2100,8

Les futurs bâtiments faisant l'objet d'un concours de maîtrise d'œuvre, les plans ne sont pas encore disponibles. Des estimations de déperditions thermiques par bâtiment ont été fournies par le CNRS et permettent d'évaluer les besoins de chaleur.

Une répartition horaire de ces besoins de chaleur a été réalisée par calcul en se basant sur les déperditions thermiques, la température extérieure, la température intérieure et le rayonnement solaire (méthode similaire à celle utilisée pour l'analyse des besoins des réseaux de chaleur dans le cadre des titre V contenu CO2 d'un réseau de chaleur).

Les données météorologiques utilisées sont les données horaires METEONORM de la station de Salon de Provence (13).

7.2 Appels de puissance

7.3 Hypothèses de calcul des bâtiments neufs

Les conditions intérieures des bâtiments ont été fournies par le CNRS dans son programme fonctionnel. Elles apparaissent ci-dessous :

Températures ambiantes pour les primates :

Marmousets : 26°C +/- 2°C sans contrainte d'amplitude journalière tant que les températures restent dans la plage indiquée.

Autres : 22°C +/- 2°C sans contrainte d'amplitude journalière tant que les températures restent dans la plage indiquée.

Les déperditions thermiques des bâtiments projetés ont été fournies par le CNRS, elles apparaissent ci-dessous :

	Surface (m ²)	Volume (m ³)	G (W/m ³ .°C)	Puissance (W/°C)	Tbase (°C)	Tconsigne (°C)	Puissance chauffage (kW)
Administration	958	2490,8	0,35	871,78	-5	19	20,92
Hébergement marmousets	309	803,4	0,35	281,19	-5	24	8,15
Hebergement M.Rhesus	672	2016	0,45	907,2	-5	22	24,49
Hebergement M.Cyno MC0	322	966	0,45	434,7	-5	22	11,74
Hebergement M.Cyno MC1	640	1920	0,45	864	-5	22	23,33
Hebergement M.Cyno MC2	640	1920	0,45	864	-5	22	23,33
Hebergement M.Cyno MC3	640	1920	0,45	864	-5	22	23,33
Hebergement M.Cyno MC4	640	1920	0,45	864	-5	22	23,33
Hebergement M.Cyno MC5	640	1920	0,45	864	-5	22	23,33
Hebergement M.Cyno MC6	640	1920	0,45	864	-5	22	23,33
Logistique	808	2100,8	0,35	735,28	-5	19	17,65

Les appels de puissance thermique ont été calculés sur la base :

- Des déperditions ci-dessous mises en corrélation avec la température extérieure heure par heure ;
- Des apports internes estimés ;
- Des apports solaires estimés en fonctionnement du rayonnement solaire horaire ;
- Des consignes de température intérieure.

La méthode d'évaluation utilisée est similaire à celle validée par la commission de Titre V Contenu CO2 des réseaux de chaleur pour la réglementation thermique.

Les tableaux de calculs sont fournis en annexe de ce rapport.

7.3.1 Hypothèses de calcul des bâtiments existants

Les caractéristiques des bâtiments existants ont été relevées sur site et ces derniers ont fait l'objet d'une simulation thermique dynamique afin d'évaluer les appels de puissance horaire de chauffage et refroidissement.

7.3.2 Pertes de distribution du réseau

Les 2 scénarios d'implantation étant similaires, des longueurs de réseau d'eau chaude et d'eau glacée ont pu être évaluées avec les sections correspondant aux puissances appelées. Ce calcul permet d'évaluer des pertes de distribution.

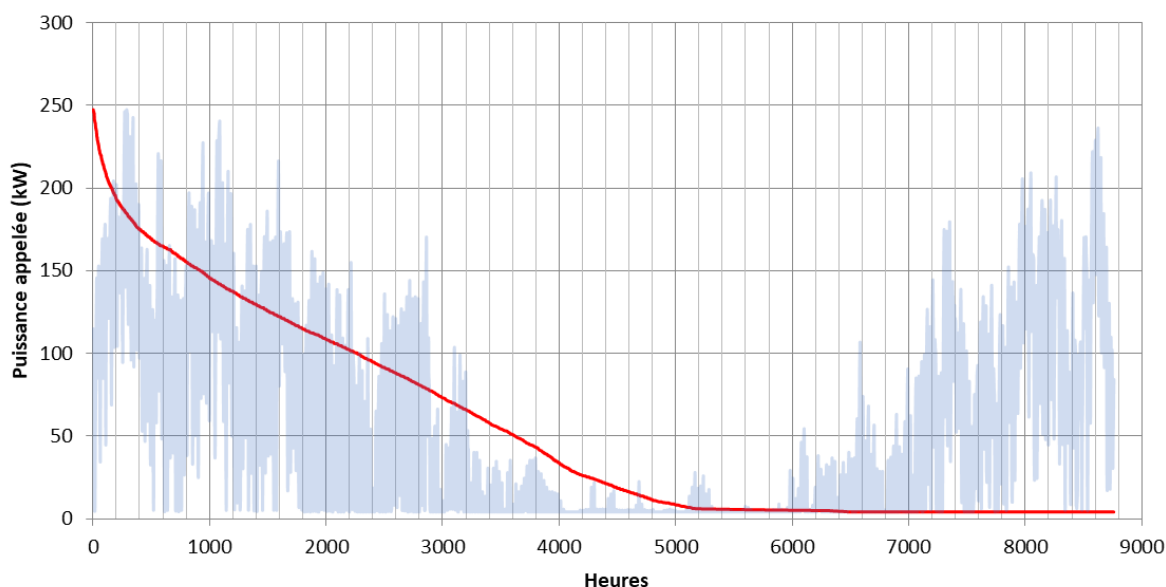
Branche de réseau	Puissance	Type	Diamètre	Débit	PdC	Longueur de tranchée	Perte de charges sur la longueur	Vitesse	Contenance	Débit	Diamètre intérieur	Déperditions
	KW		mm	kg/h	mmCE/ml	ml	mm CE	m/s	m3	m3/h	mm	W
Reseau principal CH	250	BT-BP	88,9 x 3,2	21 503	16,27	280	9 110	1,16	2,99	22,28	82,5	5312
Branches secondaires CH	30	BT-BP	42,4 x 2,6	2 580	16,04	375	12 029	0,68	0,82	2,67	37,2	4347
Reseau principal EG	150	HT-HP	88,9 x 3,2	25 803	24,28	375	18 214	1,39	4,01	26,73	82,5	2371
Branches secondaires EG	25	HT-HP	48,3 x 2,6	4 301	22,84	375	17 130	0,87	1,06	4,46	42,5	1652

7.3.3 Résultats

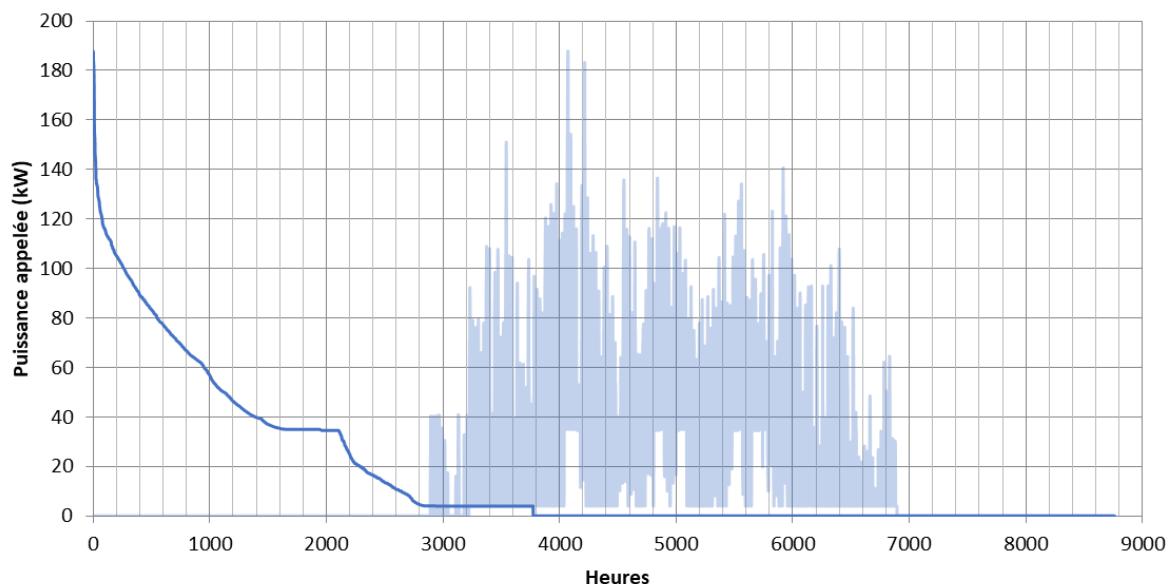
La modélisation de l'état futur des bâtiments nous donne les résultats suivants :

- Besoins de chaleur : 484 MWhu (57 kWhu/m²_{su}),
- Besoins de refroidissement : 146 MWhu, soit 17 kWhu/m²_{su}

Monotone des puissances appelées réseau d'eau chaude



Monotone des puissances appelées réseau d'eau glacée



La puissance maximale appelée en refroidissement est élevée en raison de la méthode de calcul qui ne tient pas compte de l'orientation des bâtiments existants. La puissance maximale réelle sera probablement plus faible que celle simulée ci-dessus.

8 Conclusion et synthèse de la STD

Les besoins des bâtiments en cours de projet sont estimés grossièrement pour le moment car il n'est pas encore possible de connaître leurs caractéristiques précises.

Cependant, les données fournies par le CNRS sont détaillées pour l'avancement du projet et ont permis de réaliser des calculs heure par heure qui permettront de dimensionner le champ de sonde et de réaliser l'étude de faisabilité géothermique. Cette dernière évaluera la pertinence de ce système sur le centre de primatologie de Rousset-Sur-Arc.

Tableau 8 : Rappel des besoins énergétiques du projet, par bâtiment

		Surface (m ²)	Besoins CH (MWh)	Besoins FR (MWh)	Besoins CH (kWh/m ²)	Besoins FR ((kWh/m ²))
Existants	Babouins ROU160	603	67 000	15 000	111	25
	Soins ROU140 (existant + extension)	396	19 800	12 672	50	32
	Administration ROU150	593	42 951	13 639	72	23
Neufs	Administration	958	38 241	4 645	40	5
	Poste de garde	22	878	107	40	5
	Hébergement Babouins	806	33 320	11 435	41	14
	Hébergement M.Rhesus	672	27 780	9 534	41	14
	Hébergement M.Cyno MC0	322	13 311	4 568	41	14
	Hébergement M.Cyno MC1	640	26 457	9 080	41	14
	Hébergement M.Cyno MC2	640	26 457	9 080	41	14
	Hébergement M.Cyno MC3	640	26 457	9 080	41	14
	Hébergement M.Cyno MC4	640	26 457	9 080	41	14
	Hébergement M.Cyno MC5	640	26 457	9 080	41	14
	Hébergement M.Cyno MC6	640	26 457	9 080	41	14
	Logistique	808	32 254	3 918	40	5
	Biomédical (soins)	315	37 284	2 806	118	9
	Pertes réseau		35 057	14 688		

9 Dimensionnement géothermique

Les besoins énergétiques du projet ont été définis sur la base d'une Simulation Thermique Dynamique réalisée par le bureau d'études ENERSIM. La synthèse des résultats est rappelée dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 9 : Rappel des puissances et besoins énergétiques de l'ensemble du projet

CNRS - Station de primatologie	Puissance maximale appelée	Besoins énergétiques
Chauffage	261 kW	506,6 MWh
Rafrachissement	189 kW	147,5 MWh

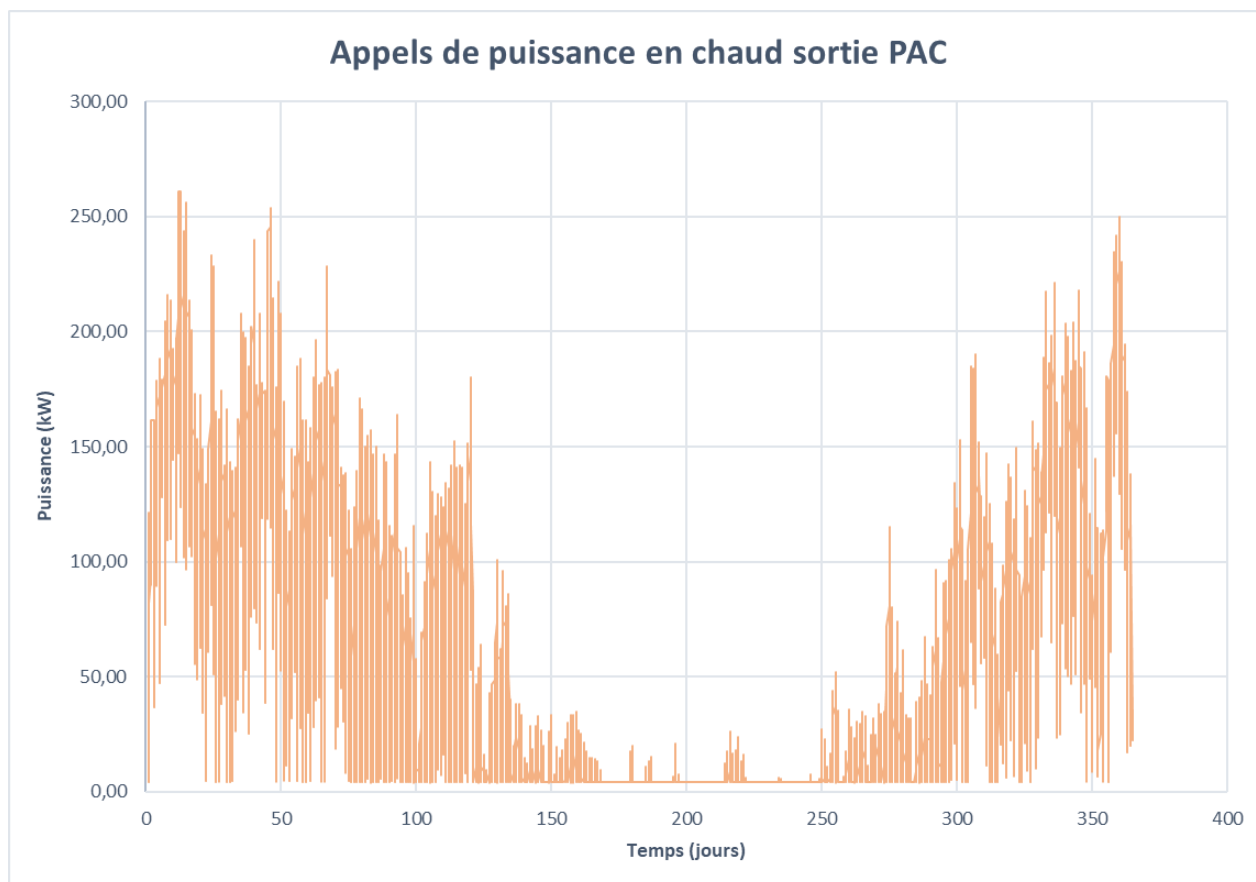


Figure 25 : Appel de puissance en chaud du bâtiment

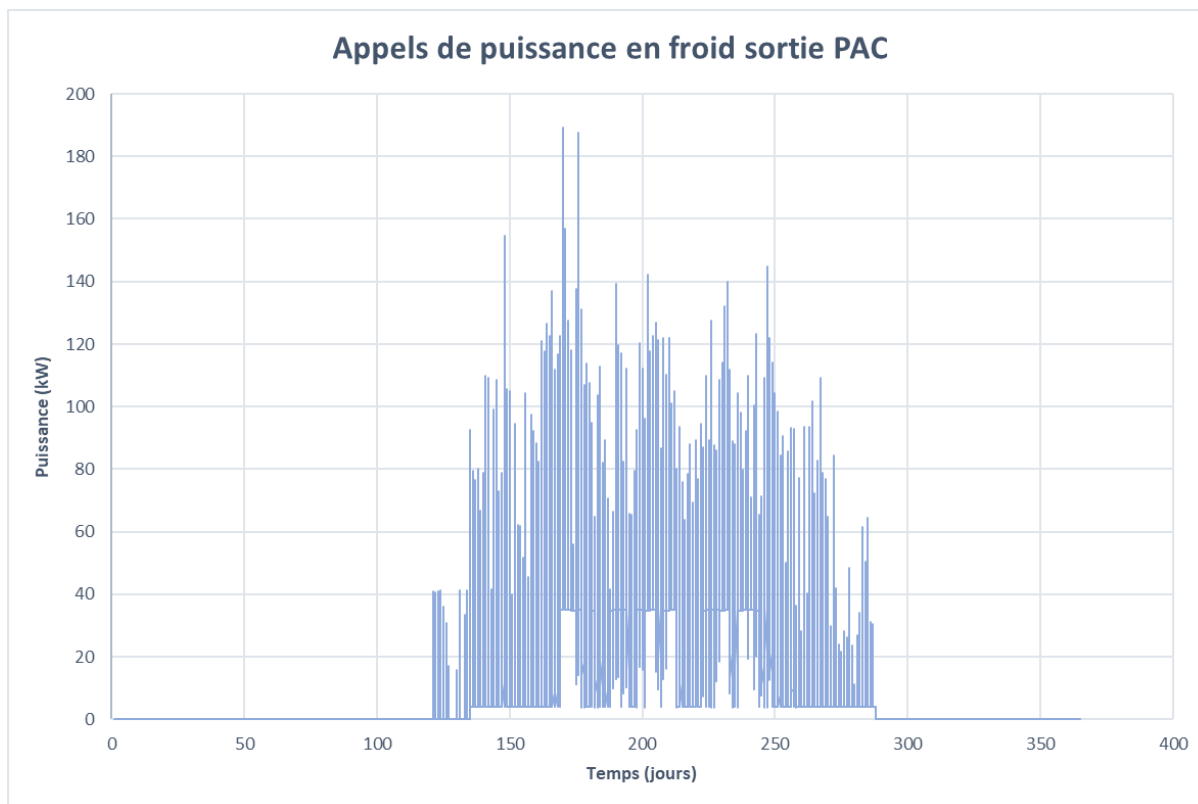


Figure 26 : Appels des puissances en froid du bâtiment

En représentant les appels de puissance heure par heure sous la forme d'une courbe monotone, on peut constater que les plus fortes puissances ne sont nécessaires que rarement dans l'année, tandis que les puissances plus faibles sont requises plus régulièrement. Ainsi, en limitant la puissance de la pompe à chaleur géothermique bien en dessous des pics de puissance, il est possible de répondre à la quasi-totalité des besoins annuels en chauffage et en refroidissement.

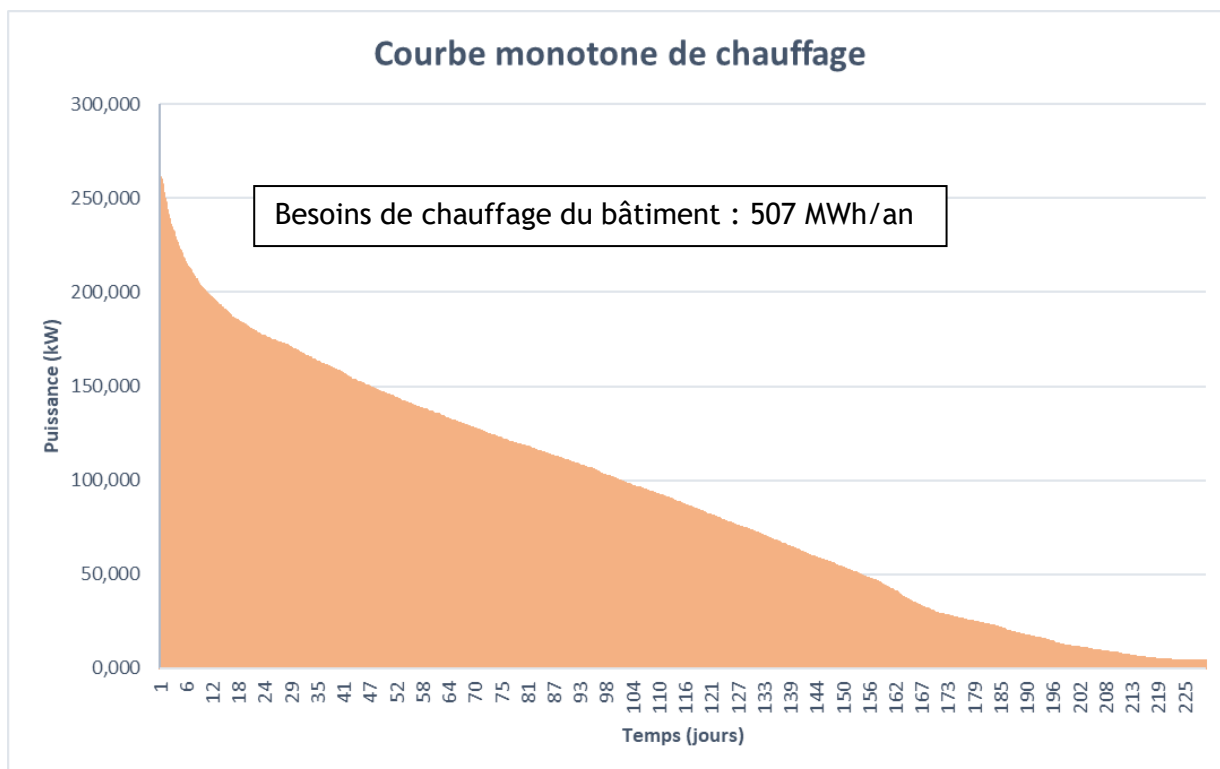


Figure 27 : Monotone des besoins de chauffage du bâtiment

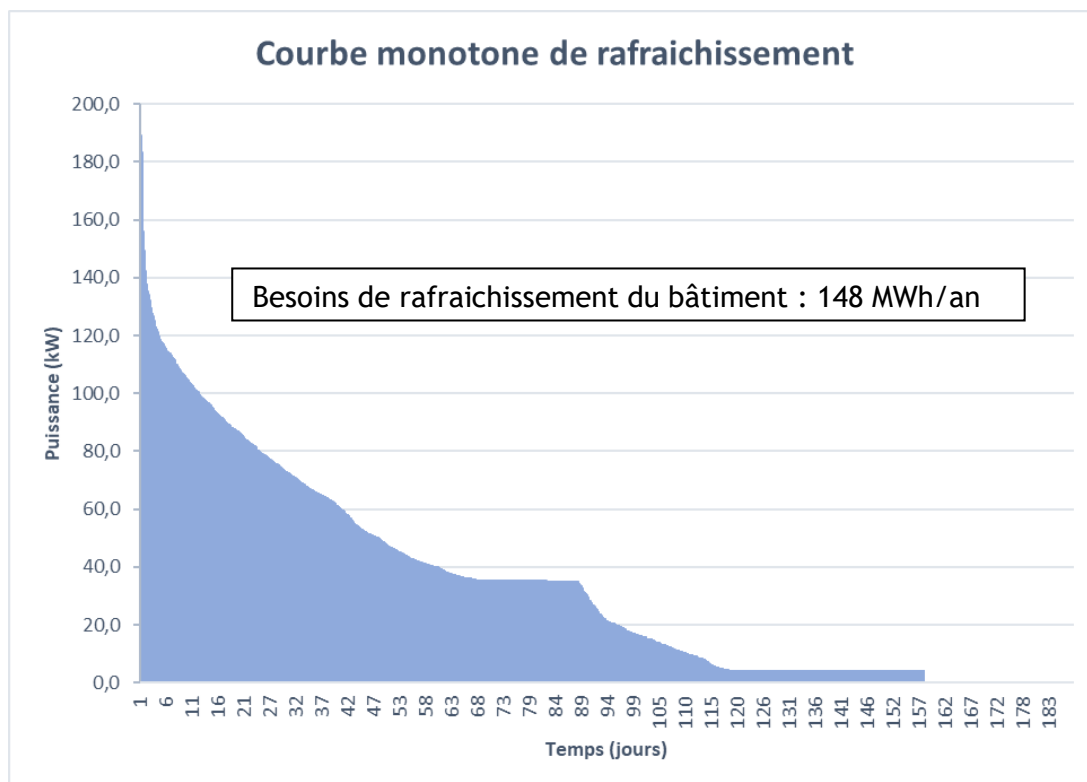


Figure 28 : Monotone des besoins de rafraîchissement du bâtiment

9.1 Détermination du taux de couverture géothermique

Pour déterminer un taux de couverture optimal de l'installation géothermique, l'utilisation d'une courbe gaussienne cumulée s'avère pertinente. La courbe gaussienne cumulée sera établie à partir des appels de puissance en mode chauffage et refroidissement pour déterminer quels sont les besoins dimensionnants sur le projet.

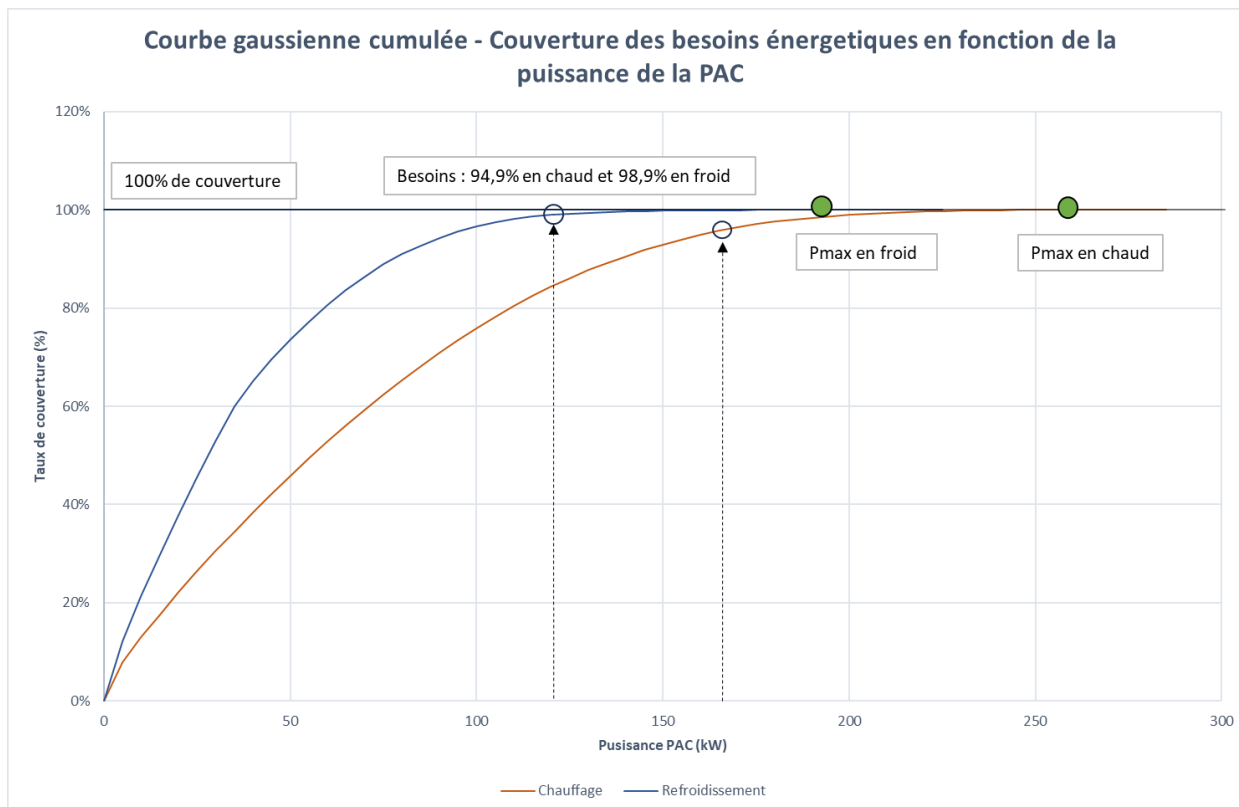


Figure 29 : Couverture énergétique de la PAC en fonction de sa puissance - Chauffage & refroidissement

Le bâtiment peut nécessiter une puissance maximale de 261 kW en mode chauffage, cependant en couvrant seulement 61% de cette puissance instantanée (soit 160 kW), il est possible de satisfaire 95% des besoins de chauffage annuels du CNRS Rousset.

Le bâtiment peut nécessiter une puissance maximale de 189 kW en mode refroidissement, cependant en couvrant seulement 63.5% de cette puissance instantanée (soit environ 120 kW), il est possible de satisfaire 98.9% des besoins de rafraîchissement annuels du CNRS Rousset.

9.2 Courbes monotones des besoins en géothermie

Une fois les puissances maximales de la PAC en chaud et en froid connues, il est possible de tracer les monotones de chauffage et de refroidissement avec les appels de puissances couverts en géothermie.

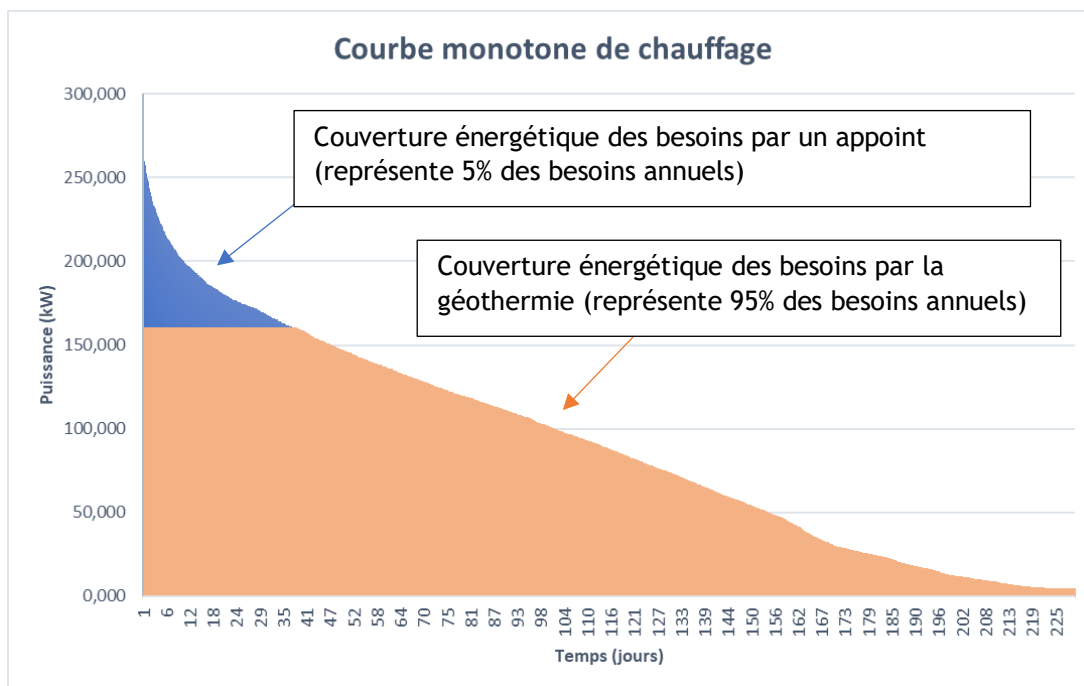


Figure 30 : Courbe monotone de chauffage optimisée

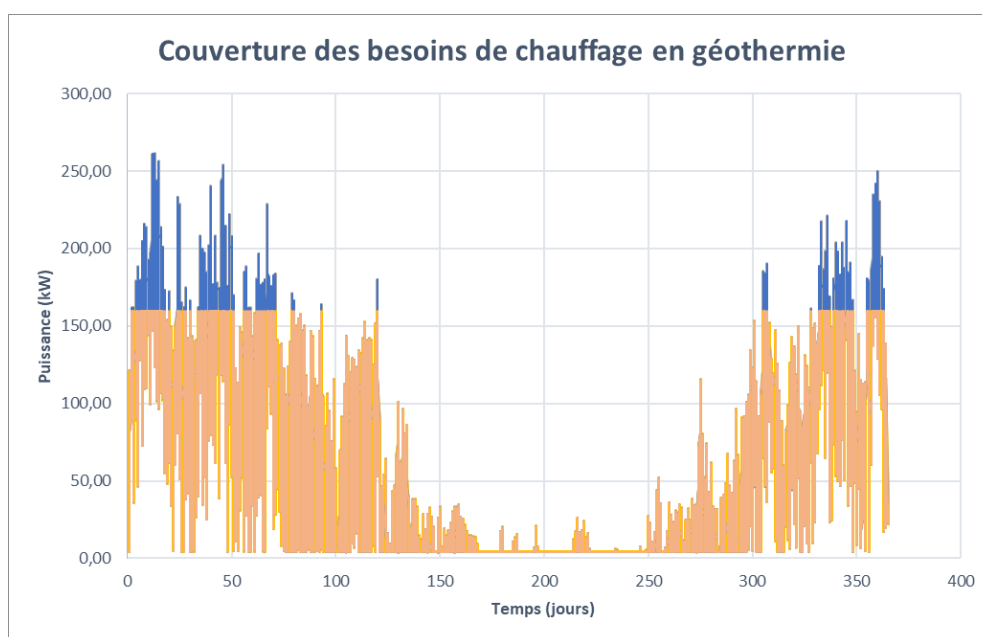


Figure 31 : Couverture des besoins énergétiques de chaud en géothermie

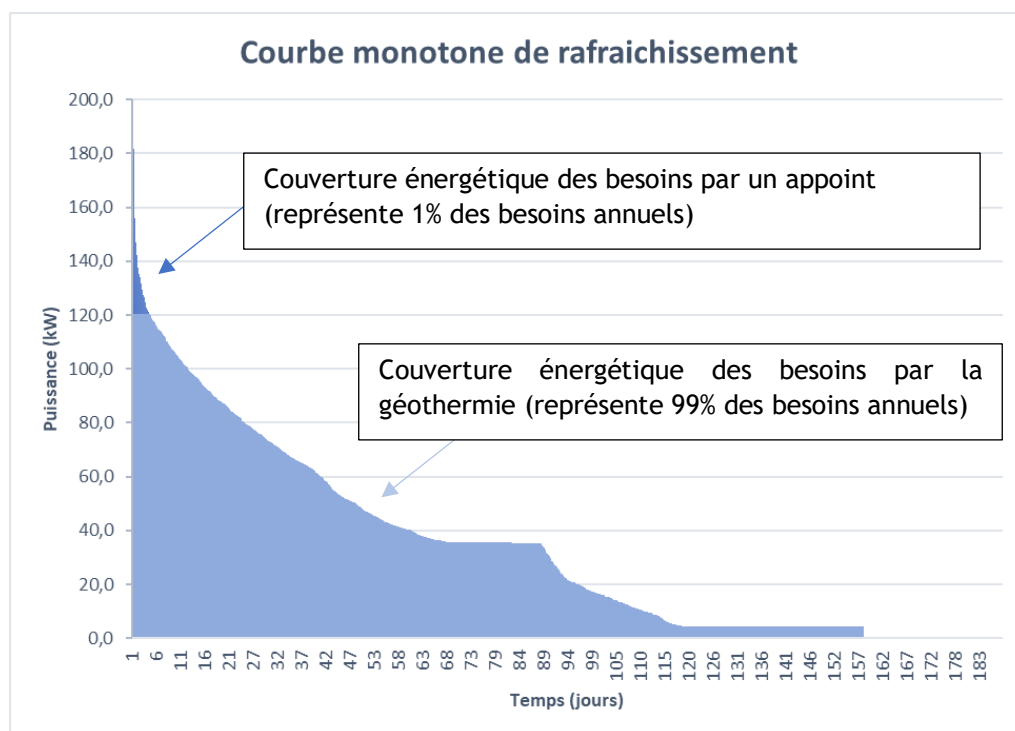


Figure 33 : Monotone de refroidissement optimisé

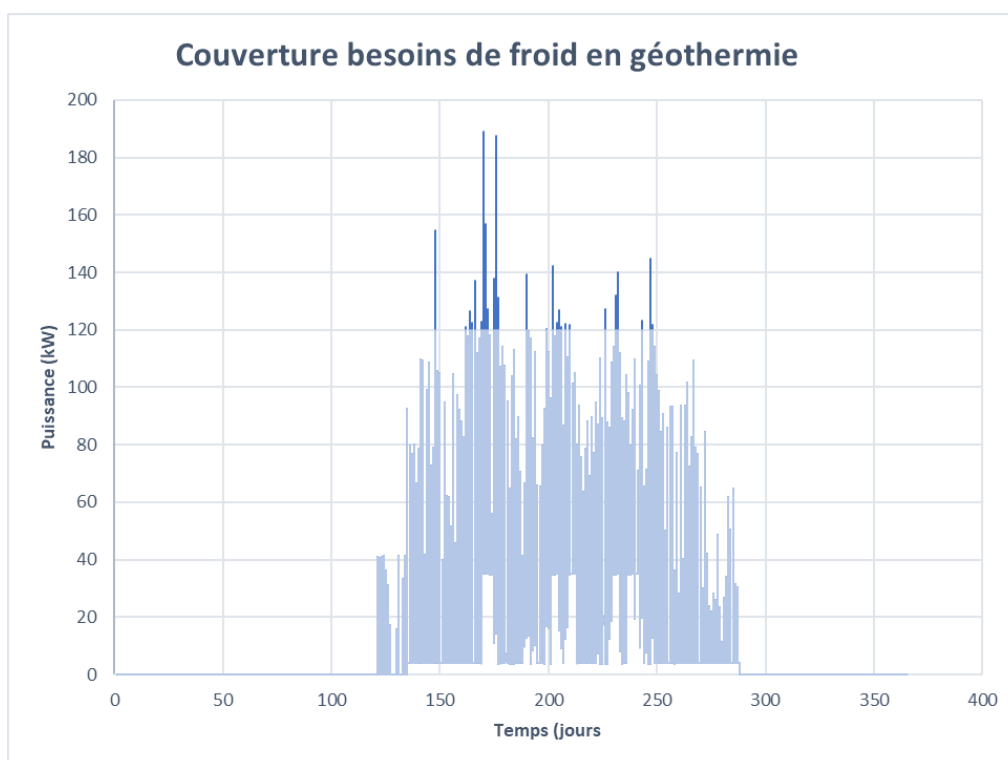


Figure 32 : Couverture des besoins énergétiques de froid en géothermie

9.3 Taux de charge/décharge du sous-sol

Dans un premier temps, il est possible de calculer le COP en temps réel si les paramètres suivants sont connus :

- Performance moyenne de la PAC géothermique pressentie ;
- Température à l'évaporateur ;
- Température au condenseur (chauffage) ;
- Pincement chaud ;
- Pincement froid ;
- Appel de puissance horaire du bâtiment.

Selon les informations fournies par différents fabricants de pompes à chaleur géothermiques, la formule suivante a été utilisée pour déterminer le SCOP en fonction de la température en entrée évaporateur :

$$COP_{45^{\circ}C} = 0.1128 * \text{température}_{\text{entrée évap}} + 3.6896$$

$$EER_{7^{\circ}C} = -0.0968 * \text{température}_{\text{entrée évap}} + 7.3234$$

$$\text{Puissance } PAC_{45^{\circ}C} = \text{Constante}$$

$$\text{Puissance } PAC_{7^{\circ}C} = \text{Constante}$$

Il est pris ici comme hypothèse une température moyenne de production au condenseur de 45 °C pour le chauffage, et une température de 7 °C pour la production de refroidissement. Ces températures pourront être revues en fonction de la loi d'eau prévue pour le projet.

La production de froid est réalisée par la PAC eau/eau et est distribuée dans les ventilo-convecteurs.

Ci-dessous le COP horaire de la future installation géothermique du CNRS Rousset.

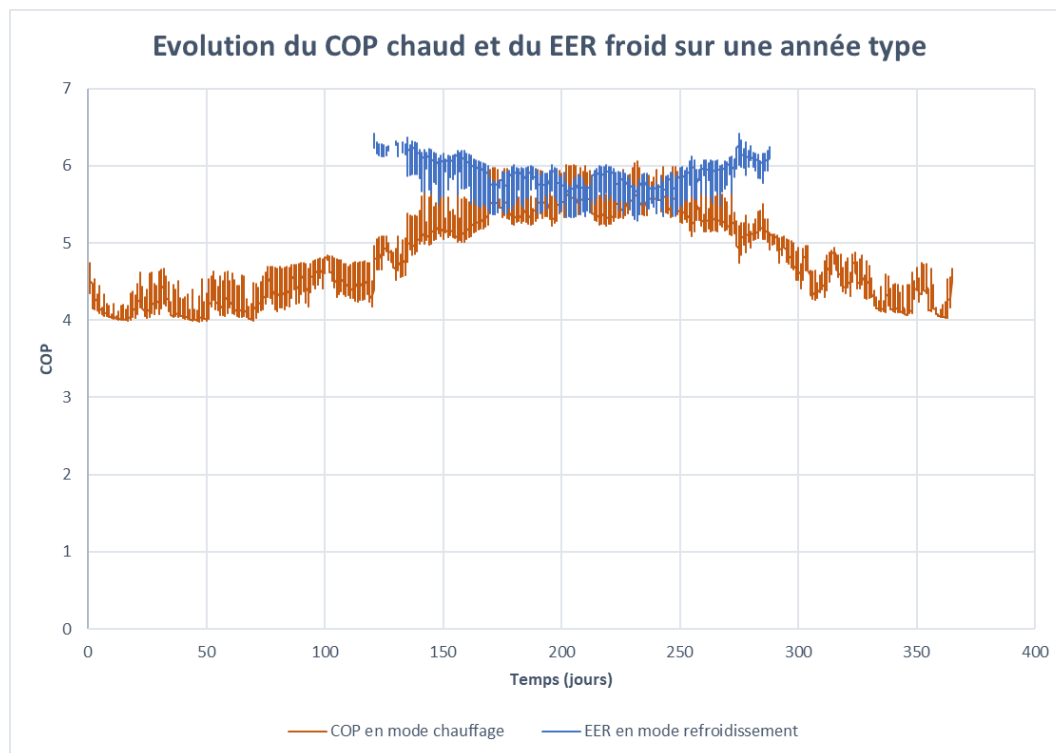


Figure 34 : Evolution horaire du COP de l'installation géothermique en chaud et en froid

Si l'on réalise une moyenne pondérée énergétique, le SCOP annuel attendu de la future installation géothermique est de 4.31. Le SEER attendu est de 5.67

Attention : Le SCOP annuel indiqué est le "SCOP machine" et ne prend pas en compte la consommation des auxiliaires (comme les pompes de circulation). Le SCOP global de l'installation sera déterminé ultérieurement dans le cadre de l'étude, une fois que le nombre de sondes sera connu, que les pertes de charge du champ de sondes auront été estimées, et que le Nombre d'Heures Pleines Puissances (NHEPP) aura été estimé.

Ci-dessous, l'évolution du COP/EER mensuel en fonction de l'énergie soutirée et injectée dans le sous-sol :

Tableau 10 : Evolution mensuelle du COP en production de chaud sur une année type

Energie mensuel côté bâtiment - Chauffage						
Mois	Besoins chaud	Couverture		COP	Electricité	Appoint
Janvier	102,3 MWh	93,0 MWh	90,9%	4,12	22,51 MWh	9,3 MWh
Février	84,3 MWh	78,0 MWh	92,6%	4,13	18,87 MWh	6,3 MWh
Mars	66,8 MWh	65,3 MWh	97,8%	4,23	15,47 MWh	1,5 MWh
Avril	39,9 MWh	39,9 MWh	99,8%	4,44	8,99 MWh	0,1 MWh
Mai	11,8 MWh	11,8 MWh	100,0%	0,26	2,45 MWh	0,0 MWh
Juin	4,4 MWh	4,4 MWh	100,0%	5,32	0,82 MWh	0,0 MWh
Juillet	3,1 MWh	3,1 MWh	100,0%	5,56	0,57 MWh	0,0 MWh
Août	3,5 MWh	3,5 MWh	100,0%	5,53	0,62 MWh	0,0 MWh
Septembre	6,7 MWh	6,7 MWh	100,0%	5,28	1,27 MWh	0,0 MWh
Octobre	25,2 MWh	25,2 MWh	100,0%	4,81	5,23 MWh	0,0 MWh
Novembre	65,3 MWh	64,0 MWh	98,0%	4,43	14,46 MWh	1,3 MWh
Décembre	93,4 MWh	85,9 MWh	92,0%	4,19	20,48 MWh	7,5 MWh
	506,6 MWh	480,7 MWh	94,9%	4,31	111,7 MWh	25,9 MWh

Tableau 11 : Evolution mensuelle du EER en production de froid sur une année type

Energie mensuel côté bâtiment - Refroidissement						
Mois	Besoins froid	Couverture		EER	Electricité	Appoint
Janvier	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0%	0,00	0,00 MWh	0,0 MWh
Février	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0%	0,00	0,00 MWh	0,0 MWh
Mars	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0%	0,00	0,00 MWh	0,0 MWh
Avril	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0%	0,00	0,00 MWh	0,0 MWh
Mai	16,7 MWh	16,5 MWh	99,3%	0,67	2,81 MWh	0,1 MWh
Juin	34,0 MWh	32,9 MWh	96,8%	5,65	5,82 MWh	1,1 MWh
Juillet	38,4 MWh	38,2 MWh	99,5%	5,60	6,83 MWh	0,2 MWh
Août	34,3 MWh	34,2 MWh	99,7%	5,61	6,11 MWh	0,1 MWh
Septembre	20,3 MWh	20,3 MWh	99,7%	5,69	3,56 MWh	0,1 MWh
Octobre	3,7 MWh	3,7 MWh	100,0%	5,99	0,62 MWh	0,0 MWh
Novembre	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0%	0,00	0,00 MWh	0,0 MWh
Décembre	0,0 MWh	0,0 MWh	0,0%	0,00	0,00 MWh	0,0 MWh
	147,5 MWh	145,9 MWh	98,9%	5,67	25,7 MWh	1,6 MWh

Le COP horaire de la PAC étant connu, il est désormais possible de tracer les puissances échangées avec le sous-sol.

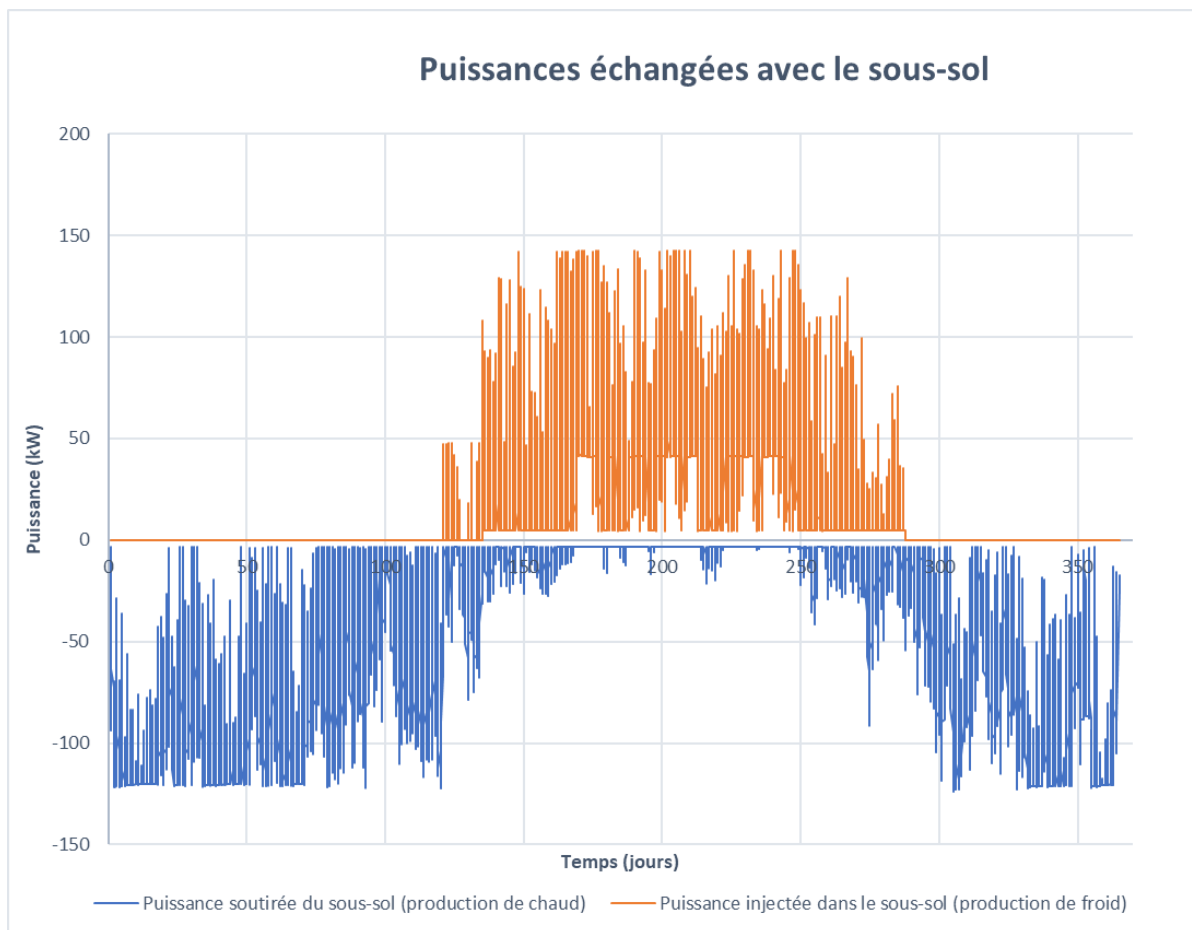


Figure 35 : Puissance échangée avec le sous-sol

5.5 Loi d'eau

La loi d'eau est un concept important dans le domaine du chauffage et de la climatisation, spécifiquement lorsqu'il s'agit d'utiliser des pompes à chaleur géothermiques.

Elle régit la relation entre la température extérieure et la température de départ de l'eau chauffée ou refroidie par la pompe à chaleur.

Lorsque la température extérieure diminue, la température de départ de l'eau chaude produite par la pompe à chaleur doit être augmentée pour compenser les déperditions et maintenir une température intérieure confortable. Inversement, lorsque la température extérieure augmente, la température de départ de l'eau peut être réduite pour économiser de l'énergie.

En ajustant automatiquement cette température en fonction des conditions extérieures, la loi d'eau permet à la pompe à chaleur géothermique de fonctionner de manière plus efficace, offrant ainsi des avantages considérables.

En effet, elle améliore l'efficacité énergétique en utilisant moins d'énergie pour maintenir le confort thermique, ce qui se traduit par des économies sur les factures d'énergie. De plus, cette adaptation dynamique garantit un confort constant à l'intérieur, indépendamment des fluctuations climatiques.

En réduisant la consommation d'énergie, l'utilisation efficace de la pompe à chaleur géothermique grâce à la loi d'eau contribue également à une durabilité environnementale accrue, favorisant ainsi une approche plus respectueuse de l'environnement en matière de chauffage et de climatisation.

Ci-dessous, exemple de production au départ d'une pompe à chaleur en fonction de la fréquence d'apparition des températures extérieures :

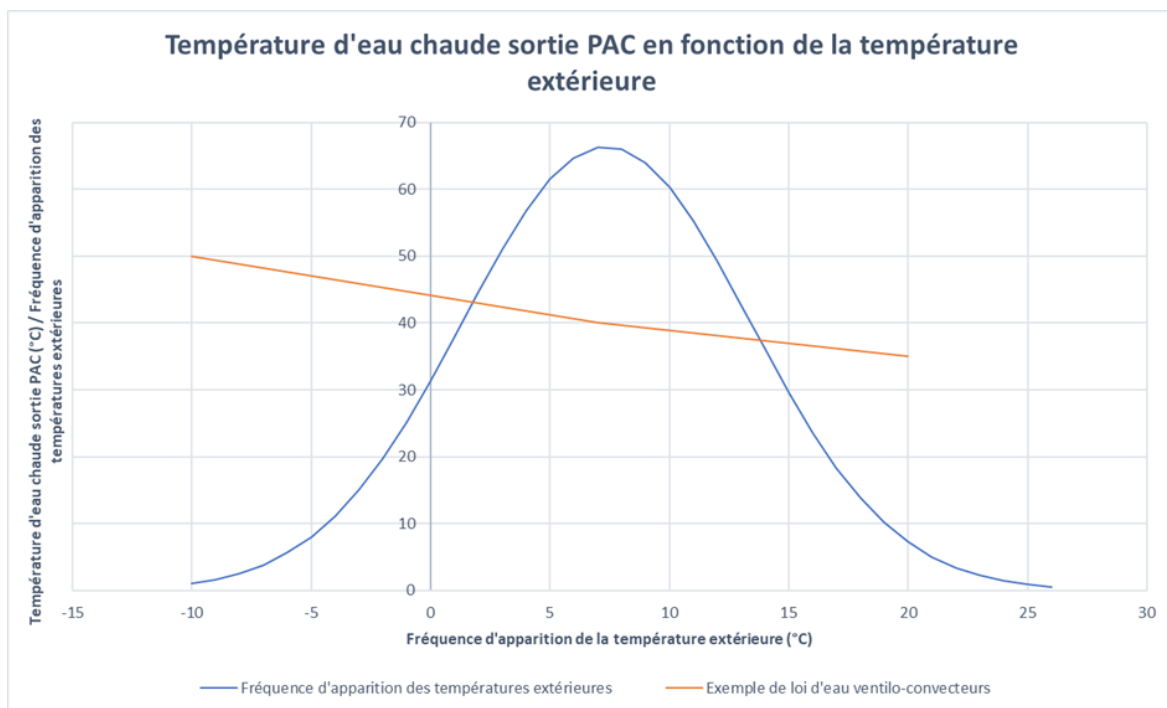


Figure 37 : Température d'eau chaude sortie PAC en fonction de la température extérieure

Une augmentation de 0.1 point de COP équivaut environ à une économie de 3% de la consommation électrique de la PAC.

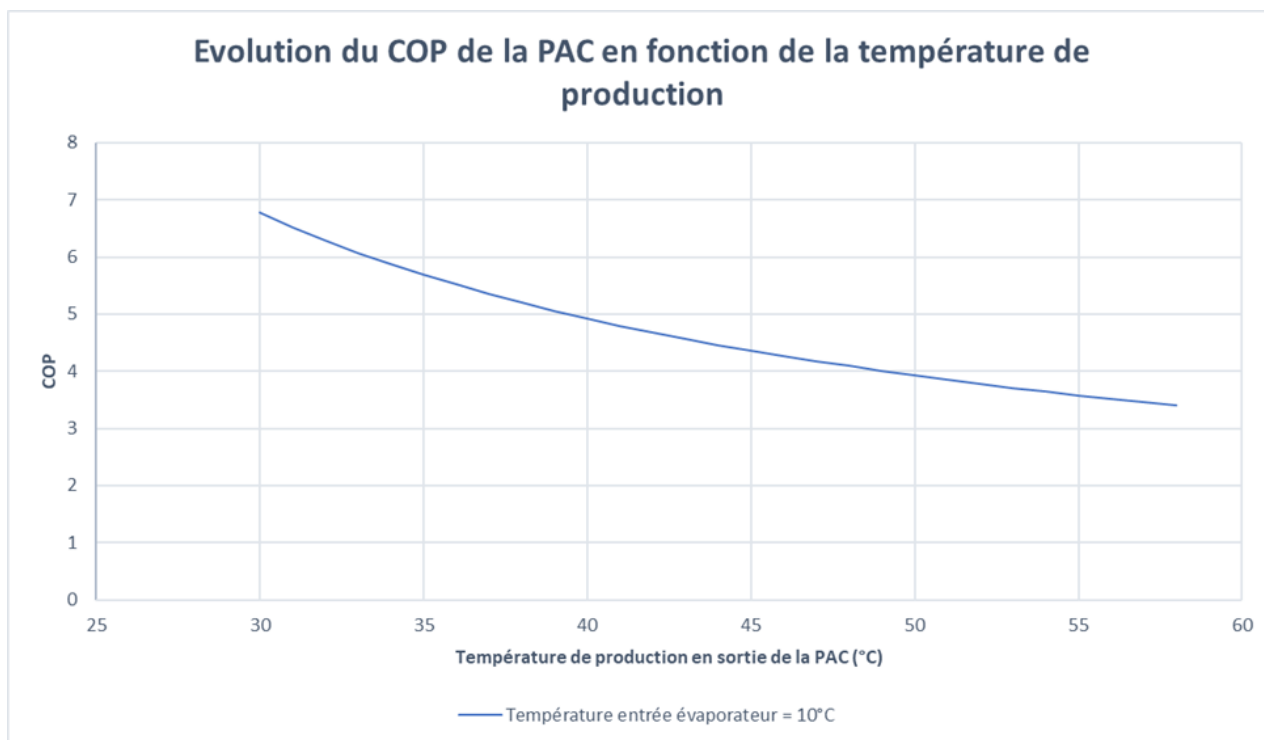


Figure 36 : Evolution du COP en fonction de la température de production

9.6 Synthèse du scénario de couverture géothermique

Tableau 12 : Scénario de couverture géothermie optimisé

CNRS - Station de primatologie	Géothermie - Chauffage	Géothermie - Refroidissement
Puissance maximale appelée par le bâtiment (kW)	261 kW	189 kW
Puissance couverte par PAC géothermique (kW)	160 kW	120 kW
Puissance couverte par le sous-sol (kW)*	124 kW	143 kW
Pourcentage de couverture puissance PAC	61%	63%
Energie totale annuelle demandée par le bâtiment (MWh)	506,6 MWh	147,5 MWh
Besoins énergétiques couverts par la PAC géothermique (MWh)	480,7 MWh	145,9 MWh
Energie géothermique réellement extraite/injectée du sous-sol (MWh EnR)*	368,9 MWh	171,7 MWh
Besoins énergétiques couverts par un appoint éventuel (MWh)	25,9 MWh	1,6 MWh
Pourcentage de couverture énergétique en géothermie	94,9%	98,9%
SCOP/SEER annuel	4,31	5,67

10 5. Contexte thermique au droit du projet

10.1 5.1 Définitions des paramètres thermiques du terrain

Le contexte thermique au droit du projet a pu être défini à l'aide d'un test de réponse thermique, réalisé conformément au cahier des charges de l'ADEME « REALISATION D'UN TESTE DE REPONSE THERMIQUE DE TERRAIN (TRT) ».

Le test de réponse thermique a fait l'objet d'un rapport distinct.

Tableau 13 : Paramètres du test de réponse thermique

Paramètres du test	
Fluide utilisé	Eau douce et claire
Chaleur spécifique du fluide	4185 J/kg.°C
Débit massique du fluide (kg/h)	1299,9
Différence de température $\Delta\Theta$	4,000 °C
Puissance totale injectée	6037 W
Puissance linéique	42,21 W/ml

Tableau 14 : Résultats du test de réponse thermique

Résultats du test de réponse thermique		Hypothèse de l'étude de faisabilité
Température initiale du sous-sol T_0	14,64 °C	16,00 °C
Conductivité thermique λ du sous-sol	2,316 W/m.K	2,132 W/m.K
Chaleur spécifique C_p du sous-sol	2,250 MJ/m³.K	2,222 MJ/m³.K
Résistance équivalente R_b de la sonde	0,0825 m.K/W	0,0950 m.K/W

11 Dimensionnement d'un dispositif de géothermie sur sondes

11.1 Principe de fonctionnement

Le principe de la géothermie sur champ de sondes consiste à exploiter l'énergie calorifique ou frigorifique disponible localement et de manière permanente au sein du sous-sol. Cette énergie est acquise grâce au gradient géothermal, qui correspond à l'accroissement de la température du sous-sol avec la profondeur.

Des sondes constituées de tubes en PEHD sont installées à la verticale dans un ensemble de forages profonds (maximum 200 m, conformément au respect de la réglementation GMI) et sont prises dans un coulis géothermique à haute conductivité. Elles sont ensuite reliées entre elles par un réseau de canalisations installées en circuit fermé. Un liquide caloporteur (eau + monopropylène glycol qualité alimentaire) est mis en circulation et échange, lors de son passage dans les sondes, de l'énergie avec le sous-sol par conduction thermique. Cette différence de température est ensuite exploitée par la pompe à chaleur.

Les champs de sondes peuvent être exploités selon deux modes de fonctionnement :

- En mode chauffage, une ou plusieurs pompes à chaleur disposées en surface permettent de transférer les calories puisées dans le sol vers le bâtiment à chauffer ;
- En mode refroidissement, les calories en provenance du bâtiment sont injectées dans le sol ;

A l'inverse de la géothermie sur aquifère, la productivité des champs de sondes ne dépend pas des ressources en eau souterraine. Cette solution est donc adaptée à une plus large gamme de configurations géologiques.

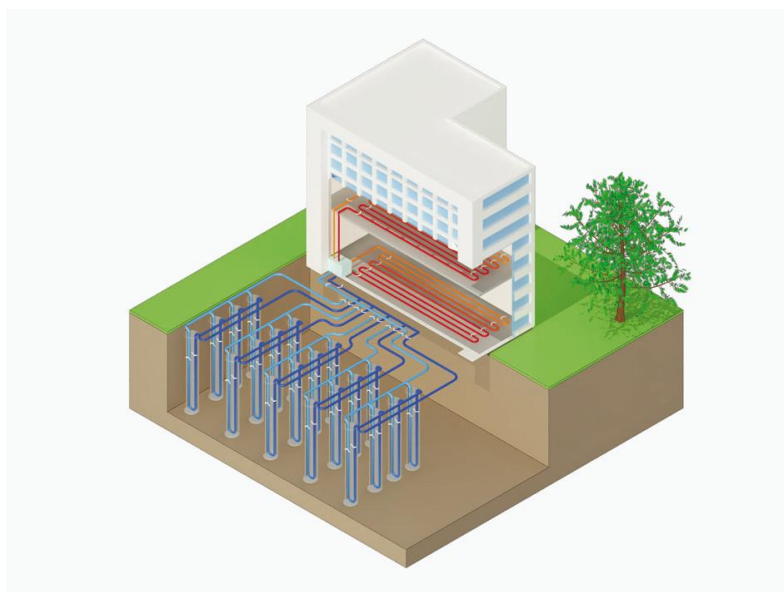


Figure 38 : Schéma de principe d'une installation sur sondes géothermiques - geothermies.fr

11.2 Définition de la sonde géothermique verticale

Contrairement à des solutions classiques par chaudière gaz ou pompe à chaleur aérothermique, la géothermie très basse énergie n'est que très peu visuelle puisque les équipements se situent sous terre ou dans des locaux techniques habituellement localisés en sous-sol.

De manière générale, la boucle géothermique comprend les sondes géothermiques, les équipements hydrauliques et l'échangeur à plaque géothermique situé en amont de la pompe à chaleur :

Les forages pour les sondes géothermiques verticales sont réalisées généralement entre 139 et 165 mm de diamètre en fonction de leur profondeur et de la géologie du sous-sol. Les sondes sont équipées d'une double boucle en PEHD en forme de U scellée dans un ciment thermique permettant le meilleur contact possible entre l'échangeur et le sous-sol.

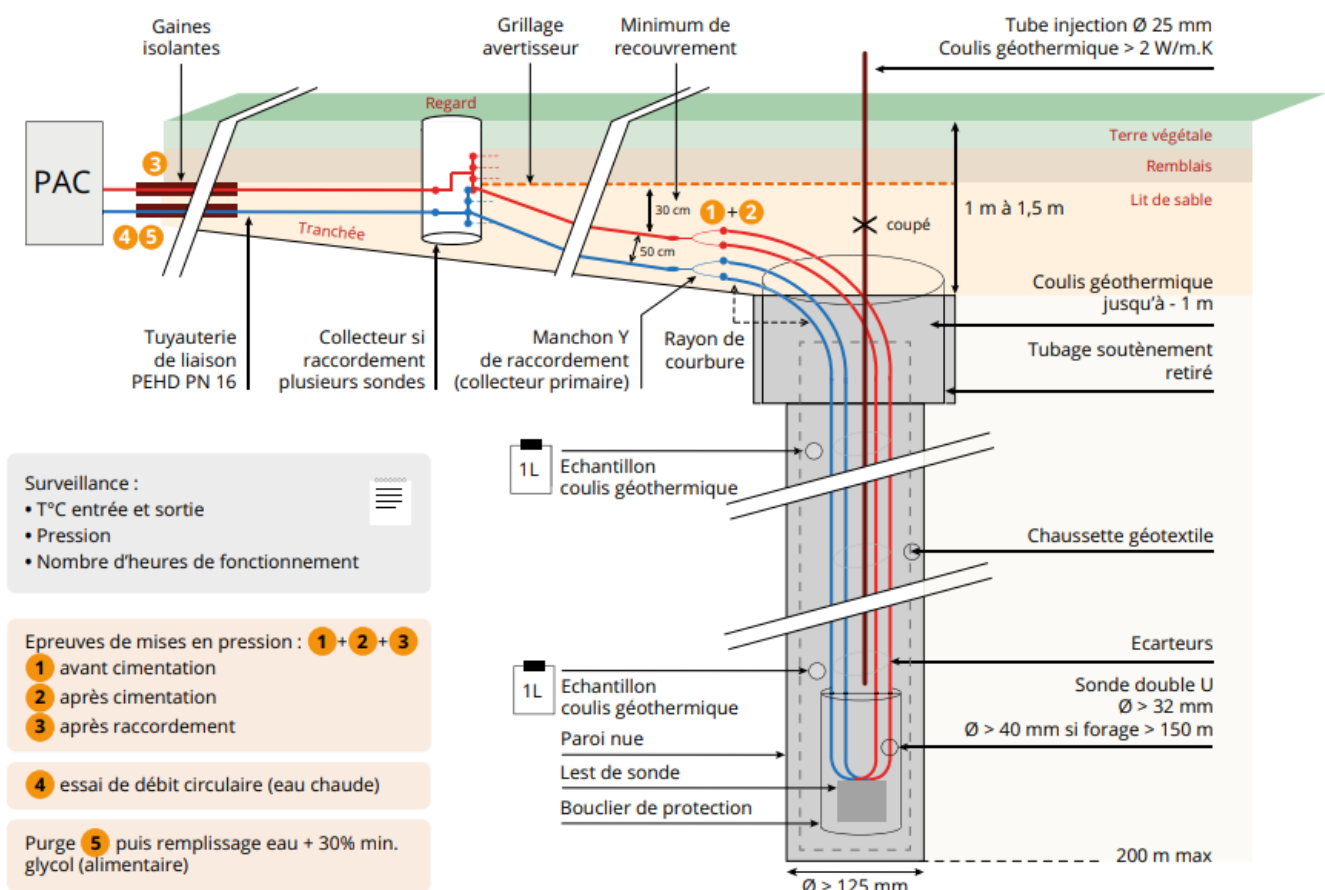


Figure 39 : Schéma de principe d'une sonde géothermique verticale - BRGM - DREAL

11.3 Définition de la méthode de calcul

A partir des hypothèses émises précédemment, il est possible de donner une première approximation de l'ouvrage géothermique à mettre en place afin de répondre aux besoins énergétiques du bâtiment. Le dimensionnement consiste à affiner et optimiser la nature et les caractéristiques des différents composants du dispositif géothermique (sondes verticales, pompe à chaleur, émetteurs, etc.). Il permet notamment de :

- Définir le métrage de sondes géothermiques à installer ;
- Déterminer la disposition du champ de sondes géothermiques ;
- Assurer la pérennité du système grâce notamment à la connaissance, heure par heure, de la température du fluide caloporteur contenu dans les sondes ;
- Vérifier les contraintes imposées par le bâtiment et les préconisations pour une utilisation efficace de la géothermie ;
- Évaluer les performances énergétiques, économiques et environnementales de l'installation géothermique.

Dans cette perspective, le dimensionnement sera réalisé grâce au logiciel EED de la société BLOCON, une plateforme reconnue pour ses nombreux développements de logiciels de simulation thermique dynamique, incluant des calculs liés aux transferts de chaleur, d'humidité ou d'air, ainsi qu'à l'énergie terrestre.

L'interface d'EED BLOCON permet à l'utilisateur de définir l'ensemble des paramètres liés à l'installation et au bâtiment, notamment :

- Les paramètres thermiques du terrain (conductivité thermique, capacité calorifique, température initiale) ;
- Les paramètres liés à la pompe à chaleur, y compris l'intégration directe de la Simulation Thermique Dynamique (STD) présentant les appels de puissance heure par heure sur une année typique de fonctionnement ;
- Les paramètres liés aux émetteurs (chauffage, refroidissement, température, géocooling, ECS, etc.) ;
- Les caractéristiques des sondes géothermiques utilisées (diamètre, profondeur, entre-axe des tubes, conductivité thermique, épaisseur de la paroi).
- Les paramètres liés au terrain (surface, agencement du champ de sondes).

11.4 Paramètres de dimensionnement

Le dimensionnement doit permettre de s'assurer du respect des règles de bon usage de la géothermie, garantissant ainsi la pérennité du projet. Voici les critères à respecter :

- La température moyenne du fluide caloporteur ne doit pas descendre en dessous de $-1,5^{\circ}\text{C}$;
- La température minimale du fluide caloporteur ne doit pas descendre en dessous de -3°C (ce qui est également obligatoire selon le code minier) ;
- La température maximale du fluide caloporteur ne devra pas excéder 40°C (ce qui est également obligatoire selon le code minier) ;
- La différence de température entre les sondes et la pompe à chaleur géothermique doit être maintenue entre 3 et 4°C .

12 Paramètres de la modélisation

12.1 Rappel des besoins thermiques du projet

Tableau 15 : Rappel des puissances et couvertures énergétiques pour le scénario géothermique envisagé

CNRS - Station de primatologie	Géothermie - Chauffage	Géothermie - Refroidissement
Puissance maximale appelée par le bâtiment (kW)	261 kW	189 kW
Puissance couverte par PAC géothermique (kW)	160 kW	120 kW
Puissance couverte par le sous-sol (kW)*	124 kW	143 kW
Pourcentage de couverture puissance PAC	61%	63%
Energie totale annuelle demandée par le bâtiment (MWh)	506,6 MWh	147,5 MWh
Besoins énergétiques couverts par la PAC géothermique (MWh)	480,7 MWh	145,9 MWh
Energie géothermique réellement extraite/injectée du sous-sol (MWh EnR)*	368,9 MWh	171,7 MWh
Besoins énergétiques couverts par un appoint éventuel (MWh)	25,9 MWh	1,6 MWh
Pourcentage de couverture énergétique en géothermie	94,9%	98,9%
SCOP/SEER annuel	4,31	5,67

12.2 Paramètres retenus pour l'ouvrage géothermique

Tableau 16 : Paramètres retenus pour l'ouvrage géothermique

CNRS - Station de primatologie	Valeurs
Conductivité thermique du terrain	2,316 W/m.K
Capacité calorifique volumique du terrain	2,25 MJ/m ³ .K
Température initiale	14,64 °C
Diamètre du forage	170 mm
Type de sonde	PEHD double U spiralée
Diamètre et épaisseur	Ø 32 mm - 3,00 mm d'épaisseur
Fluide caloporteur	MPG dosé à 25%
Profondeur maximale de la sonde	150 mètres
Résistance équivalente de l'ouvrage géothermique	0,0825 m.K/W
Conductivité du coulis géothermique	≥ 2 W/m.K
Espacement minimum entre chaque sonde	9 mètres

13 Résultats du dimensionnement

13.1 Modélisation du champ de sondes géothermiques

Sur le graphique ci-dessous, la puissance injectée et soutirée dans le sous-sol est représentée à partir de la STD réalisée par la société ENERSIM et en tenant compte d'une limite de puissance calorifique de la PAC à 160 kW.

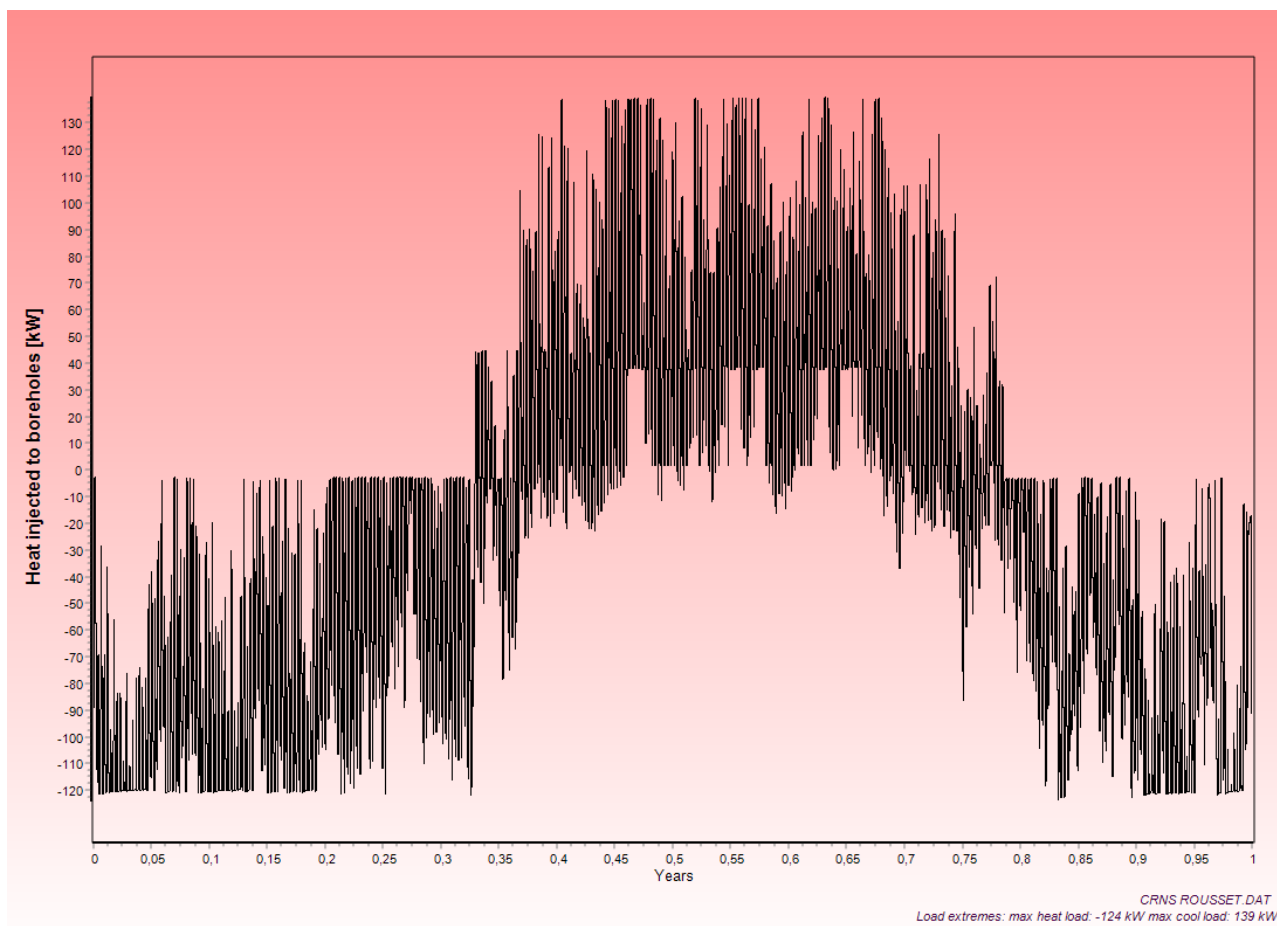


Figure 40 : Puissance échangée avec le sous-sol

Sur la base d'un fonctionnement de 25 ans, l'installation de **28 sondes géothermiques verticales de 150 m**, permettrait de couvrir la quasi-totalité des besoins énergétiques du CNRS Rousset en chaud (95%) et des besoins en rafraîchissement (99%). Cela est rendu possible par l'installation d'une pompe à chaleur géothermique d'une puissance calorifique de 160 kW.

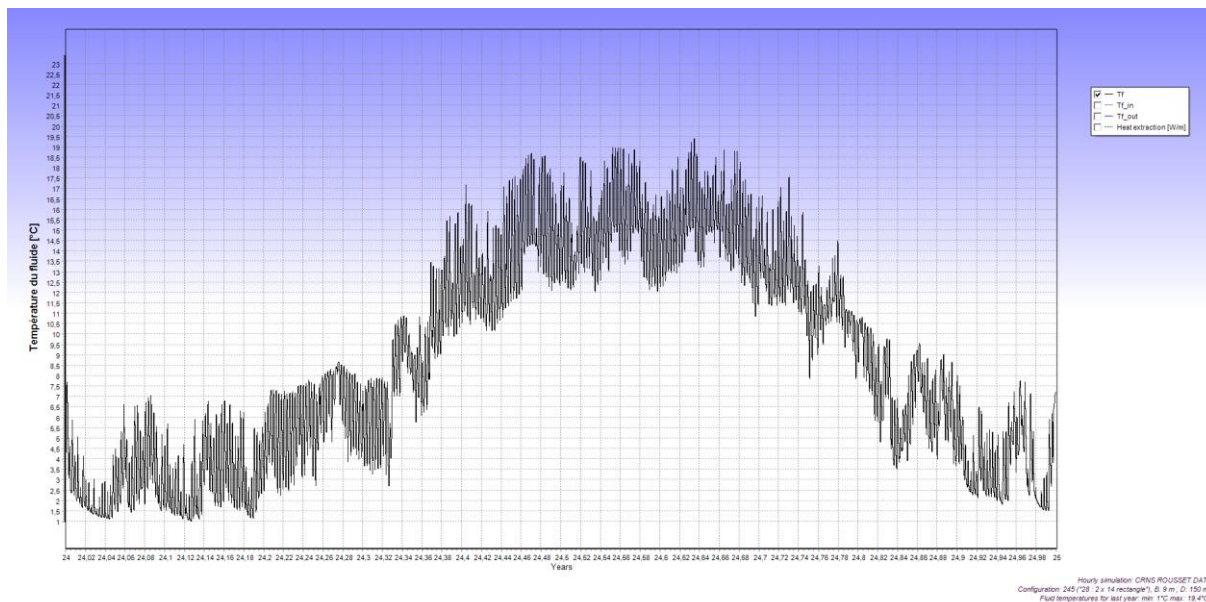


Figure 41 : Résultat du calcul de la température moyenne du fluide caloporteur

Pour arriver à ce résultat, les sondes doivent être positionnées en ligne et espacées à minima de 9 mètres de la façon suivante :

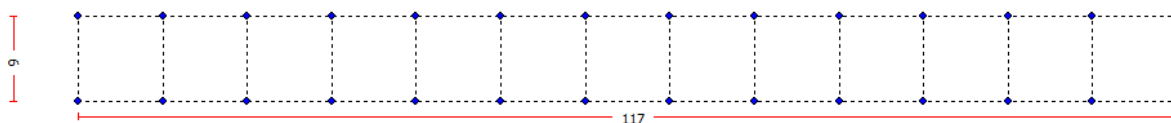


Figure 42 : Schéma d'implantation théorique du futur champ de sondes

Si la Maitrise d'Œuvre fluide du projet veut atteindre des régimes de température plus spécifiques dans le champ de sondes, la modélisation pourra être reprise en conséquence.

Il est possible de constater que la température dans le champ de sondes diminue au fur et à mesure des années d'exploitation du champ de sondes. Ce déséquilibre thermique est dû au fait que le futur champ de sondes géothermiques, sera plus exploité en chaud, avec 369 MWh soutirée du sous-sol, qu'exploité en froid, avec 172 MWh injectée dans le sous-sol.

En effet, lors de la première année le fluide caloporteur est à 5.12 °C au plus bas de la saison de chauffage et 23.39 °C au plus haut de la saison de refroidissement. Le fluide caloporteur va alors descendre de façon régulière durant toute la phase d'exploitation du champ de sondes, pour atteindre 2.58 °C et 21.96 °C lors de la 10ème année d'exploitation. Au bout de la 25ème année d'exploitation, le champ de sondes atteindra une température minimale de 1 °C au plus bas de l'hiver et 19.4 °C au plus haut de l'été.

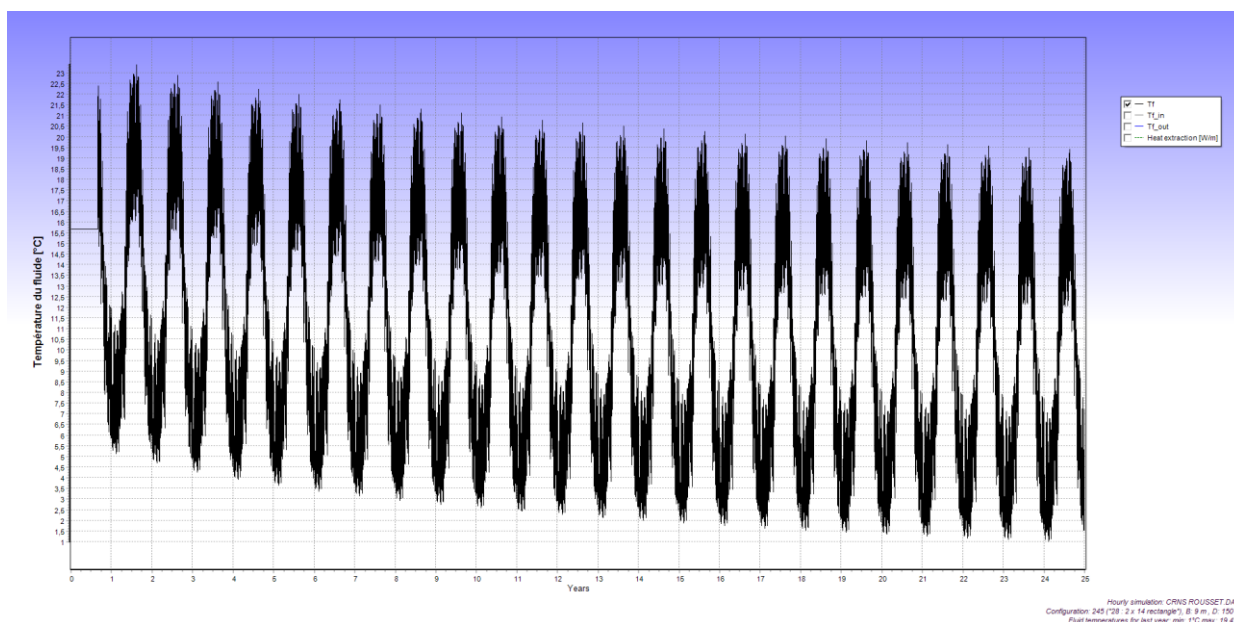


Figure 43 : Résultat du calcul de la température moyenne du fluide caloporteur dans les sondes sur 25 ans de fonctionnement

PUISSANCE D'EXTRACTION SPECIFIQUE [w/m]

Year 25	Pointe de chaleur	Pointe de froid
JAN	28,9	0
FEV	28,9	0
MAR	28,9	0
AVR	29,1	-10,5
MAI	18,7	-33
JUN	5,5	-33,1
JUL	2,88	-33,1
AOU	3,9	-33,2
SEP	11,4	-33,1
OCT	29,5	-17,2
NOV	29,4	0
DEC	29	0

MIN/MAX FLUID TEMPERATURES

Year 25	Tf_min	Tf_max
JAN	1,1	7,74
FEV	1	7,06
MAR	1,12	7,81
AVR	2,7	10,4
MAI	5,77	17,2
JUN	10,2	18,7
JUL	12	19
AOU	12,1	19,4
SEP	9,93	18,8
OCT	4,81	14,5
NOV	2,27	9,58
DEC	1,51	7,78

Figure 44: Résultat du calcul de la température moyenne du fluide caloporteur

Un certain nombre de contraintes existe quant aux positionnements des sondes géothermiques verticales. Celles-ci sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Distances préconisées pour l'implantation des sondes géothermiques verticales

Désignation	Distance préconisées
Sondes géothermiques	8-10 m
Limites de propriétés	5 m
Arbres	3 m
Réseau hydraulique	2 m
Fondations	3 m

Un concours de mission de maîtrise d'œuvre étant en cours, il ne sera pas proposé dans ce rapport un schéma de principe pour le futur champ de sondes géothermiques verticales.

Il restera à définir dans les phases ultérieures du projet l'implantation de la paire de collecteurs (préfabriquée et enterrée dans un regard à l'extérieur ou mural dans le local technique).

14 Phase de reconnaissance & test de réponse thermique

La phase de reconnaissance, qui a duré environ trois semaines, a permis la réalisation d'une sonde géothermique pilote – exécutée dans les mêmes conditions qu'une sonde définitive – ainsi que la réalisation d'un test de réponse thermique (TRT) sur cette même sonde. Ce TRT a permis de caractériser les propriétés thermodynamiques du sous-sol au droit du site.

Les résultats obtenus, couplés à une modélisation numérique du fonctionnement du champ géothermique, ont permis de valider définitivement le dimensionnement du futur champ de sondes verticales. Cette modélisation s'est appuyée sur les appels de puissance horaires du projet (STD), calculés par le bureau d'études ENERSIM.

Conformément au cahier des charges de l'ADEME, lorsque le linéaire de sondes dépasse 1 000 m, la réalisation d'un test de réponse thermique couplée à une modélisation numérique est obligatoire. Cette exigence a donc été satisfaite.

À l'issue de cette phase de reconnaissance, encadrée par la Maîtrise d'Œuvre géothermique, les données collectées sur site ont été interprétées et utilisées pour actualiser l'étude de faisabilité et préciser la conception du système en phase d'avant-projet détaillé. (APD).



Figure 45 : Photo du module de test de réponse thermique, connecté à la sonde géothermique pilote

15 Contraintes de mises en œuvre et exploitation des sondes géothermiques

15.1 Contraintes de réalisation des travaux

Les travaux de forage devront être réalisés par une entreprise possédant une qualification **Qualiforage RGE module sondes** et respectant les normes en vigueur, dont notamment les normes NF X 10-970 et NF X 10-960. Afin de s'assurer de la pérennité de l'installation (la durée de vie d'une sonde géothermique est de 100 ans), l'entreprise devra respecter les préconisations de mise en œuvre des sondes géothermiques ainsi que des contrôles in-situ (essais de mise en pression et essais de circulation avec mesure des pertes de charges).

De plus, l'entreprise de forage réalisant les travaux pourra être supervisée par un bureau d'étude Géothermique (AMOE) afin de s'assurer :

- De la bonne mise en place des sondes géothermiques ;
- De la bonne cimentation des SGV pour éviter les phénomènes de mélange de nappe ou de mouvement de terrain (argile ou anhydrite) ;
- Que le matériel utilisé pour les soudures des canalisations horizontales soit de type électro-soudure et normalisé ;
- Que les canalisations horizontales soient installées dans des tranchées avec une pente ascendante de 1% minimum vers le collecteur ;
- Que l'installation soit testée et contrôlée en pression et en circulation ;
- Que l'installation fasse l'objet d'un remplissage en eau glycolée correctement réalisé ;
- Que chaque organe de l'installation soit équilibré et prêt pour la mise en service ;
- De la bonne exécution d'une note de calcul permettant de dimensionner le circulateur de la ou des pompes à chaleur eau/eau.
- De la bonne exécution d'un plan d'implantation des sondes géothermiques, respectant l'ensemble des contraintes préconisées (distances réglementaires, pentes, passage des réseaux horizontaux, etc...)

15.2 Contraintes d'exploitation

En phase d'exploitation, le dispositif de sondes géothermiques verticales possèdera les spécificités particulières suivantes :

- Le réseau des sondes géothermiques verticales sera maintenu sous pression et aucune bulle d'air ne devra être présente dans la boucle ;
- Le fluide caloporteur sera un mélange d'eau et de monopropylène glycol dosé entre 20 et 30 % pour permettre son fonctionnement avec un régime de température de 0/-3°C ;
- En période hivernale extrême, le régime de température du fluide caloporteur pourra être de 0/-3°C, ce qui nécessitera d'adapter la pompe à chaleur en conséquence.

15.3 Accessibilité et pérennité de l'installation

Si l'ensemble des contrôles de la boucle primaire (sondes géothermiques et raccords) en phase travail a été jugé concluant, l'installation est considérée comme étanche et pérenne et théoriquement aucune nouvelle manipulation ne devra être réalisée.

Cette particularité permet d'enfouir totalement les sondes géothermiques et canalisations de raccordement sans garder d'accessibilité particulière. Seul les collecteurs hydrauliques (organes de régulation, équilibrage et purge) qui possèdent des raccords mécaniques devront être accessibles pendant l'exploitation du réseau des sondes géothermiques verticales.

Selon les accessibilités et les facilités de mise en œuvre, les collecteurs pourront soit être placés dans un regard enterré (préfabriqué ou maçonné), soit directement dans le local technique accroché au mur. Dans tous les cas, les collecteurs sont des organes de régulation et doivent rester accessible durant toute la phase d'exploitation des sondes géothermiques verticales.

Les matériaux utilisés dans le cadre d'un réseau de sondes géothermiques verticales ont une durée de vie définie à 100 ans pour un régime d'eau à 20°C.

Important : Des compteurs d'énergies seront à prévoir au CCTP fluides concernant le comptage des calories/frigories géothermiques prélevées et produites par la PAC (en amont du ballon tampon). La consommation électrique de la PAC devra également être comptée et suivie.

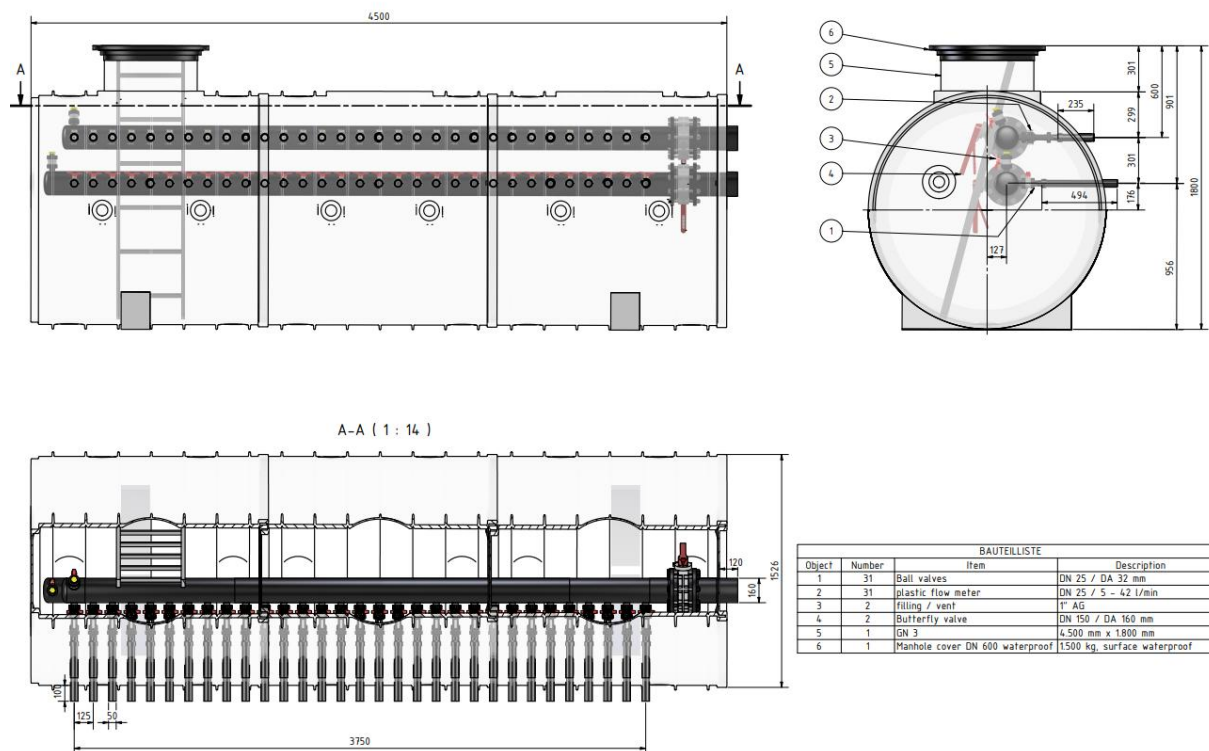


Figure 46 : Exemple d'un ensemble cuve/collecteur enterré 31 sorties - Ø 50 mm côté sondes et Ø 160 mm côté PAC



Figure 47 : Exemple d'un ensemble cuve/collecteur enterré 38 sorties en cours de raccordement

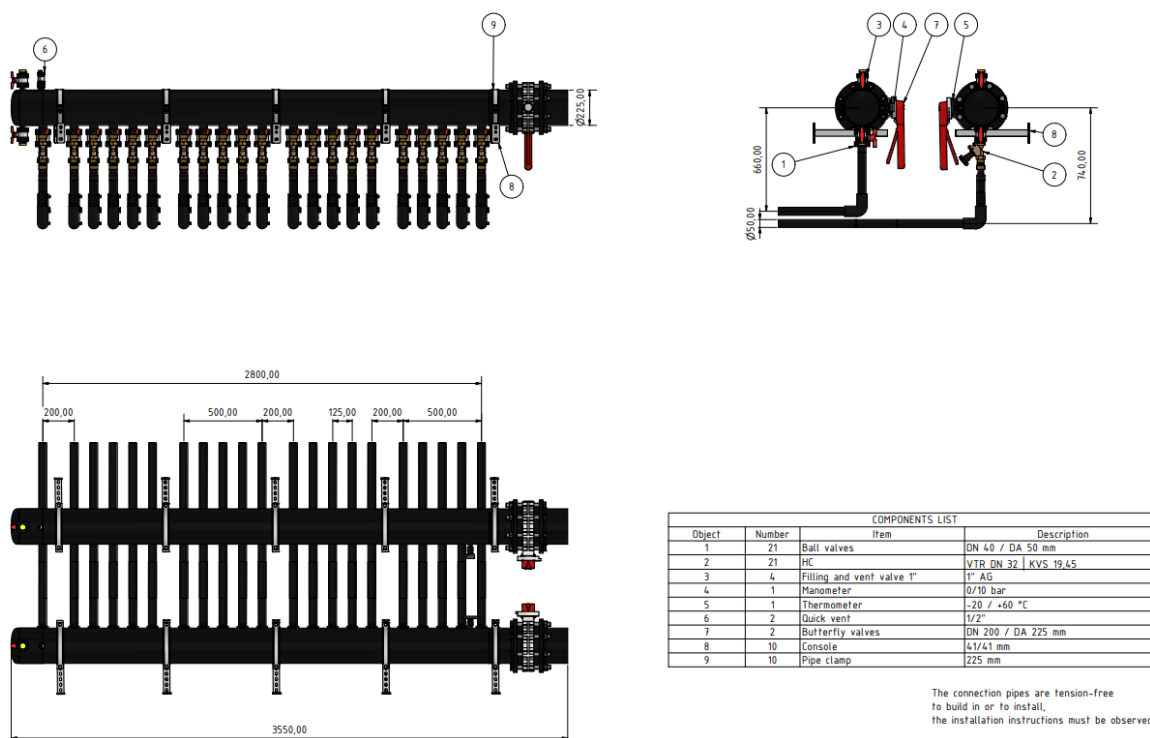


Figure 48 : Exemple d'un collecteur mural 21 sorties - Ø 50 mm côté sondes et Ø 225 mm côté PAC

15.4 Contraintes de régulation et de maintenance

Régulation :

Afin de pouvoir optimiser le fonctionnement et la durée de vie de l'installation, quelques préconisations de régulation doivent être prises en compte, à savoir :

- La mise en place de capteurs de pression dans la boucle primaire géothermale afin de pouvoir identifier la présence de fuite dans le système ;
- La mise en place de thermomètre automatique sur l'aller et le retour de la boucle primaire géothermale afin de pouvoir vérifier la température du fluide caloporteur coté SGV et couper le dispositif lorsque la température du fluide descend sous les recommandations d'exploitation ;
- La mise en place de vannes de fermeture et de débitmètre sur l'aller et le retour d'une sonde géothermique pour permettre l'isolement d'une d'entre elle en cas de fuite constatée ;
- La mise en place de vannes de remplissage et de vannes de purge pour permettre le remplissage en eau du système et vider le dispositif lors des visites de contrôles.

Maintenance :

Afin de s'assurer de la pérennité du fonctionnement de l'installation, un entretien annuel de la boucle doit être réalisé :

- Une vérification des pressions du circuit extérieur ;
- Une vérification des niveaux et assurer le complément avec un mélange de glycol dilué.

15.5 Autres préconisations

Ci-dessous, différentes recommandations à intégrer pour la suite du projet :

- Des compteurs d'énergie thermique et électrique doivent être installés pour comptabiliser au minimum :
 - L'énergie thermique échangée avec le sous-sol ;
 - L'énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC ;
 - L'énergie calorifique produite par la PAC.

Les compteurs d'énergie doivent être capables de fonctionner dans des plages de température négative en fonction des besoins du projet, ou de mesurer l'énergie à partir d'un fluide glycolé.

Idéalement, ces compteurs d'énergie peuvent être conformes à la directive « MID » (Measurement Instruments Directive) et avoir un historique accessible.

- Un vase d'expansion côté captage est nécessaire pour garantir une pression constante dans le circuit des sondes géothermiques malgré des températures qui varient. Généralement, le vase d'expansion se dimensionne pour 5 litres/100 ml de sondes ;

Ci-dessous, un schéma de principe issu du DTU 65.16 « Installation de pompe à chaleur » avec la présence d'un vase d'expansion côté sondes :

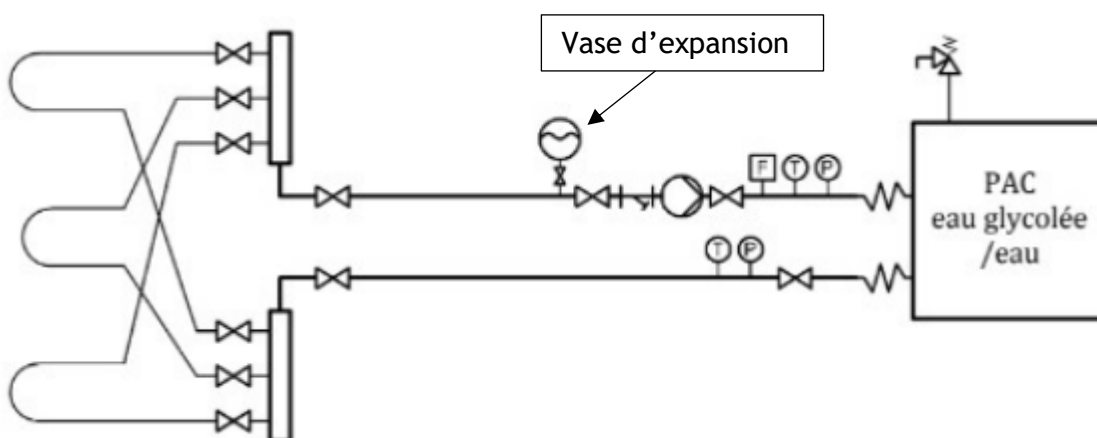


Figure 49 : Schéma de principe d'une installation sur sondes - source DTU65.16

A noter que sur le schéma présenté, il n'y a pas d'échangeur de barrage.

Le vase d'expansion côté captage peut se dimensionner de la manière suivante :

$$Volume_{expansion} = \frac{Volume_{captage} * 1.1}{40}$$

- Si les sondes sont remplies uniquement d'eau (sans monopropylène glycol), il est important de prévoir un inhibiteur de dépôt pour éviter tout embouage dans les sondes géothermiques ;
- Si une production de froid par géocooling est envisagée dans le projet, il est recommandé de privilégier des vannes 2 voies plutôt que des vannes 3 voies, car ces dernières présentent un risque relativement élevé de fuite ;
- Le réseaux côté captage doit idéalement être calorifuger jusqu'à la PAC pour éviter toute condensation dans le local technique ;
- Si un chauffage d'appoint en chaud ou en froid est nécessaire, il doit être installé en série en aval du ballon tampon, de manière à éviter que l'appoint ne prenne le dessus sur la PAC géothermique. De plus, il est essentiel de prévoir l'installation de compteurs d'énergie pour mesurer la consommation d'énergie de l'appoint.

Ci-dessous, un exemple de schéma hydraulique pour une installation géothermique avec un chauffage d'appoint au gaz et mettant en avant l'utilisation de vannes 2 voies plutôt que de vannes 3 voies :

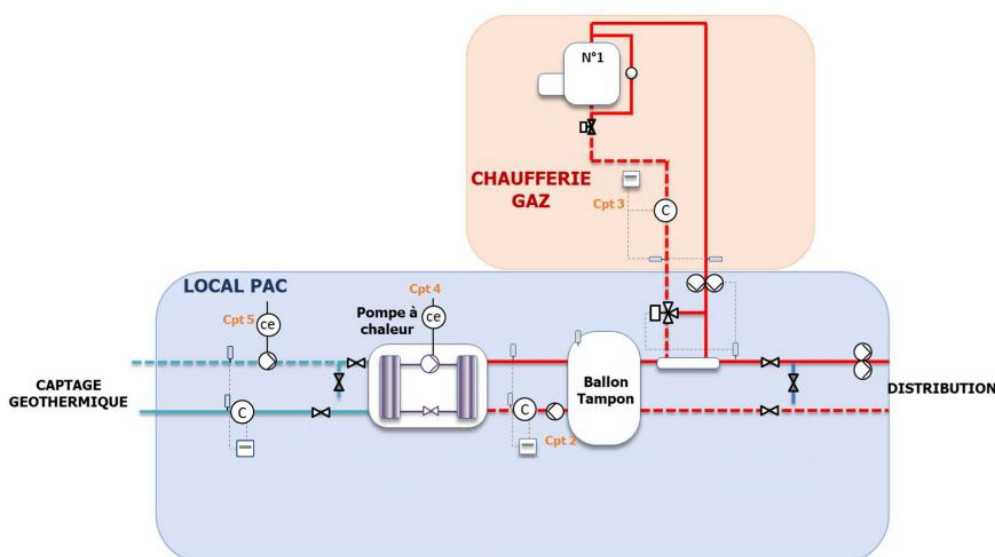


Figure 50 : Schéma de principe d'une installation bi-énergie avec appoint gaz

Pour rappel : les compteurs d'énergie thermique et électrique conditionnent une partie des aides versées par l'ADEME.

Ci-dessous le plan de comptage théorique donné par l'ADEME, pour une installation géothermique en production de chaud ou de froid :

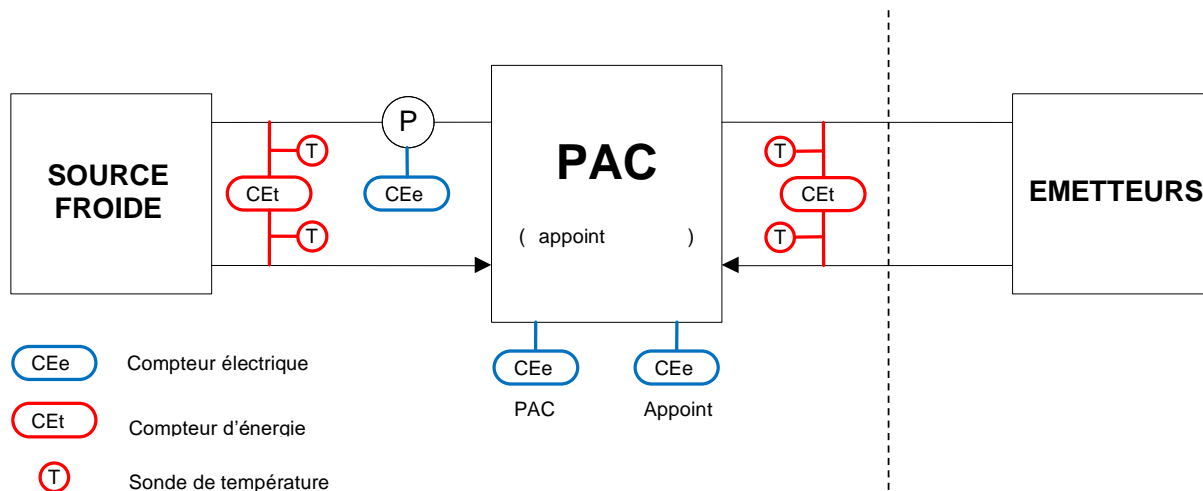


Figure 51 : Instrumentation pour un fonctionnement en production de chaud ou de froid - source : cdc-ademe-etude-faisabilité-pompe-chaleur-geothermique-v17122020

16 Assurances et subventions

16.1 Assurances en termes de géothermie

Dans le cadre de la mise en œuvre d'une opération de géothermie, le Maître d'Ouvrage peut être couvert :

- Par l'obligation des entreprises et les bureaux d'études de posséder une assurance destinée à réparer tout dommage immobilier ou tout ensemble de dommages immobiliers causés à des tiers pour une période de 10 ans (conformément au décret 2016-835 du 24 juin 2016) ;
- Soit, par la souscription d'une assurance AQUAPAC pour les opérations de géothermie sur nappe qui permet de souscrire à une assurance lors des phases de reconnaissance (AQUAPAC Recherche) devant le risque d'échec et une assurance pour 10 ans d'exploitation (AQUAPAC pérennité) devant le risque de baisse de la productivité des forages ;

16.2 Subventions par l'ADEME

Dans le cadre du dispositif « Fonds chaleur », l'ADEME accompagne les projets en énergies renouvelables thermiques les plus pertinents. Trois critères sont privilégiés :

- Réduction des consommations énergétiques ;
- Mutualisation des besoins (valoriser les énergies renouvelables et de récupération à proximité et les mettre en commun) ;
- Prioriser et optimiser le choix de l'énergie (favoriser les énergies de récupération et à défaut les énergies renouvelables, en favorisant les productions les plus proches géographiquement du site).

De plus, avant de pouvoir prétendre au dépôt d'une demande de subvention, le Maître d'Ouvrage et le Maître d'œuvre devront vérifier que le projet respecte les conditions d'éligibilité, présentées dans le tableau suivant :

Tableau 18 : Liste des critères non exhaustive pour l'obtention des aides « Fonds Chaleur » de l'ADEME en 2023

Critères	Validation - Scénario géothermie
COP PAC égale ou supérieur à 4 (0/-3 °C - 30/35 °C) en production de chaud	Eligible
SCOP global annuel estimé minimum de 3	Eligible
SEER > 20 en production de froid par geocooling	Non prévu sur le projet
Nombre d'heures équivalentes de fonctionnement supérieur à 1000 heures/an	Eligible
Production minimale de 25 MWh EnR/an	Eligible
Respect de la GMI	Eligible
Respect des normes NFX 10-970 / NFX 10-960-1 / NFX 10-960-2 / NFX 10-960-3 / NFX 10-960-4	Eligible
Réalisation d'un TRT et d'une modélisation pour les opérations dont la longueur dépasse 1000 mètres	Eligible

16.3 Autres subventions

La région PACA peut financer une partie des investissements liés à la géothermie. D'après nos retours d'expériences, **la région PACA peut prendre à sa charge entre 30% et 40% des investissements liés à l'installation géothermique** (forages, raccordement, collecteur, PAC eau/eau, régulation, circuit hydraulique dédié à la géothermie, accessoires annexes...).

16.4 Vérification des critères d'éligibilités

16.4.1 NHEPP

La formule suivante (issue du document « Conditions d'éligibilité et de financement : Géothermie de surface et aérothermie - 2023 ») permet d'estimer le Nombre d'Heures Equivalent Pleine Puissance (NHEPP) en mode chauffage :

Production de chaud :

$$NHEPP_{chaud} = \frac{MWh \text{ chaud annuels}}{Puissance \text{ thermique (kW)}} * 1000$$

$$NHEPP_{chaud} = \frac{480.683}{160} * 1000 = 3004 NHEPP_{chaud}$$

Production de froid :

$$NHEPP_{froid} = \frac{MWh \text{ froid annuels}}{Puissance \text{ thermique (kW)}} * 1000$$

$$NHEPP_{froid} = \frac{145.939}{120} * 1000 = 1216 NHEPP_{froid}$$

$NHEPP_{Total} = 3004 + 1216 = 4220$

L'ADEME demande aux installations subventionnées de respecter un minimum de 1000 NHEPP en production de chaud. Plus ce ratio est élevé, plus le fonctionnement est continu sur l'année. Ce calcul sera à actualiser après la phase de reconnaissance.

Une valeur supérieure à 1000 heures en mode chaud seul ou supérieure à 1500 heures en mode chaud et froid est un objectif à viser en s'appuyant sur les courbes monotones d'appels de puissance en chaud et/ou en froid sur l'année (à mettre en perspectives des spécificités de l'opération (bâtiments neufs ou existants, taux d'occupation, gestions des périodes de ralenti et relances, appoint, ...).

Depuis 2022, ce critère n'est plus qu'une recommandation pour obtenir les aides du « Fonds chaleur » de l'ADEME, puisque qu'il pénalisait les bâtiments neufs performants.

16.4.2 Détermination du SCOP global de l'installation géothermique

Une fois le NHEPP en chaud et en froid défini, il est possible de calculer la consommation des auxiliaires et donc le Coefficient de Performance global de l'installation.

Le SCOP global est donné par la formule suivante :

$$SCOP_{global} = \frac{E_{calorifique\ totale}}{E_{PAC} + E_{aux}}$$

Avec :

- $E_{calorifique\ totale}$ = Energie totale produite par la PAC en kWh ;
- E_{PAC} = Energie consommée par le compresseur de la PAC en kWh ;
- E_{aux} = Energie consommée par les auxiliaires en kWh.

L'énergie consommée par les auxiliaires est donnée par la formule suivante :

$$E_{aux} = Puissance_{pompe} * NHEPP$$

Avec :

- $Puissance_{pompe}$ = Puissance des pompes en kW ;
- $NHEPP$ = Nombre d'Heures Equivalentes Pleine Puissance en heure.

La puissance de la pompe peut être estimée à partir de la formule suivante :

$$P_{elec} = \frac{Q_v * Pdc}{260}$$

Avec :

- Q_v = Débit volumique des sondes cumulées en m³/h ;
- Pdc = Pertes de charge du champ de sondes géothermiques en mCe.

$$P_{elec} = \frac{Q_v * Pdc}{260} = \frac{36 * 15}{260} = 2\ kW$$

$$E_{aux} = Puissance_{pompe} * NHEPP = 2 * 4220 = 8440\ kWh$$

Donc :

$$SCOP_{global} = \frac{E_{calorifique\ totale}}{E_{PAC} + E_{aux}} = \frac{E_{chaud} + E_{froid}}{E_{PAC} + E_{aux}} = \frac{480683 + 145939}{111739 + 25748 + 8440} = 4.29$$

16.5 Montant indicatif des subventions

Le calcul du montant d'aide indicatif proposé par l'ADEME est basé sur les tableaux suivants :

Tableau 19 : Aide forfaitaire en €/MWh EnR pour la production de chauffage ou de refroidissement

	Production de CHAUD	Production de FROID
Technologie	Aide forfaitaire en €/MWh EnR/an (sur 20 ans) en mode chaud	Aide forfaitaire en €/MWh EnR/an (sur 20 ans)
PAC sur sondes et géostructures énergétiques	50 €/MWh EnR	13 €/MWh EnR
PAC sur échangeurs compacts géothermiques	44 €/MWh EnR	13 €/MWh EnR
PAC sur eau de nappe, sur eau de mer et sur eaux usées	25 €/MWh EnR	13 €/MWh EnR

Pour la production de froid renouvelable issue d'une PAC géothermique, les MWh EnR&R sont comptabilisés selon la méthode définie dans l'acte délégué de la Commission Européenne.

La formule est donnée ci-dessous :

$$Production\ d'\text{ENR\&R} = Production\ utile\ de\ froid\ issu\ de\ la\ PAC * \frac{SEER - 3.2}{10.6}$$

$$Production\ d'\text{ENR\&R} = 145.939 * \frac{5.67 - 3.2}{10.6} = 34.00\ MWh$$

En cas d'installation géothermique pour le CNRS Rousset, la mise en place d'un système géothermique pourrait se voir attribuer une subvention de l'ADEME de :

$$\begin{aligned} Aide\ financière\ ADEME &= 368.4 * 50 * 20 + 34 * 20 * 20 \\ &= 368\ 400 + 13\ 600 = 382\ 000\ € \end{aligned}$$

16.6 Enveloppe budgétaire prévisionnelle

Les tableaux ci-dessous présentent l'enveloppe estimative pour l'installation géothermique (phase de reconnaissance, champ de sondes, local technique dédié à la géothermie).

Tableau 20 : Enveloppe budgétaire prévisionnelle

Catégories d'investissement	Désignation	Prix (€ HT)
Phase de conception	Etude de faisabilité géothermique	7 700 €
	Etude des besoins thermiques avec STD	7 200 €
	Forage de reconnaissance	19 000 €
	Test de réponse thermique	4 500 €
Phase d'exécution (lot géothermie)	Forages définitifs	411 480 €
	Raccordement horizontaux	102 900 €
	Equipement en local technique	4 500 €
Phase d'exécution (lot CVC)	Fourniture et installation de la PAC	85 000 €
	Liaisons hydraulique primaire géothermie	45 000 €
	Hydraulique primaire / PAC géothermie	46 000 €
	Autres (ballon tampon, régulation...)	44 000 €
	Appoint aérothermique	120 000 €
Subventions pour la phase de conception		-26 880 €
Subventions "Fonds Chaleur"		-382 000 €
Subventions Région PACA		-258 608 €
Côté total estimatif (sans subvention)		897 280 €
Côté total estimatif (avec subventions)		229 792 €

L'hypothèse retenue pour l'attribution des aides de la région PACA a été calculée sur 35% de l'investissement global, hors forage de reconnaissance, TRT, appoint air/eau et AMO géothermique.

17 Bilan économique et environnemental par rapport à une solution de référence

17.1 Données d'entrée pour les analyses technico-économiques et environnementales

Le cahier des charges de l'ADEME préconise de réaliser une comparaison économique et environnementale entre la solution géothermique envisagée et une solution de référence ou actuelle. Dans ce contexte, la solution de référence retenue sera une pompe à chaleur air/eau, pour la production de chaud et une partie de la production de froid. L'appoint des besoins en froid se fera avec les groupes froids existant.

Hypothèses du coût de l'énergie et de l'exploitation relatif à la solution géothermique PAC eau/eau :

- Prix moyen du kWh tarif jaune en France en 2025 : 0.2300 € TTC / kWh ;
- Coût de l'appoint aérothermique : 120 k€ HT ;
- Evolution du prix de l'électricité : 4% an ;
- Coût de l'entretien de la PAC eau/eau : (450 € + 2€/MWh) /an ;
- Coût de l'entretien de la PAC air/eau : (550 € + 4€/MWh) /an ;
- Provision pour remplacement, installation et/ou pièces défectueuses : 3% du coût pompe à chaleur eau glycolée/eau par an ;
- Provision pour remplacement, installation et/ou pièces défectueuses : 5% du coût pompe à chaleur air/eau par an ;
- Rejet de CO₂ relatif à de la consommation électrique pour le chauffage : 70 gCO₂/kWh ;
- SCOP moyen sur une année de l'installation géothermique (chaud, froid et auxiliaires) : 4.29 ;
- SCOP moyen de l'appoint aérothermique : 2.5 ;
- Puissance installée de l'appoint aérothermique : 100 kW ;
- Puissance circulateur côté sondes : 2.00 kW

Ici, nous supposons que les 5% restants des besoins en chauffage et les 1% restant des besoins de rafraîchissement seront couverts par l'appoint aérothermique.

Hypothèses du coût de l'énergie et de l'exploitation relatif à la solution aérothermique PAC air/eau :

- Prix moyen du kWh tarif jaune en France en 2023 : 0.2300 € TTC/ kWh ;
- Puissance de la PAC air/eau : 250 kW ;
- Prix de l'installation aérothermique : 150 k€ ;
- Evolution du prix de l'électricité : 4% an ;
- Coût de l'entretien de la PAC air/eau : (550 € + 4€/MWh) /an ;
- Provision pour remplacement installation et/ou pièces défectueuses : 5% du coût pompe à chaleur air/eau par an ;
- Rejet de CO₂ relatif à de la consommation électrique pour le chauffage : 70 gCO₂/kWh ;
- SCOP moyen sur une année de l'installation aérothermique (chaud et froid) : 2.5 ;

Dans ce scénario, nous supposons que la PAC air/eau (solution de référence) sera dimensionnée sur une puissance de 250 kW, permettant de couvrir l'ensemble des besoins

12.2 Analyse technico-économique

Tableau 21 : Comparaison économique de la solution géothermique envisagée avec une solution de référence aérothermique air/eau

CNRS - Station de primatologie	Situation de référence - PAC air/eau avec appoint électrique		Situation envisagée géothermique avec appoint aérothermique	
	CHAUD	FROID	CHAUD	FROID
Besoins totaux kWh	506 621	147 492	506 621	147 492
Besoins couverts par la PAC	506 621	147 492	480 683	145 939
COP de la PAC	2,50	2,50	4,31	5,67
Puissance de la PAC (kW)	250	250	160	120
Consommation électrique PAC (kWh)	202 648	58 997	111 551	25 731
Consommation électrique des auxiliaires (kWh)	-	-	6 009	2 432
COP de l'appoint	Pas d'appoint	Pas d'appoint	2,5	2,5
Consommation électrique appoint (kWh)	Pas d'appoint	Pas d'appoint	10 375	621
Production d'ENR&R lié à l'appoint (kWh)	Pas d'appoint	Pas d'appoint	15 562	-
Production d'ENR&R totale (kWh)	303 972	-	384 694	34 030
Consommation électrique totale (kWh)	202 648	58 997	127 935	28 785
NHEPP	2 026	590	3 004	1 216
kg CO2	14 185	4 130	8 955	1 972
Investissement (€ HT)	150 000 €		878 450 €	
Coûts d'exploitation (par an sur 20 ans)				
Coût énergie P1 (€ TTC)	89 600 €		54 084 €	
Coût Entretien P2 (€ TTC)	1 597 €		1 335 €	
Coût Maintenance P3 (€ TTC)	7 500 €		3 600 €	
Total (€ TTC)	98 696 €		59 019 €	
Economies annuelles (€/an)	39 677 €			
TRI (Brut) entre la solution de référence et la solution géothermique	18,4 ans			
Subvention ADEME	0 €		382 000 €	
Subvention Région (montant estimatif)	0 €		232 950 €	
Subvention phase de conception	0 €		26 880 €	
Reste à financer	150 000 €		236 620 €	
Financement de l'opération	0,00%		70,00%	
TRI (Brut) entre la solution de référence et la solution géothermique avec subventions	2,2 ans			

Le tableau ci-dessus permet de réaliser une première comparaison économique de la solution géothermique envisagée et d'une solution de référence en pompe à chaleur air/eau comme suggéré dans le cahier des charges de l'ADEME « *Etude de faisabilité mise en place de pompe(s) à chaleur géothermique(s) sur aquifère superficiel ou sur champ de sondes* ».

Au vu des hypothèses retenues et des subventions que pourraient se voir attribuer le projet du CNRS Rousset, le temps de retour sur investissement brut serait de :

$$TRI_{brut} = \frac{Investissement_{géothermie} - Investissement_{PAC\ air/eau}}{Coût\ annuel_{PAC\ air/eau} - Coût\ annuel_{géothermie}} \simeq 2\ ans$$

La subvention accordée par la région a volontairement été plafonnée à 232 950 €, ce qui permet de ne pas dépasser un taux de subvention de 70 %.

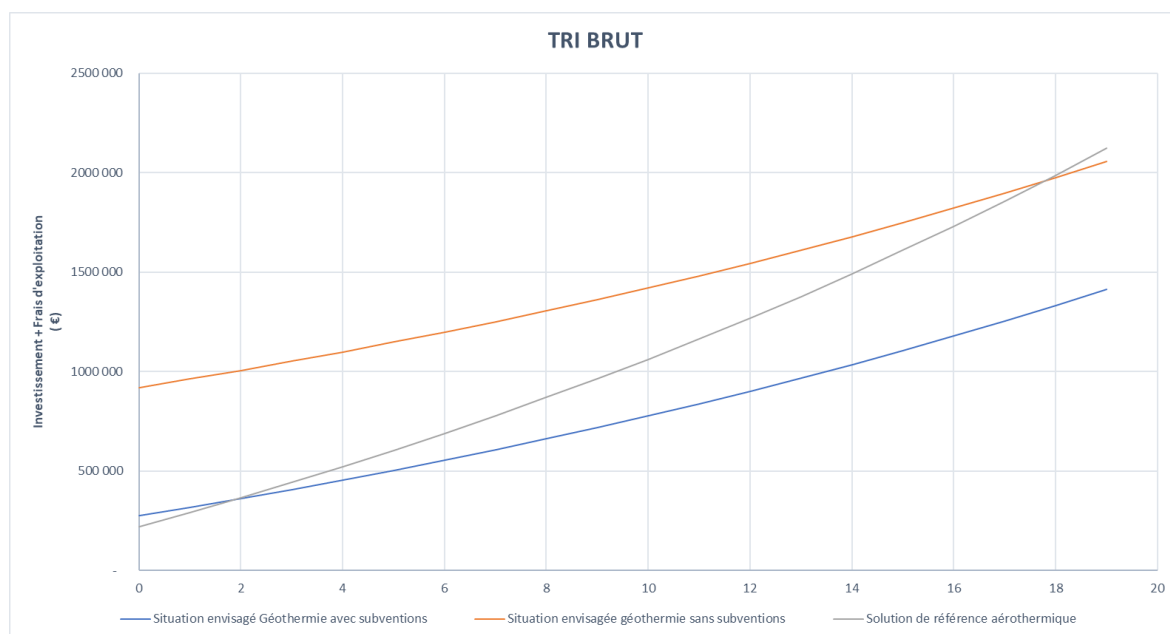


Figure 52 Graphique du temps de retour sur investissement brut entre la solution géothermique envisagée et la solution de référence air/eau

Compte tenu des hypothèses prises depuis le début de cette étude (besoins des bâtiments, couverture des besoins en chaud et en froid, caractéristiques thermiques du sous-sol, régime de température dans les sondes, aides de l'ADEME et de la région PACA ...), la différence d'investissement entre la solution de référence air/eau et la solution géothermique est de :

$$\text{Différence d'investissement} = \text{Investissement}_{\text{géothermie}} - \text{Investissement}_{\text{aérothermie}}$$

$$\text{Différence d'investissement} = 236\,620 - 150\,000 = 86\,620 \text{ € HT}$$

Si on prend comme hypothèse que le surplus d'investissement lié à la solution géothermique est couvert par un crédit sur 15 ans, alors le coût annuel de ce crédit serait de 5 774 €/an.

Enfin, si on analyse la somme des dépenses annuelles entre la solution aérothermique et la solution géothermique, on remarque que **dès la première année, le coût de la solution géothermique est plus faible que le coût de la solution aérothermique.**

Coût annuel géothermie année 0 :

$$\begin{aligned} \text{Coût annuel}_{\text{géothermie année 0}} &= \text{Investissement}_{\text{année 0}} + \text{Exploitation}_{P1+P2+P3+\text{appoint}} + \text{remboursement crédit} \end{aligned}$$

$$\text{Coût annuel}_{\text{géothermie année 0}} = 150\,000 + 40\,981 + 5\,774 = 196\,755 \text{ €}$$

*P1 équivaut à la première année d'exploitation, avant hausse annuelle du kWh électrique (37862 €)

Coût annuel aérothermie année 0 :

$$\text{Coût annuel}_{\text{aérothermie année 0}} = \text{Investissement}_{\text{année 0}} + \text{Exploitation}_{P1+P2+P3}$$

$$\text{Coût annuel}_{\text{aérothermie année 0}} = 150\,000 + 69\,274 = 219\,274 \text{ €}$$

Dès la première année d'exploitation du système, la solution géothermique permet de réaliser des économies de l'ordre de 22 k€/an. Ces économies seront évidemment plus importantes une fois le remboursement du crédit éventuel terminé.

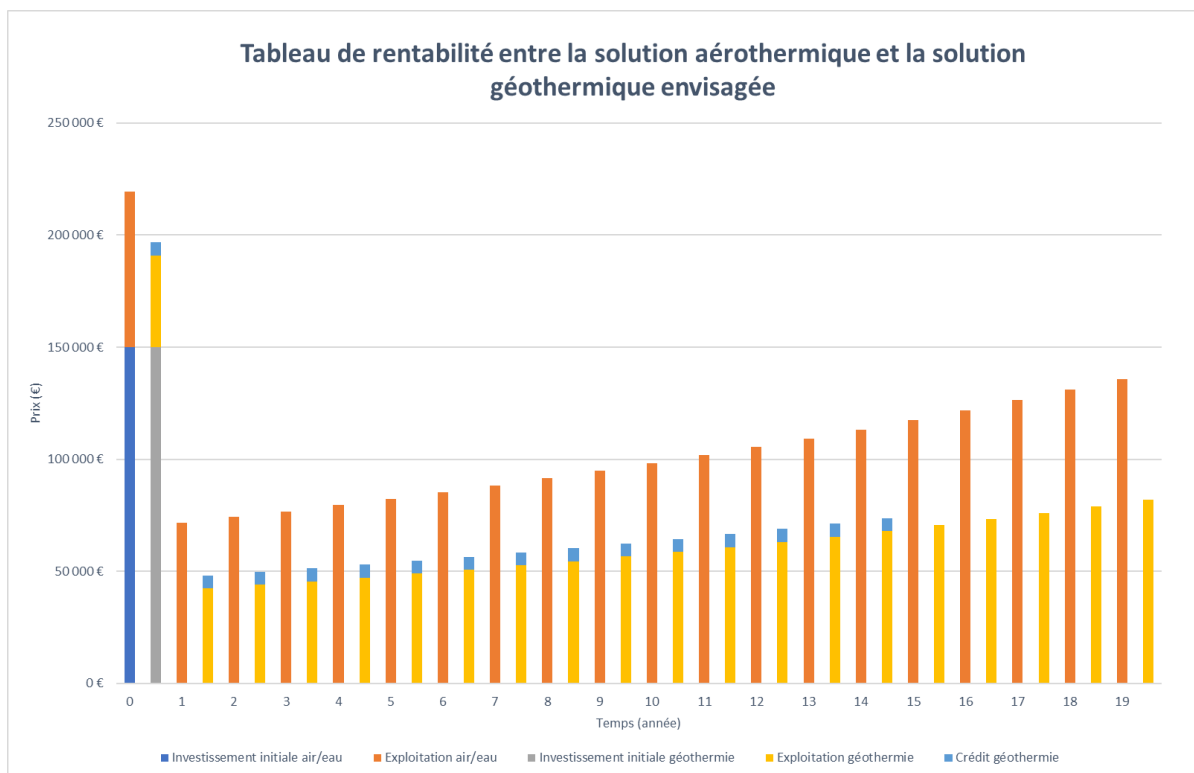


Figure 53 : Tableau de rentabilité entre la solution de référence air/eau et la solution géothermique

17.3 Bilan environnemental

Le tableau ci-dessous permet de comparer les rejets de CO₂ /an entre la solution géothermique et la solution de référence d'une pompe à chaleur air/eau.

Tableau 22 : Comparaison environnemental de la solution géothermique envisagée et la solution de référence PAC air/eau

Critère de comparaison	Solution de référence PAC air/eau	Solution géothermique envisagée
Energie totale à produire (MWh/an)	654,113	
Consommation électrique de la PAC et de ses auxiliaires (MWh/an)	261,65	145,72
SCOP de l'installation (géothermie et référence)	2,50	4,31
Production d'ENR&R par l'installation (géothermie et référence)	303,97	418,72
Consommation électrique de l'appoint (MWh/an)	Pas d'appoint	11,00
Part d'ENR&R sur l'installation finale	60,00%	76,04%
Emission CO ₂ (t/an)	18,32	10,97

La mise en œuvre d'une solution de géothermie sur sondes devrait permettre d'obtenir environ 76 % de part d'EnR dans la production d'énergie et de réduire de 40 % les émissions de CO₂ par rapport à une solution de pompe chaleur air/eau (économie d'environ 7 tonnes de CO₂/an).

18 Conclusion

Dans le cadre du projet du CNRS Rousset pour la station de primatologie, le Maître d'Ouvrage a souhaité étudier la possibilité de recourir à une solution de géothermie très basse énergie, permettant de chauffer et rafraîchir les bâtiments.

Dans un premier temps, les besoins du projet ont été identifiés par le bureau d'études ENERSIM, en accord avec la Maîtrise d'Ouvrage, sous la forme d'une STD (Simulation Thermique Dynamique) permettant d'avoir accès aux appels de puissance heure par heure sur une année typique de fonctionnement.

Dans le cahier des charges de l'ADEME « Etude de faisabilité mise en place de pompe(s) à chaleur géothermique(s) sur aquifère superficiel ou sur champ de sondes » en date du 17/12/2020, cette STD est obligatoire pour dimensionner un futur champ de sondes géothermiques et ainsi proposer des scénarios de couverture optimisés.

Dans un second temps, une étude du contexte réglementaire et environnemental a permis de démontrer la faisabilité de réaliser une installation géothermique de type GMI. Le contexte hydrogéologique au droit du projet a également été étudié et démontre la pertinence de répondre aux besoins du projet avec une solution sur sondes.

Le scénario géothermique proposé au Maître d'Ouvrage, mettant en œuvre 28 sondes géothermiques, présente des coûts d'investissement optimisés par rapport à une solution géothermique couvrant 100% des besoins.

Effectivement, le surplus d'investissement associé à la solution géothermique par rapport à une solution aérothermique, une fois les aides déduites, s'élève à 87 k€.

Cet investissement supplémentaire sera totalement amorti au bout de 2 années d'exploitation.

L'analyse technico-économique du scénario a permis de mettre en évidence un temps de retour sur investissement particulièrement court pour le projet géothermique du CNRS Rousset. Les principales raisons en sont les suivantes :

- Des subventions permettant de couvrir la quasi-totalité des coûts des forages et des raccordements (à confirmer avec l'ADEME et la Région PACA) ;
- Des caractéristiques favorables du sous-sol attendues pour la géothermie sur sondes sèches ;
- Des performances élevées attendues de la future installation géothermique, résultant d'un équilibre thermique satisfaisant entre l'énergie injectée et celle soutirée du sous-sol. Cet équilibre "recharge" thermiquement le champ de sondes, saison après saison et permet d'optimiser sa taille ;

Un forage de reconnaissance a été réalisé par la société LUROFORAGE en avril 2025, permettant de confirmer le contexte géologique et hydrogéologique de la zone d'étude, mais aussi d'établir précisément les caractéristiques thermodynamiques du sous-sol concerné par le projet du CNRS Rousset.

Thermiquement, l'ensemble des dispositifs proposés permet une exploitation pérenne avec une incidence thermique négligeable sur l'environnement. Il est important de souligner que la disposition géométrique du champ de sondes géothermiques a une influence déterminante sur sa température. Il est donc impératif de la respecter. En cas de modification de cette disposition au cours des phases ultérieures du projet, la géomodélisation devra être reprise en conséquence.

Sur le plan réglementaire, la mise en œuvre de chacun de ces dispositifs géothermiques sera soumise au régime de la déclaration au titre de la Géothermie de Minime Importance (GMI). Cette démarche permettra d'assurer la conformité de l'installation avec la réglementation et de garantir une utilisation responsable de la géothermie dans le projet.

D'un point de vue environnemental, la mise en œuvre d'une solution de géothermie sur sondes devrait permettre d'obtenir environ 76 % d'énergie provenant de sources renouvelables (issue directement des sondes géothermiques) et de réduire les émissions de CO₂ de 40 % par rapport à une solution utilisant une pompe à chaleur air/eau.

Cette alternative écologique s'avère donc particulièrement avantageuse en termes d'efficacité énergétique et de réduction des impacts environnementaux liés à la production d'énergie.

Les régimes de température contenus dans le champ de sondes et les émetteurs de chaleur prévus pour ce projet (majoritairement ventilo-convecteurs) **permettent d'assurer un fonctionnement performant de la géothermie**. De plus, une loi d'eau correctement dimensionnée pourrait contribuer à réduire la température en sortie du condenseur, ce qui aurait pour effet d'augmenter les performances de la PAC tout au long de sa phase d'exploitation.

Cependant, il faudra rester vigilant quant aux régimes de températures à maintenir dans les sondes géothermiques (entre 1°C et 5°C pour la production de chauffage et entre 11°C et 18°C pour la production de froid).

Ces régimes de températures devront être confirmé par la Maitrise d'œuvre fluide du projet, afin de garantir une performance optimale de l'installation géothermique. La maîtrise précise de ces températures joue un rôle essentiel dans l'efficacité énergétique globale du système et contribuera à maximiser les avantages de la géothermie sur ce projet.

Enfin, il est crucial de concevoir un schéma hydraulique assurant une utilisation cohérente entre la pompe à chaleur géothermique et les appoints aérothermiques. Ce schéma est crucial pour optimiser l'utilisation de la PAC et garantir une efficacité énergétique maximale tout en prenant en compte la possibilité d'un apport complémentaire si nécessaire.

19 Bibliographie

Plan de Prévention des Risques Naturels - Mouvements différentiels de terrain. 2013. BRGM. Disponible à l'adresse : <https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/La-prevention/Les-plans-de-prevention-des-risques-naturels-ou-miniers-approuves-dans-les-Bouches-du-Rhone/ROUSSET>

Plan Local d'Urbanisme de la commune de Rousset. 2019. Aix Marseille Provence. Disponible à l'adresse : <https://plui.ampmetropole.fr/plui/Rousset%20>

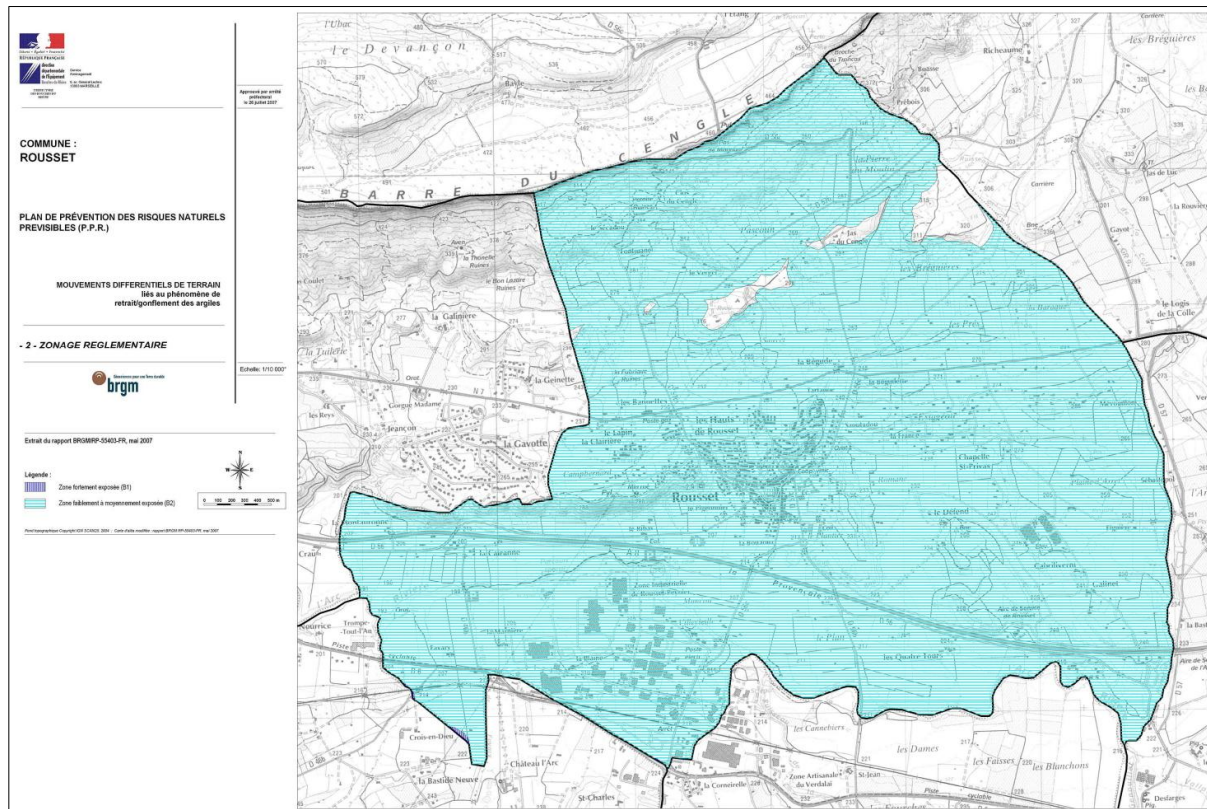
Station de mesure « Arc à Rousset 1 » (n°06194800). Mis à jour en 2024. EauFrance. Disponible à l'adresse : <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/station-06194800>

Station de mesure « Arc à Rousset 3 » (n°06194810). Mis à jour en 2019. EauFrance. Disponible à l'adresse : <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/station-06194810>

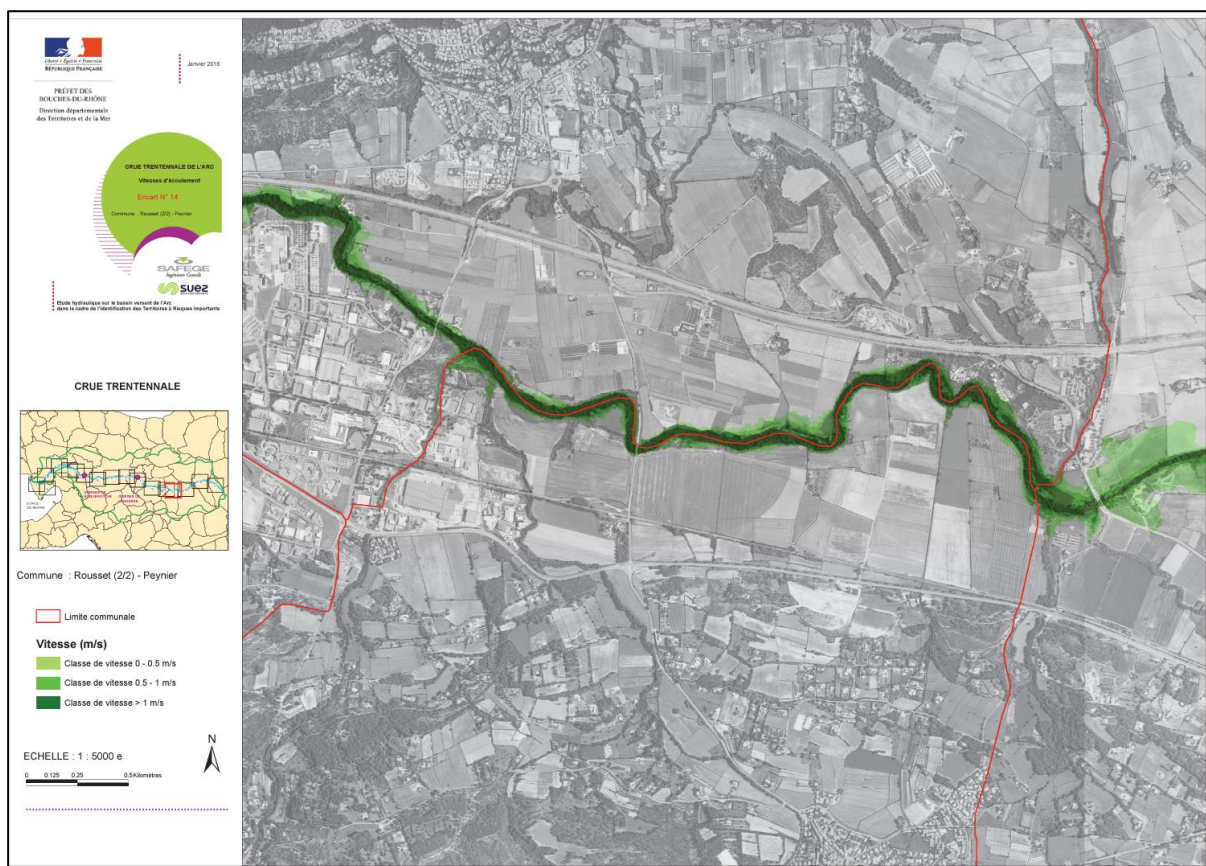
Station hydrométrique « L'Arc à Meyreuil [Pont de Bayeux] » (n° Y402 2010). Mis à jour en 2023. HydroPortail - EauFrance. Disponible à l'adresse : <https://hydro.eaufrance.fr/sitehydro/Y4022010/fiche>

Sites internet : eaufrance.fr, geoportail.fr, infoterre.fr, BDLISA

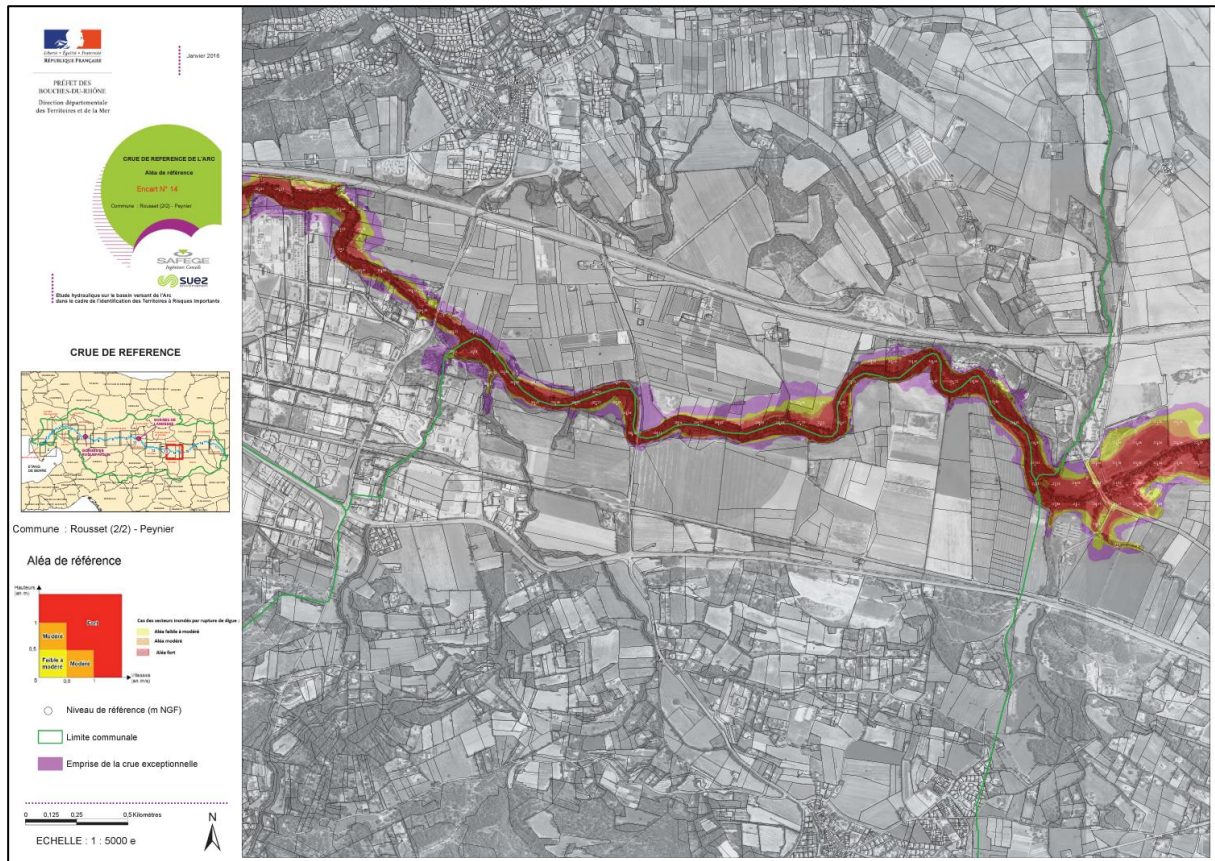
20 Annexes



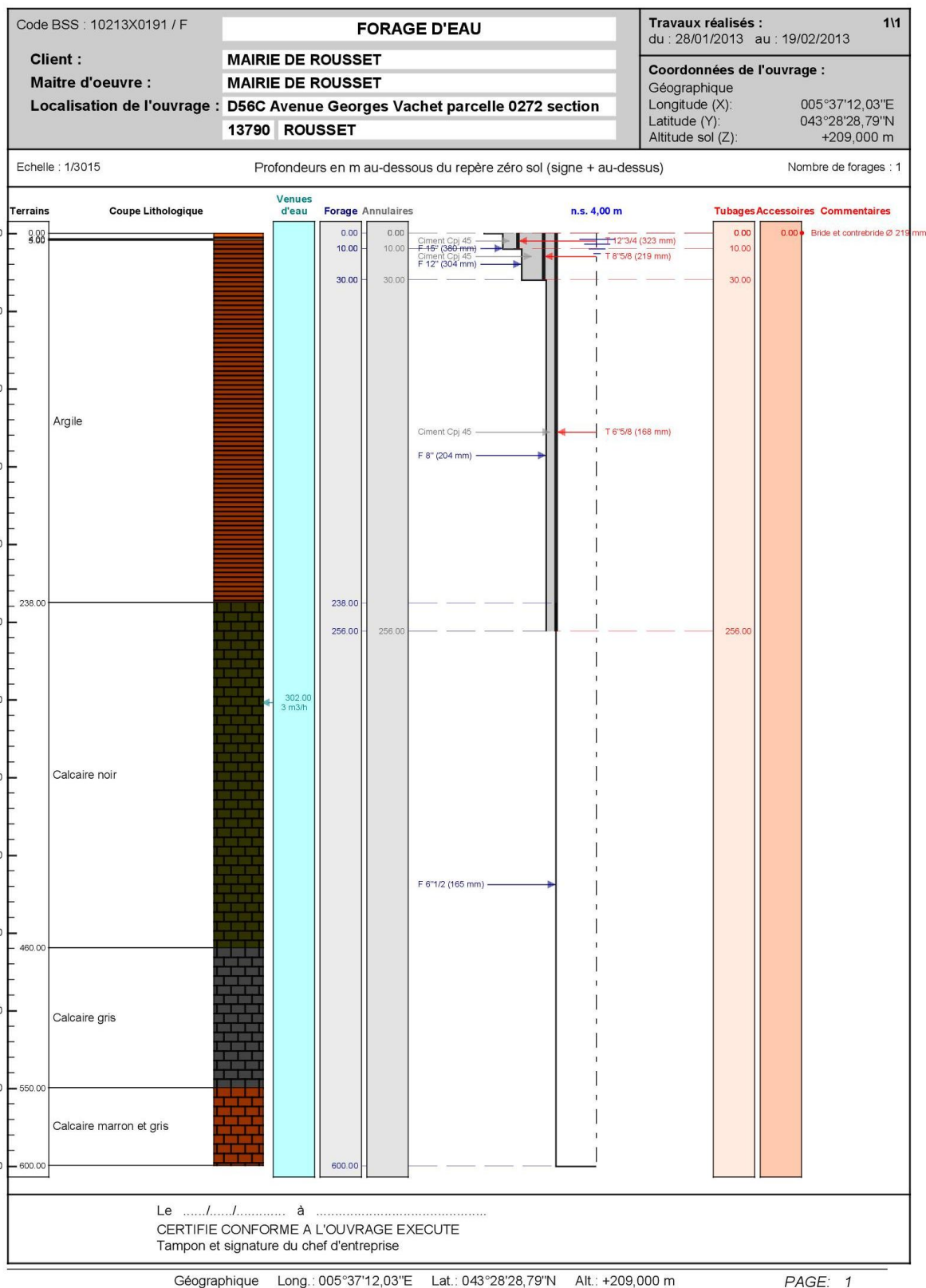
Annexe 1 : Zonage du plan de prévention des risques naturels prévisibles - Mouvements différentiels de terrain (bouches-du-rhone.gouv.fr)



Annexe 2 : Cartographie de la vitesse d'écoulement de l'Arc pour une crue trentennale (Étude hydraulique sur le bassin versant de l'Arc dans le cadre de l'identification des Territoires à Risques Importants, 2015, SAFEGE, DDTM13)



Annexe 3 : Cartographie de l'aléa de référence de la crue de référence de l'Arc (Étude hydraulique sur le bassin versant de l'Arc dans le cadre de l'identification des Territoires à Risques Importants, 2015, SAFEGE, DDTM13)



Annexe 4 : Log du forage BSS002JNWU (Infoterre)

DÉPARTEMENT : Bouches du Rhône Pièce n°

COMMUNE : TRETS Indice de classement : 1021 4 138

DÉSIGNATION : Domaine "COUSSIN" Cote du sol (z) = +240

$$x = 870.200$$
$$y = 136.260$$

Coupe établie par : **Sondeur**
Interprétation de : **UD. Eichenbaum.**

[illegible]

Annexe 5 : Log du forage BSS002JPCQ (Infoterre)

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	FORAGE		TUBAGE		Épaisseur, nature	OBSERVATIONS
	De	à	De	à		
	0	10,60	2,00		Buses en ciment	

NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE					
Date	Profondeur du forage	Profondeur du plan d'eau	Cote absolue du plan d'eau	T°	Observations
2/5/67	10,80	2,75	+237,45		

DÉBIT										
Date	Profondeur du forage	Durée	Débit m³/s	Arrêt	Cote absolue du plan d'eau	Cote absolue du niveau dynamique	Dénivelé	T°	Pois°	Observations

Archivage des documents originaux non reproduits :

Dossier instruit par : ARVOIS le 13/11/67

Mis à jour par : le

Nombre d'intercalaires : le

Dossier C jusqu'à : le

Contrôlé par : le **G. DUROZOT**

DÉPARTEMENT : BOUCHES DU RHONE N° B.R.G.M. d'enregistrement :

COMMUNE : 110 TRETS
 DÉSIGNATION : Puits quartier Coussin

OBJET : Eau
 Date d'exécution : Ancienne
 Profondeur finale : 10m 60

Nature : Puits
 Mode de forage :

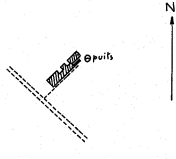
Maître de l'œuvre :
 Propriétaire en 19 : 67 SUMEIRE
 Entrepreneur :
 Travaux conseillés ou suivis par :
 Origine des documents :

Hauteur du tubage ou de la margelle dépassant le sol : 0,20
 Accessibilité : Cimenté, recouvert d'une dalle à l'est des bâtiments.
 Mode d'équipement :

Observations : Besoins familiaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET GÉOLOGIE :
 Argiles du Rognacien.

Échantillons :

Carte géol. au 1/80 000
 N° 235 Feuille AIX
 ATLAS AU 1/2 0 000
 Feuille AIX
 Indice de classement :
 N° 1/8 N° d'entrée aux archives
 1021 4 75
 Archivage D
 Coordonnées Lambert : X = 870,280
 Y = 136,260
 Zone SUD III
 Cote du sol : EPD = + 240
 à l'orifice : ENG =
 RNG =
 Carte détaillée ou croquis côté :


050410
 10214X0075

Annexe 6 : Log du forage BSS002JNZZ (Infoterre)

DÉPARTEMENT : 13 Pièce n° 1
 COMMUNE : TRETS Indice de classement : 1 021 4 147
 DÉSIGNATION : Forage à la Marseillaise Cote du sol (z) = + 229

Coupe établie par : ARVOIS
 Interprétation de : M. "

PROFONDEURS DE A	NATURE DES TERRAINS	INTERPRÉTATION	COTE DU TOIT
0 0,50	Terre végétale argilo-sableuse rouge	ALLUVIONS	
0,50 1,50	Argile jaune, sableuse avec graviers plus ou moins roulés de calcaire blanc et rose		
1,50 2	calcaire blanchâtre dur		
2 3	Argile blanchâtre plastique, très humide et petit passage de calc tendre		
3 5	Argile bariolée rouge et verte avec passage gréseux	ROGNACIEN	
5 6	Grès beige, dur à ciment calcaire avec pe- tits passages argileux		
6 13	Argile sableuse beige clair		
13 15	Argile marron		
15 22	Argile rouge		
22 24	Argile rouge sableuse, légèrement humide	ROGNACIEN	
24 26	Argile rouge très sableuse, légèrement humide (ou passage de grès tendre et d'argile)		
26 32	Argile rouge sableuse		
32 36	Sable rougeâtre, à grain très fin, argileux finement micacé		
36 44	Argile rouge sableuse		



060892
 10214X0147

Annexe 7 : Log du forage BSS002JPCZ 1/2 (Infoterre)

DÉPARTEMENT : 13 Pièce n° 2

COMMUNE : TRETS Indice de classement :

1 021	4	147
-------	---	-----

DÉSIGNATION : Forage à la Marseillaise (suite) Cote du sol (z) = _____

Coupe établie par :
Interprétation de : M.

[illegible]

Annexe 8 : Log du forage BSS002JPCZ 2/2 (Infoterre)

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	FORAGE		TUBAGE		OBSERVATIONS
	De	à	De	à	
		4" 1/4			
HYDROLOGIE	Repère altimétrique : Cote du repère : NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE				
	Date	Profondeur du forage	Profondeur du plan d'eau	Cote absolue du plan d'eau	Observations
	3.6.64		3,80	+210,20	
	DÉBIT				
	Date	Profondeur du forage	Durée	Débit m ³ /h	Cote absolue du niveau dynamique
Archivage des documents originaux non reproduits :					
Dossier instruit par : B. DELLERY le 1964 Mis à jour par : le Nombre d'intercalaires : 1 le Dossier C. jusqu'au : le Contrôlé par : le					

DÉPARTEMENT : BOUCHES-DU-RHÔNE N° B.R.G.M. d'enregistrement : 1963/1676

COMMUNE : ROUSSET DÉSIGNATION : Sondeage 377 . Pr RE2 Mission 1361	CARTE GÉOL. AU 1/80 000 N° 235 AIX
OBJET : Sismique Date d'exécution : 1964 Profondeur finale : 16,50	ATLAS AU 1/2 000 Feuille AIX Indice de classement : N° 1021 7 19
Nature : Sondage Mode de forage : Wagon drill	Archiver : D
Maître de l'œuvre : C.E.P. Propriétaire en 19 : Entrepreneur : C.G.G. Travaux conseillés ou suivis par : S. Géologique de la C.E.P. Origine des documents : vus sur place	Coordonnées Lambert : X = 868,15 Y = 136,19 Zone Sud II : Cote du sol (Z) : EPD = + 214 à l'orifice : ENG = RNG =
Carte détaillée ou croquis côté : voir plan à l'intérieur	
Hauteur du tubage ou de la margelle dépassant le sol : Accessibilité : dans une cuvette formée par l'Arc Mode d'équipement :	
Observations :	
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET GÉOLOGIE : 0 à 6m Argile sable et gravier Alluvions de l'Arc 6 à 16,50 Marhe Begudien	
Échantillons :	

050413
 102170019

Annexe 9 : Log du forage BSS002JQDB (Infoterre)