CNRS
Délégation régionale Occitanie Est
1919 route de Mende
34293 Montpellier

CNRS – CAMPUS RDM



RAPPORT D'ETUDE DE FAISABILITE GEOTHERMIQUE

Date	Indice	Rédacteur	Modifications	Remarques
30/08/2024	**0**	**T. BRIANE**		
30/08/2024	**1**	**T. BRIANE**		
22/04/2026	**2**	**T. BRIANE**	Remarques ADEME / HE	

BETSO INGENIERIE
Immeuble GREEN VALLEY
849, rue Favre de Saint Castor
34080 Montpellier
Tél : 04.67.69.12.20
Courriel : contact@betso.fr

SOMMAIRE

1. DESCRIPTION GENERALE DE L'OPERATION 4

1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE 4

1.2. CONTEXTE DU PROJET ET SITUATION 4

1.3. INTERVENANTS 5

2. ETUDE DES BESOINS THERMIQUES ET FRIGORIQUES 6

2.1. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS TECHNIQUES EXISTANTES 6

2.1.1. Equipements de production 6

2.1.2. Alimentation électrique 8

2.1.3. Réseaux secondaires 9

2.2. ANALYSE DES CONSOMMATIONS EXISTANTES 10

2.2.1. Besoins chaud 13

2.2.2. Besoins froid 14

2.3. ANALYSE DE LA PERFORMANCE DU BATIMENT – POTENTIEL ENR 14

2.4. DETERMINATION DE LA PUISSANCE TOTALE A INSTALLER ET REPARTITION (PAC/APPOINT) 15

2.4.1. Détermination de la puissance de la pac eau/eau et de l'appoint 15

2.4.2. Courbes monotones du projet détaillées 17

2.4.3. Récapitulatif 19

3. CARACTERISATION DES RESSOURCES GEOTHERMIQUES 22

3.1. CONCLUSION DE L'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE 22

3.2. CONCLUSION DU TRT 23

4. ADEQUATION DES BESOINS EN SURFACE AVEC LES RESSOURCES DU SOUS-SOL 24

4.1. DESCRIPTION DE LA SOLUTION GEOTHERMIE 24

~~4.1.1. Scenario 1a ..... 24~~

~~4.1.2. Scenario 1b ..... 26~~

4.1.3. Scenario 2a 28

~~4.1.4. Scenario 2b ..... 30~~

~~4.1.5. Scenario 3 ..... 33~~

4.2. DESCRIPTION DE LA SOLUTION DE REFERENCE 35

4.3. DESCRIPTION DE LA SOLUTION EXISTANTE 35

5. BILAN THERMIQUE FINAL 35

6. BILAN ECONOMIQUE 35

6.1. SOLUTION GEOTHERMIQUE 35

6.1.1. Récapitulatif des investissements liés à la pac et à l'appoint 35

6.1.2. Coûts d'exploitation prévisionnels 37

6.1.3. Subventions mobilisables 39
6.2. SOLUTION DE REFERENCE 43
6.2.1. Récapitulatif des investissements 43
6.2.2. Coûts d'exploitation prévisionnels 44
6.3. SOLUTION EXISTANTE 44
6.3.1. Récapitulatif des investissements 44
6.3.2. Coûts d'exploitation prévisionnels 44
6.4. SYNTHESE 45
7. BILAN ENVIRONNEMENTAL 46
7.1. ESTIMATION DES GAINS ENERGETIQUES ESCOMPTES 46
7.2. ESTIMATION DE LA REDUCTION DES EMISSIONS CO2 CORRESPONDANTES 46
8. CONCLUSION 47
9. ANNEXES 48

1. DESCRIPTION GENERALE DE L'OPERATION

1.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

La présente étude s'efforce de suivre la trame de cahier des charges de l'ADEME relatif aux études de faisabilité géothermique.

L'étude de faisabilité doit permettre au porteur de projet d'appréhender les éléments techniques, économiques, réglementaires et environnementaux lui permettant de se déterminer sur la faisabilité d'une telle opération. Elle requiert des compétences en hydrogéologie et en thermique et a pour objectifs de :

- Vérifier la faisabilité technique et économique du projet d'implantation d'une installation de pompe à chaleur géothermique.
- Proposer des solutions techniques adaptées au contexte et aux possibilités qu'offre le site.
- Comparer la solution géothermique aux autres possibilités en termes d'investissement, d'exploitation et d'impacts environnementaux.
- Etudier les solutions en matière de montage financier et juridique.

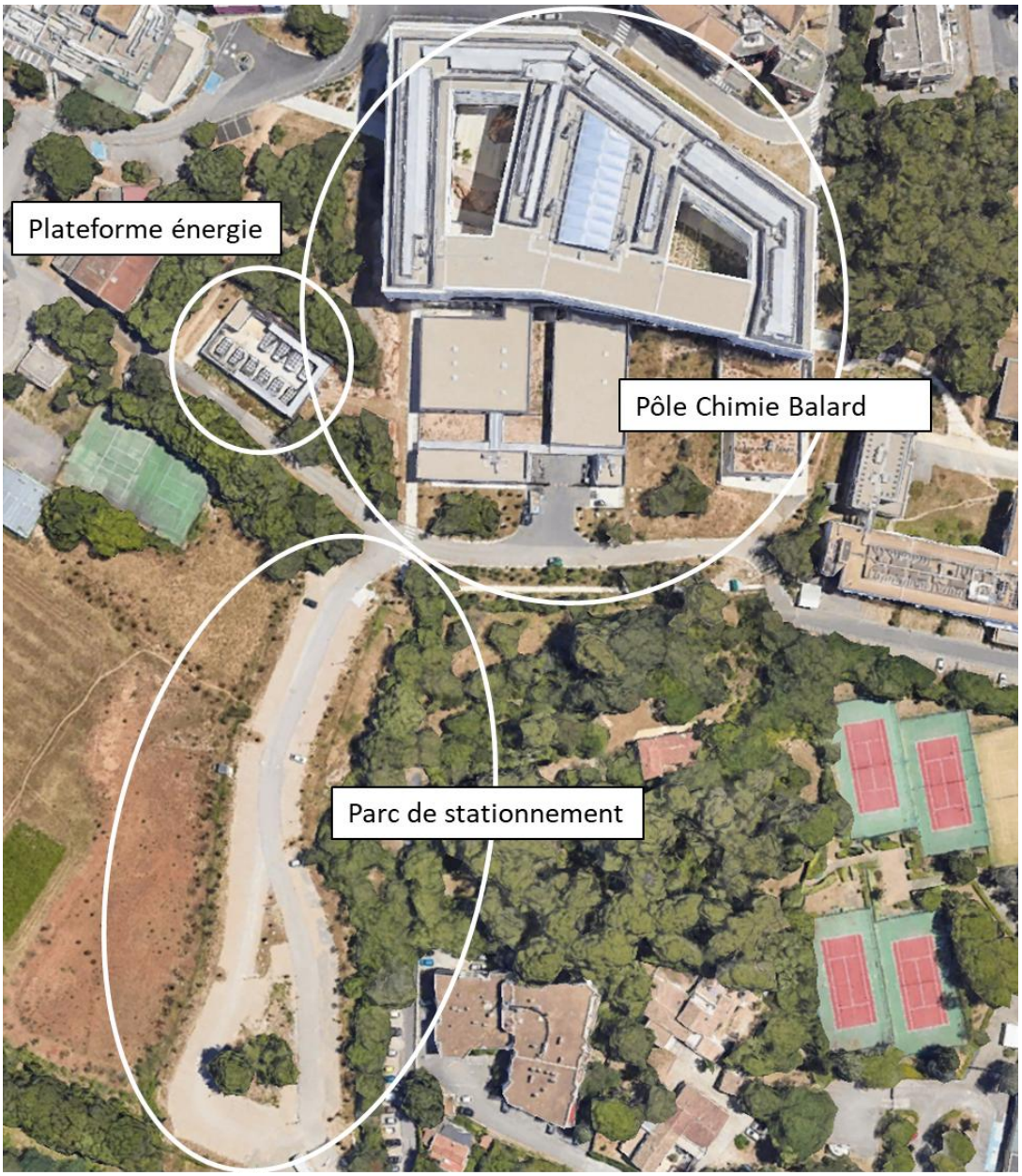
1.2. CONTEXTE DU PROJET ET SITUATION

Acteur majeur de la recherche fondamentale, le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) est un organisme public de recherche français exerçant son activité dans tous les domaines de la connaissance scientifique. Sa position singulière de multi-spécialiste lui permet d'associer les différentes disciplines scientifiques pour éclairer et appréhender les défis du monde contemporain, en lien avec les acteurs publics et socio-économiques.

La demande de cette étude de faisabilité a été initiée par les services du CNRS et porte sur le bâtiment Chimie Balard, livré en 2021. Ce bâtiment de 26 000 m² accueille l'ensemble des personnels et des équipements de recherche de deux unités qui développent la chimie de demain. Le parking situé en contrebas a été identifié comme une potentielle ressource pour y installer des sondes géothermiques et le CNRS souhaitait étudier la pertinence technico-économique d'avoir recours à ce type d'énergie pour sa production de chaud et de froid.

Le périmètre d'étude pour l'installation de géothermie correspond uniquement à l'alimentation du pôle Balard. Les autres bâtiments du campus route de Mende ne sont pas concernés par l'étude.

L'étude de faisabilité et l'analyse qui en découle seront effectuées avec un souci d'utilisation rationnelle de l'énergie (URE).



Plan de situation

1.3. INTERVENANTS

Les intervenants du projet sont les suivants :

- Valérie MARTINEZ-VINCENT - Responsable Service technique, logistique et sécurité – **CNRS**
- Akli TROUDE - Service technique, logistique et sécurité – **CNRS**
- Armand KUMMER **-** en charge de la réalisation du forage et de la sonde test **– LUROFORAGE**
- Nicolas BELLON **-** en charge de la réalisation de l'étude hydrogéologique et du TRT **– BE GEOSYNERGIE**
- Théo BRIANE **-** en charge de la réalisation de l'étude de faisabilité et de la coordination des acteurs **– BETSO**

Ils constituent le comité de pilotage au sens de l'étude de faisabilité.

NOTA : GEOSYNERGIE ET BETSO sont respectivement qualités OPQIBI 1007 et 2013

2. ETUDE DES BESOINS THERMIQUES ET FRIGORIQUES

2.1. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS TECHNIQUES EXISTANTES

2.1.1. EQUIPEMENTS DE PRODUCTION

Le bâtiment Balard est un bâtiment de recherche accueillant des usages mixtes (bureaux, salles réunions, laboratoires) sur une surface de 26 000 m² environ. De par son usage, le site nécessite une production de chaud et de froid importante et simultanée.

La production thermique et frigorique du site Balard est assurée par une plateforme énergie située à proximité du bâtiment principal.

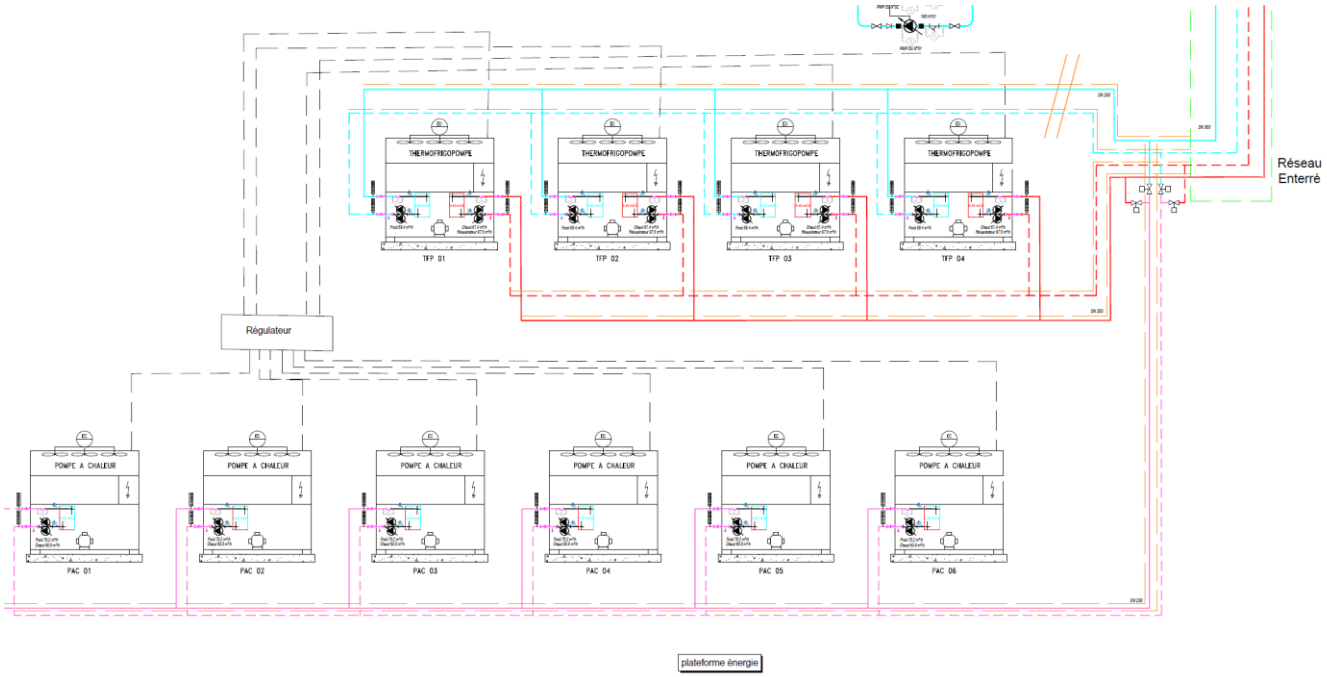
La plateforme est composée des équipements suivants :

- 4 thermofrigopompes à débit variable de 400 kW de marque RHOSS modèle WinPOWER EXP TXAETY 4440
- 6 PAC réversibles à débit variable de 400 kW de marque RHOSS modèle WinPOWER HE-A THAETY 4460

La puissance totale installée est de 4 MW.



Equipements de production de type thermofrigopompes et PAC réversibles



Extrait du schéma de principe des installations existantes

La puissance théorique de chaud issue des documents d'exécution est de **3270 kW.**

La puissance théorique de froid issue des documents d'exécution est de **3585 kW.**

Récapitulatif puissance chaude			
	Puissance minimale	Puissance maximale	Puissance prenant en compte 70% de la ventilation laboratoire (puissance minimale + 70% de la différence entre la puissance maximale et minimale)
CTA 1-7	**721,2 kW**	**901,9 kW**	**847,7 kW**
CTA labo	**1020,9 kW**	**2673,8 kW**	**2177,9 kW**
CTA bureaux (avec récup)		**138 kW**	
Terminaux labo		**104,2 kW**	
Terminaux bureaux		**0,0 kW**	
Total	**3267,9 kW**		

Récapitulatif puissance froide				
	Puissance minimale	Puissance maximale	Puissance prenant en compte 70% de la ventilation laboratoire (puissance minimale + 70% de la différence entre la puissance maximale et minimale)	Prise en compte de 70% de l'eau glacée process
CTA 1-7	**323,3 kW**	**404,7 kW**	**380,3 kW**	
CTA labo	**1142,5 kW**	**2417,8 kW**	**2035,2 kW**	
CTA bureaux (avec récup)		**99 kW**		
EG process		**625,4 kW**		**438 kW**
Terminaux labo		**1001,2 kW**		
Terminaux bureaux (hors Panneaux Rayonnants)		**0,0 kW**		
Prise en compte de 70% des dégagement machines (soit 30% des 1220kW à soustraire)		**-370,0 kW**		
Total	**3583,9 kW**			

Tableaux de dimensionnement du projet fournis par le CNRS – Phase EXE

L'appoint des PAC réversibles vers les réseaux chaud/froid alimentés en base par les thermofrigopompes est réalisé par le biais de 4 vannes deux voies motorisées. Le réseau rejoint ensuite en enterré le « local pompes » situé au sein du bâtiment.




V2V motorisées et pénétration en réseau enterré

2.1.2. ALIMENTATION ELECTRIQUE

La plateforme énergie dispose de son propre local transformateur et du TGBT associé. Une centrale de mesure est présente et permet un comptage général de la consommation électrique de la plateforme énergie. Les 10 équipements de production possèdent également un sous-comptage électrique dédié.

La puissance électrique maximale atteinte relevée sur site est de **1,283 MW**.



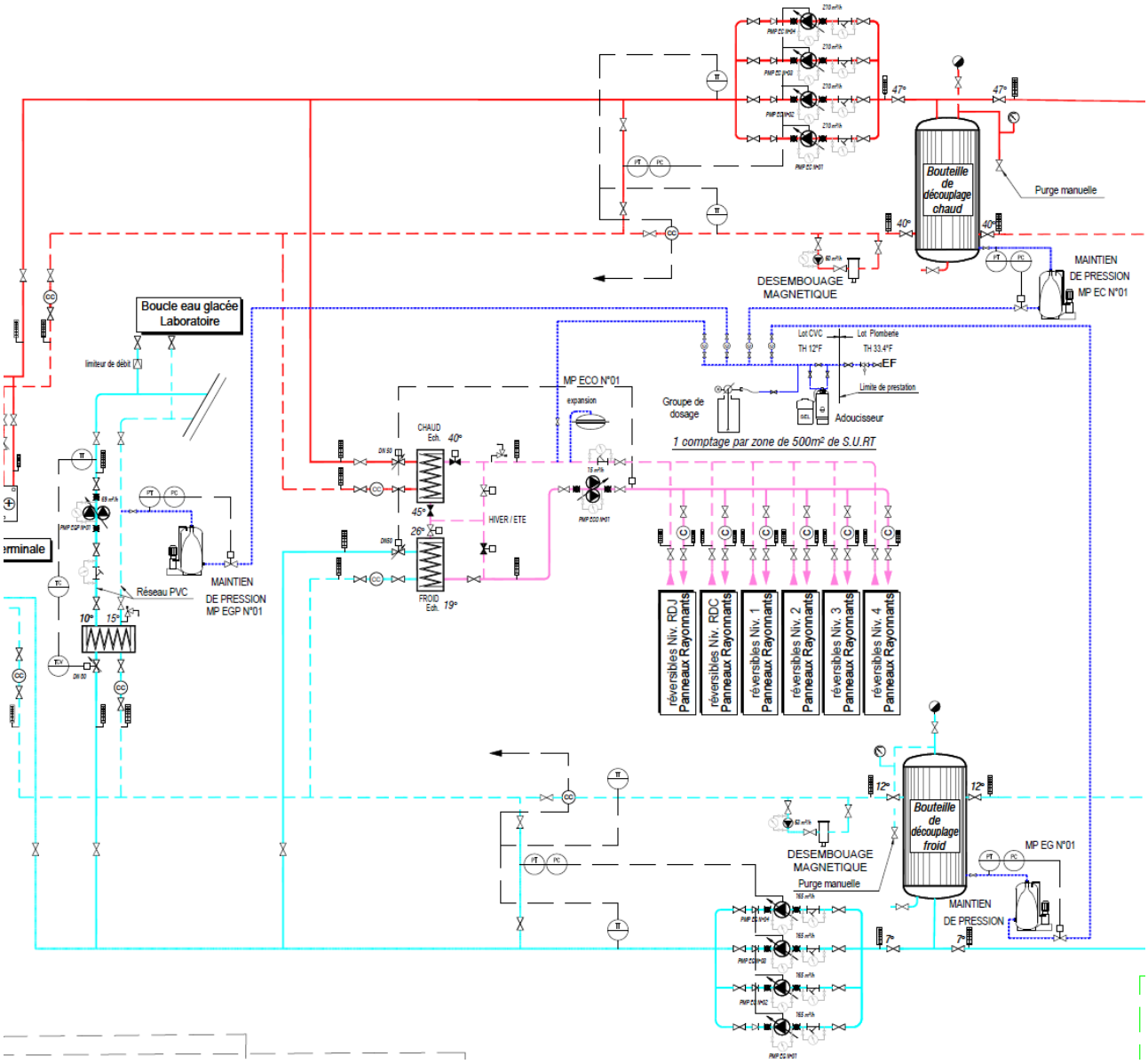




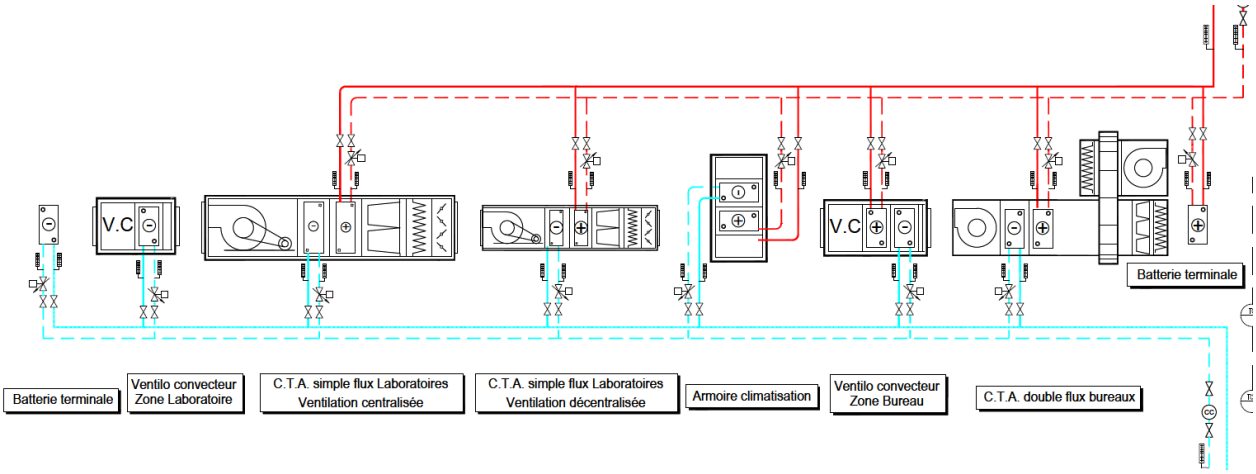

TGBT et comptages électriques

2.1.3. RESEAUX SECONDAIRES

Depuis le « local pompes », 4 pompes en cascade mettent respectivement en circulation le réseau chaud et le réseau froid. Ces deux réseaux alimentent ensuite des batteries terminales, des CTA double flux (bureaux), des ventilo-convecteurs (bureaux et laboratoires), des armoires de climatisation, des CTA simple flux de compensation centralisées et décentralisées (laboratoires) et des panneaux rayonnants réversibles.



Extrait du schéma de principe de l'installation – Découplage/stockage et distribution



Extrait du schéma de principe de l'installation – Equipements terminaux

Gestion Technique du Bâtiment

Une Gestion Technique du Bâtiment est présente sur site mais possède malheureusement des dysfonctionnements de communication importants au niveau des comptages ce qui ne permet pas une analyse fine des consommations réelles (voir chapitre suivant).

2.2. ANALYSE DES CONSOMMATIONS EXISTANTES

Les consommations existantes d'électricité de la plateforme énergie ont été communiquées par le CNRS et sont répertoriées ci-dessous. Elle représente la consommation électrique relevée mensuellement pour l'arrivée générale du tableau de la plateforme et pour chaque PAC/TFP individuellement.

	CONSOMMATION	en kW											
	JANV	FÉVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DÉC	TOTAL
TGB PLE	327 680	327 680	262 144	196 608	98 307	32 765	377 259	185 700	165 900	81 000	425 000	364 400	2 844 443
PAC A1	34 816	61 440	16 384	-	4 096	-	488 366	14 227	13 842	7 302	51 646	54 374	746 493
PAC A2	30 723	67 581	16 384	-	2 048	-	492 922	13 825	14 016	6 775	50 790	56 550	751 614
PAC A3	31 744	20 480	2 048	-	-	-	300 736	24 287	4 926	3 924	51 106	39 904	479 155
PAC A4	34 816	61 440	16 384	-	-	-	491 053	14 367	13 257	7 048	50 951	38 498	727 814
PAC A5	5 768	92 536	16 384	-	2 048	-	491 684	13 883	13 908	7 160	51 237	23 447	718 055
PAC A6	38 912	59 392	16 384	-	2 048	-	489 844	13 871	13 848	7 055	50 996	49 696	742 046
PAC A7	8 192	32 768	43 008	-	12 288	-	586 590	340	408	302	424	348	684 668
PAC A8	65 536	45 056	36 864	-	28 672	-	1 219 522	83 274	34 704	42	55 625	61 963	1 631 258
PAC A9	8 192	73 728	20 480	-	40 960	-	1 048 387	26 686	55 687	40 573	61 336	38 861	1 414 890
PAC A10	53 248	69 632	16 384	-	8 192	-	967 240	377	453	339	455	365	1 116 685
TD Cordon Chauffant	1 408	2 560	1 152	-	1 024	-	8 581	19 055	1 268	939	1 371	1 175	38 533
Eclairage	2	2	1	-	2	-	116	1	8	1	2	64	199
PC	3	6	3	-	3	-	122	3	3	3	4	2	152

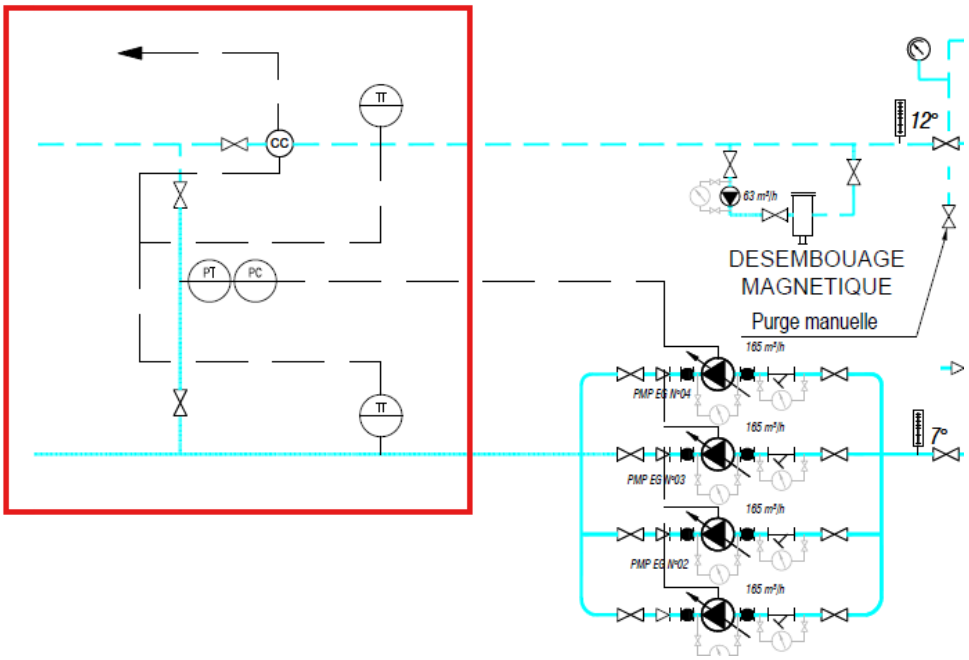
Le tableau présente une incohérence forte au niveau des consommations.

La consommation totale du TGBT PLE donne 2,84 GWh tandis que la sommes des consommations des 10 équipements de production donne 9 GWh. Cette incohérence vient principalement des données du mois de Juillet.

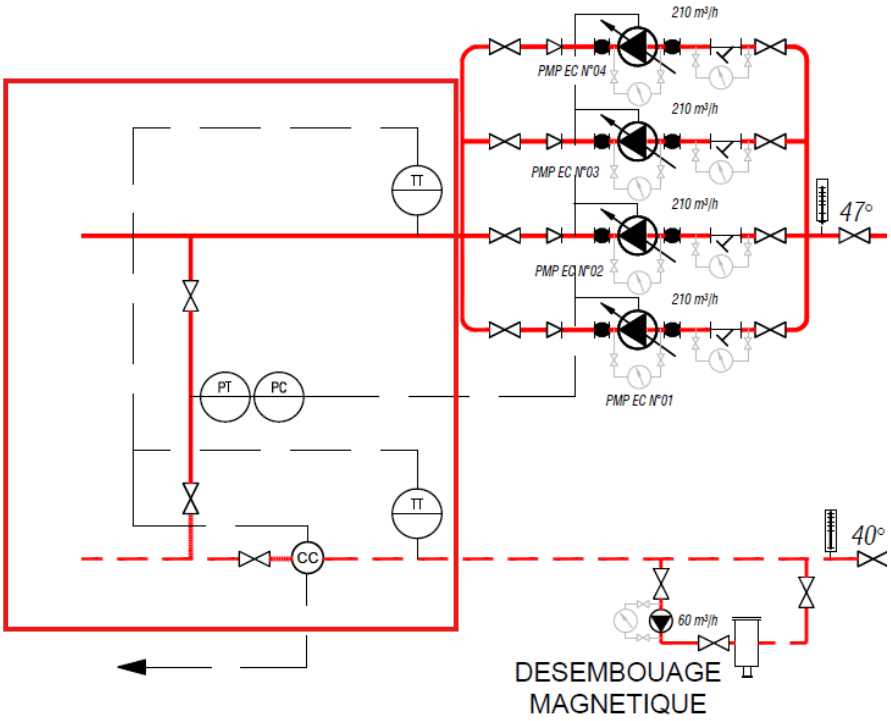
- Total équipements Juillet = 6,5 GWh (valeur incohérente)
- Conso TGBT PLE Juillet = 377 MWh

Afin de lever ces incohérences, **nous préconisions d'instrumenter sur une année la consommation de chaud et de froid du site. Des compteurs d'énergie sont déjà présents en sortie des pompes de distribution. Il pourrait donc être intéressant de faire une relève automatique de ces compteurs au pas horaire pendant une année afin de pouvoir établir les monotones réelles chaud et froid du bâtiment**. En effet, l'usage de

laboratoire et les besoins de froid liés au process rendent la consommation difficile à appréhender de manière théorique.



Compteur d'énergie thermique du réseau froid



Compteur d'énergie thermique du réseau chaud

Méthodologie de recalage des besoins chaud et froid

Afin de mener à bien l'étude au stade de la faisabilité, un calcul théorique des besoins chaud et froid a été effectué à partir des données de consommation électrique fournies par le CNRS. La méthodologie et les hypothèses retenues sont exposées ci-après.

Correction des consommations des mois manquants

- Pour retraiter les données du mois de Juillet et de Juin, un ratio pour chaque PAC est appliqué sur les valeurs du mois d'août en prenant la consommation TGBT PLE (Juillet/Juin) divisée par la consommation TGBT PLE (Août).
- Pour retraiter les données du mois d'Avril, un ratio pour chaque PAC est appliqué sur les valeurs du mois de Mai en prenant la consommation TGBT PLE (Avril) divisée par la consommation TGB PLE (Mai).

Détermination des données de consommation chaud et froid à partir des consommations électriques

Ensuite, une fois l'ensemble des mois obtenu, les consommations électriques sont converties en consommations utile (chaud et froid).

Afin de ne pas être trop optimiste sur le fonctionnement réel des machines, les données suivantes sont considérées :

- Pour les PAC A1 à A4 (thermofrigopompes), il est considéré qu'un kWh électrique donne 3 kWh de chaud et 3 kWh de froid simultanément. Le TER annoncé dans la fiche technique du constructeur est de 8,16.

FONCTIONNEMENT EN REFROIDISSEMENT+RÉCUPÉRATION TOTALE (MODE AUTOMATIC 2)						
Puissance frigorifique nominale	kW	405,8	451,6	535	589,1	659,9
Puissance thermique de récupération	kW	519,1	574,7	689,4	764,4	850,7
T.E.R.		7,99	8,16	7,76	7,55	7,75

Extrait de la fiche technique des TFP

- Pour les PAC A5 à A10 il est considéré un SCOP et SEER de 2,5. Les mois de Janvier à Avril et de Octobre à Décembre sont retenus en chaud. Les mois de Mai à Septembre sont retenus en froid.

Tableau récapitulatif

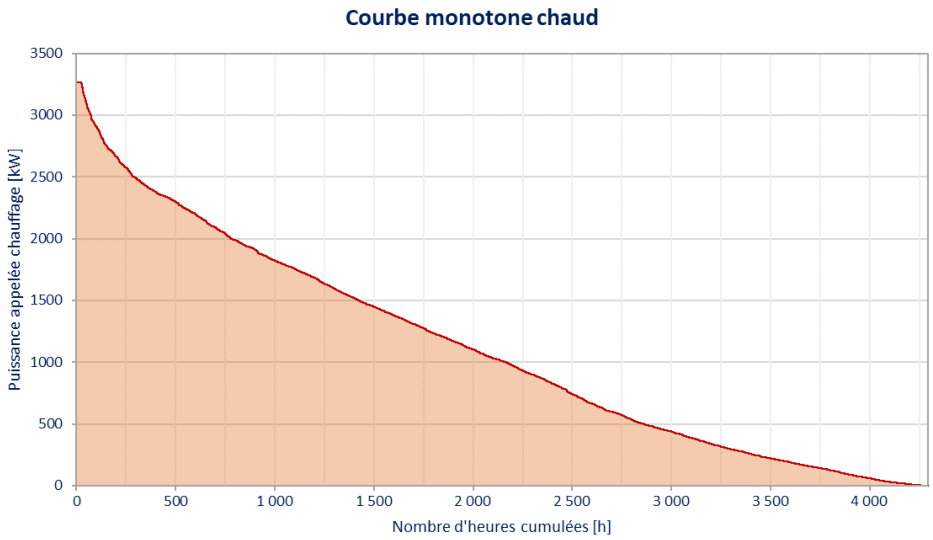
Le retraitement des données donne in fine le tableau suivant :

	Total Elec	*Conso Chaud*	*Conso Froid*	
	kWh	*kWh*	*kWh*	
TGB PLE	2844443			
PAC A1	301828	754570	754570	
PAC A2	301505	753764	753764	
PAC A3	246438	616094	616094	
PAC A4	288377	720942	720942	
PAC A5	269313	522050	96272	
PAC A6	295117	556088	60493	
PAC A7	131085	212605	36664	
PAC A8	623252	662715	338763	
PAC A9	440785	607925	200484	
PAC A10	162565	351058	32725	
		5757810	**3610771**	**9368581**

Les données retraitées à disposition donnent uniquement les consommations annuelles chaud et froid du site. Afin d'obtenir des données au pas horaire permettant de réaliser les calculs de prédimensionnement, la méthodologie suivante a été appliquée :

- Récupération d'un fichier source STD pour un bâtiment mixte de bureaux et laboratoires pouvant s'apparenter et présenter un profil de consommation relativement similaire à celui du CNRS ;
- Extraction des courbes monotones chaud et froid au pas horaire de ce bâtiment ;
- Extrapolation des courbes monotones pour le bâtiment du CNRS en recalant la puissance maximale sur la puissance maximale théorique des bâtiments (fournies par le DOE voir chapitre 2.1.1) ;
- Calculs des consommations théoriques pour vérification de la pertinence de la démarche.

2.2.1. BESOINS CHAUD

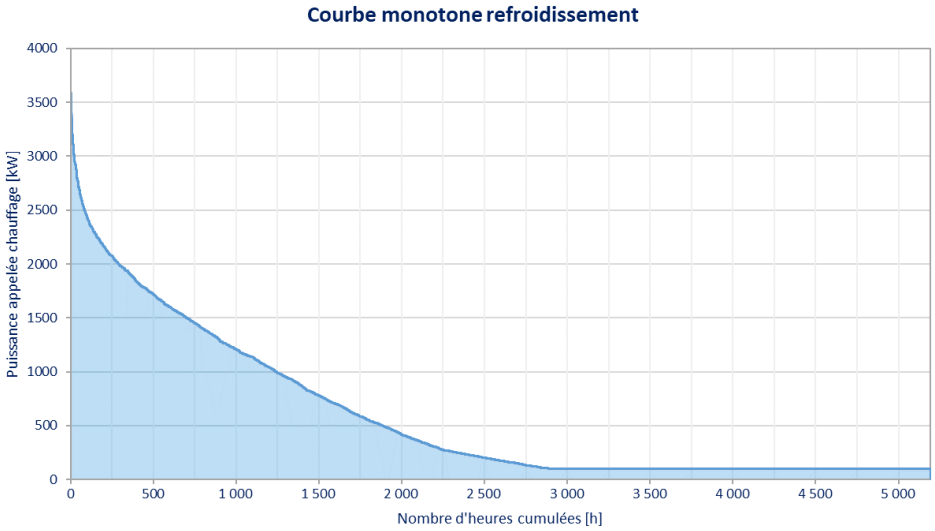


La consommation théorique donnée par la courbe monotone de chauffage recalée est de 4 791 068 kWh.

Cela représente 16 % de moins que le calcul théorique de la consommation de chaud réalisé à partir des consommations électriques réelles.

Les deux valeurs étant globalement dans le même ordre de grandeur, cela permet de conclure que le modèle établi semble cohérent.

2.2.2. BESOINS FROID



La consommation théorique donnée par la courbe monotone froid recalée est de 3 397 931 kWh.

Cela représente 4 % de moins que le calcul théorique de la consommation de froid réalisé à partir des consommations électriques réelles.

Les deux valeurs étant globalement dans le même ordre de grandeur, cela permet de conclure que le modèle établi semble cohérent.

NOTA : A ce stade de l'étude de faisabilité, les besoins actuels ne sont pas amenés à évoluer de manière significative dans la mesure où le bâtiment est déjà en occupation nominale.

2.3. ANALYSE DE LA PERFORMANCE DU BATIMENT – POTENTIEL ENR

Le bâtiment étant relativement récent (2021), l'amélioration de la performance énergétique globale du bâtiment semble assez limitée dans la mesure où un raccordement au réseau de chaleur n'est à ce stade pas envisageable. Cependant, vu les appels de puissance électrique du site, **un recours à l'énergie photovoltaïque en toiture semblerait très pertinent.**



2.4. DETERMINATION DE LA PUISSANCE TOTALE A INSTALLER ET REPARTITION (PAC/APPOINT)

2.4.1. DETERMINATION DE LA PUISSANCE DE LA PAC EAU/EAU ET DE L'APPOINT

Couvrir la totalité des besoins de chauffage ou de refroidissement par la géothermie n'est généralement pas le choix le plus judicieux, la ressource géothermique sur sondes n'étant valorisée que par des investissements coûteux. Plus la puissance de l'installation est élevée plus l'investissement initial est important, et ce de manière quasi proportionnelle.

Les courbes monotones permettent de dimensionner de manière fine l'installation géothermique. Selon l'allure de la courbe, il peut être décidé de la puissance à installer pour couvrir un certain pourcentage des besoins totaux.

L'objectif est de déterminer le meilleur rapport production ENR géothermique/consommation appoint, sous l'aspect économique et aussi environnemental.

Il est important de noter que dans le cas du CNRS, les besoins étant très élevés, le facteur limitant pourra être la capacité maximale du champ de sondes géothermiques et la puissance maximale réglementaire à ne pas dépasser dans le cadre de la GMI (Géothermie de Minime Importance). De plus, le site Balard a déjà recours à une production optimisée et décarbonée (production de base par thermofrigopompes), il n'y aura donc pas d'intérêt à surdimensionner la géothermie.

Le taux de couverture et la puissance géothermique seront optimisés dans le but :

- D'éviter un investissement initial trop important.
- D'assurer une part suffisante de couverture géothermique.
- D'obtenir un nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominale des PAC supérieur à 1000 (Nhepp).

Trois scénarios de production géothermiques seront étudiés :

- Production par une installation géothermique alimentée à 100% par des sondes verticales
- Production par une installation géothermique mixte sondes-nappe.
- Production par une installation 100 % nappe

En effet, le forage test a permis de mettre en évidence la présence d'une nappe dont le débit a été estimé en premier instance à 40 m^3/h. Dans l'hypothèse où la géothermie sur nappe serait envisagée, des études complémentaires seraient à réaliser (forage de reconnaissance et instrumentation).

Pour les deux premiers scénarios, deux puissances d'installation seront étudiées :

- 350 kW
- 500 kW (puissance maximale autorisée dans le cadre de la GMI).

Dans chacun des scénarios et dans la mesure où le site possède des besoins de chaud et de froid concomitants, le recours à la technologie des thermofrigopompes (TFP) a été privilégié.

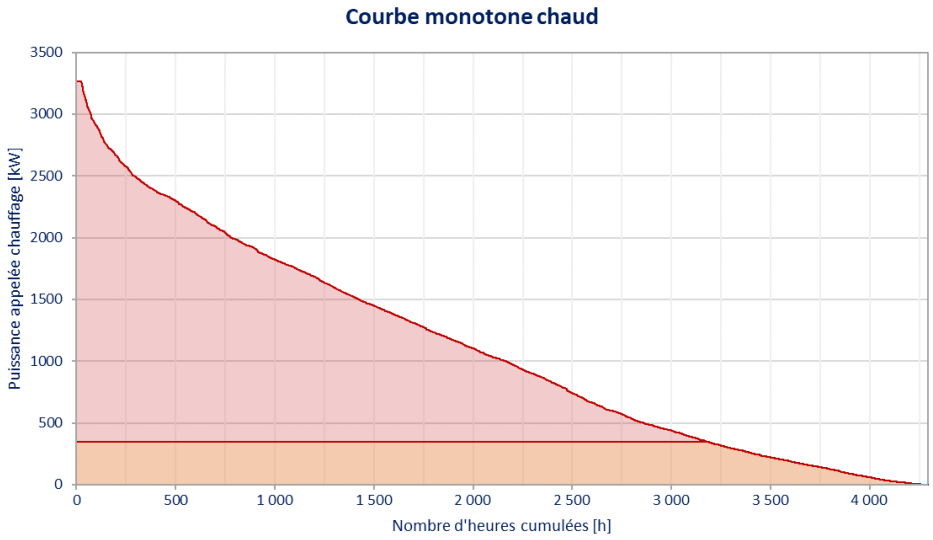
Le prédimensionnement des installations a été réalisé avec le logiciel de dimensionnement mis à disposition par le BRGM https://plateforme-geothermie.brgm.fr/fr/outil-de-dimensionnement.

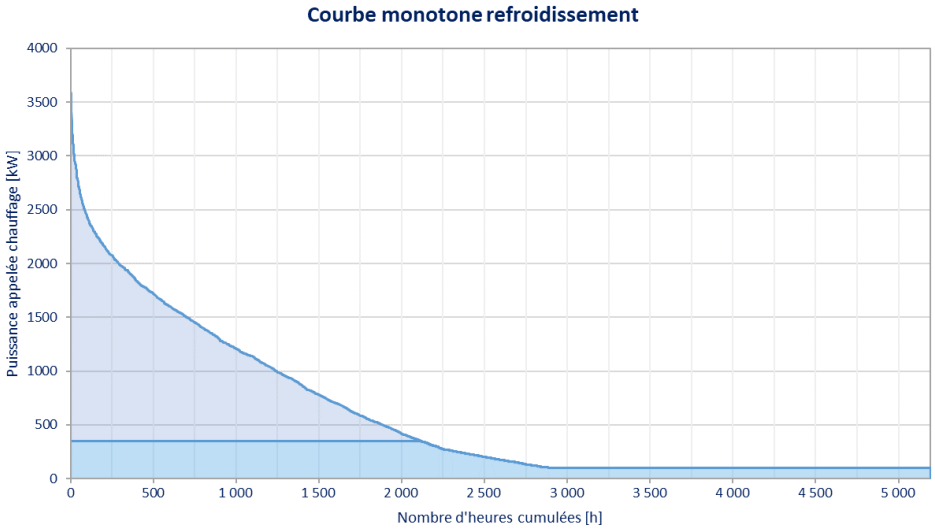
Au vu du profil des besoins en puissance sur l'année du site, le dimensionnement préconisé donne :

- ***Scénario 1A - 100 % sondes – 350 kW (solution de base)***
  - Une puissance chaude TFP géothermique de 350 kW environ couvrant 25 à 30 % des besoins de chauffage.
  - Une puissance froide TFP géothermique de 350 kW environ couvrant 35 à 40 % des besoins de refroidissement.
  - Un appoint/secours chaud par la production existante.
  - Un appoint/secours froid par la production existante
- ***Scénario 1B - 100 % sondes – 500 kW***
  - Une puissance chaude TFP géothermique de 500 kW environ couvrant 35 à 40 % des besoins de chauffage.
  - Une puissance froide TFP géothermique de 500 kW environ couvrant 45 à 50 % des besoins de refroidissement.
  - Un appoint/secours chaud par la production existante.
  - Un appoint/secours froid par la production existante
- ***Scénario 2A - Mixte sondes/nappe – 350 kW***
  - Une puissance chaude TFP géothermique sondes de 120 kW et nappe de 230 kW environ couvrant 25 à 30 % des besoins de chauffage.
  - Une puissance froide TFP géothermique sondes de 120 kW et nappe de 230 kW environ couvrant 35 à 40 % des besoins de refroidissement.
  - Un appoint/secours chaud par la production existante.
  - Un appoint/secours froid par la production existante
- ***Scénario 2B - Mixte sondes/nappe – 500 kW***
  - Une puissance chaude TFP géothermique sondes de 270 kW et nappe de 230 kW environ couvrant 35 à 40 % des besoins de chauffage.
  - Une puissance froide TFP géothermique sondes de 270 kW et nappe de 230 kW environ couvrant 45 à 50 % des besoins de refroidissement.
  - Un appoint/secours chaud par la production existante.
  - Un appoint/secours froid par la production existante
- ***Scénario 3 - Nappe – 230 kW***
  - Une puissance chaude TFP géothermique nappe de 230 kW environ couvrant 18 à 20 % des besoins de chauffage.
  - Une puissance froide TFP géothermique nappe de 230 kW environ couvrant 30 % des besoins de refroidissement.
  - Un appoint/secours chaud par la production existante.
  - Un appoint/secours froid par la production existante

2.4.2. COURBES MONOTONES DU PROJET DETAILLEES

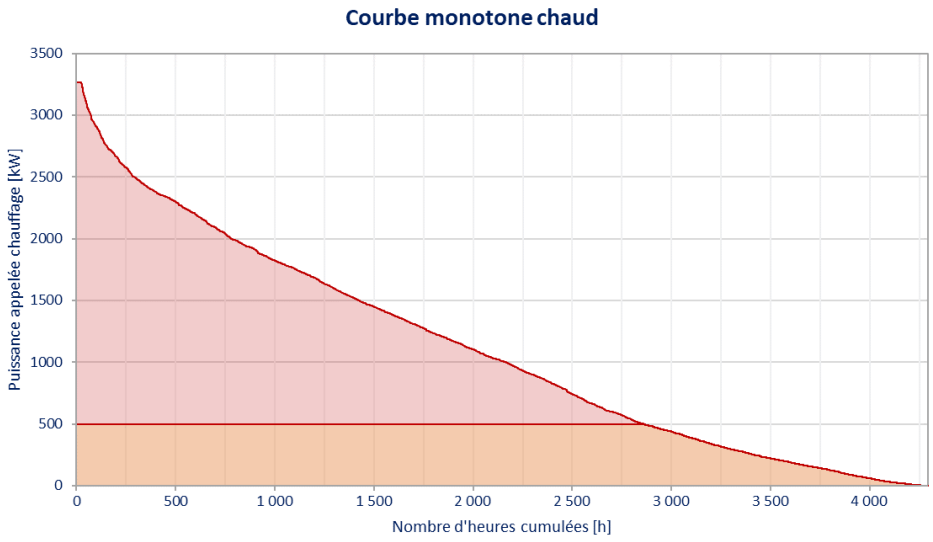
Puissance géothermique de 350 kW (scénarios 1A-2A)

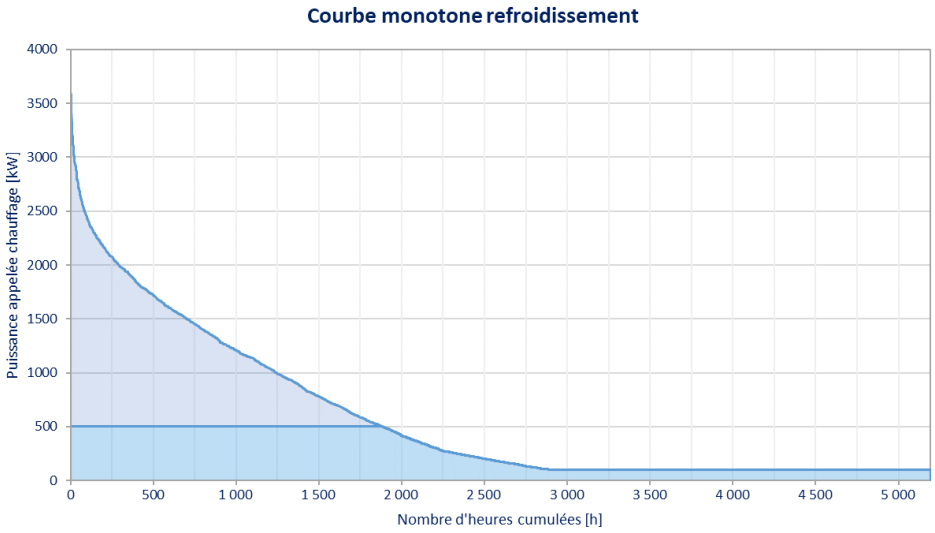




Pour ce bâtiment, le nombre d'heures équivalentes à pleine puissance couvert par la PAC géothermique est de 4 513 heures en chaud. Pour information, l'ADEME exige un minimum de 1 000 heures en mode chaud et de 1500 heures en mode chaud et froid pour rendre éligibles les installations. Ce critère d'éligibilité est devenu une recommandation en 2022 dans les critères de l'ADEME, mais reste un bon indicateur technique. Plus cette valeur est élevée, plus le fonctionnement sera continu tout au long l'année.

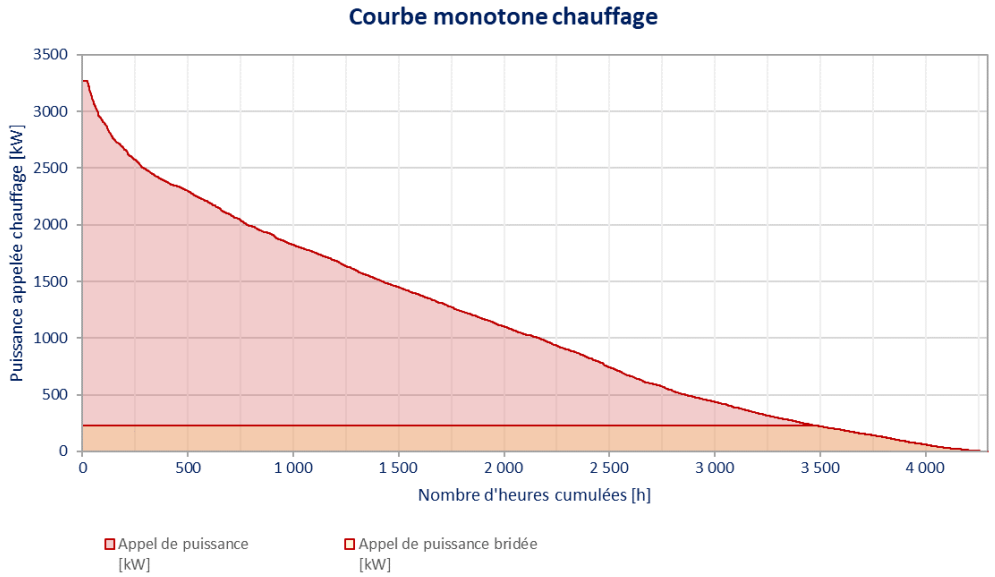
Puissance géothermique = 500 kW (scénarios 1B-2B)

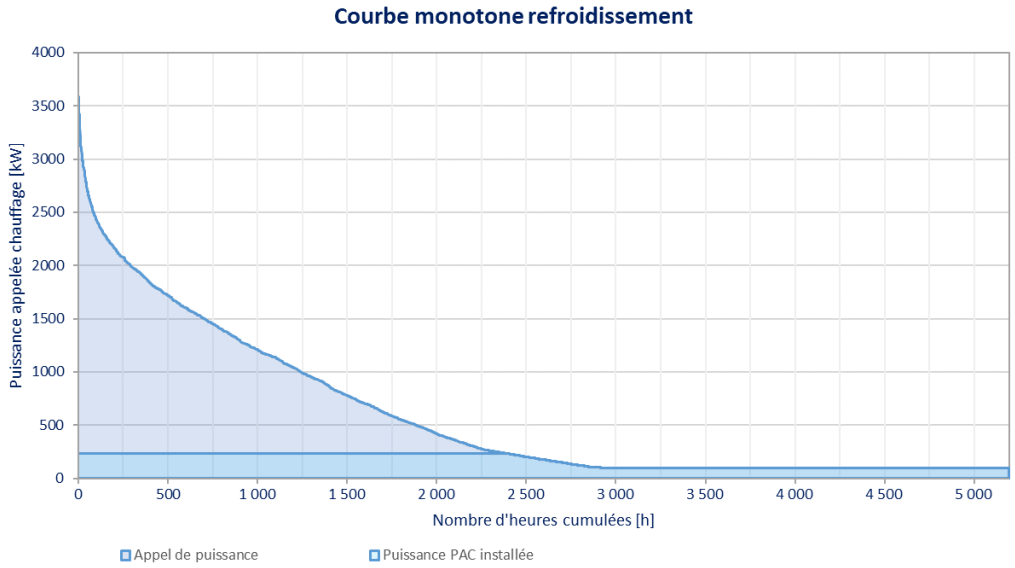




Pour ce bâtiment, le nombre d'heures équivalentes à pleine puissance couvert par la PAC géothermique est de 4 344 heures en chaud.

Puissance géothermique = 230 kW (scénario 3)

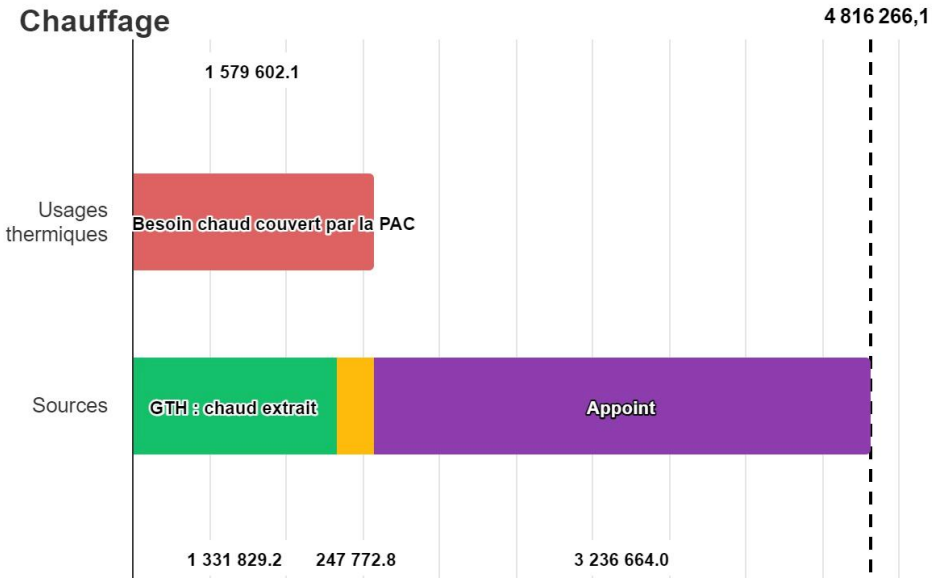




2.4.3. RECAPITULATIF

Puissance géothermique de 350 kW (scénarios 1A-2A)

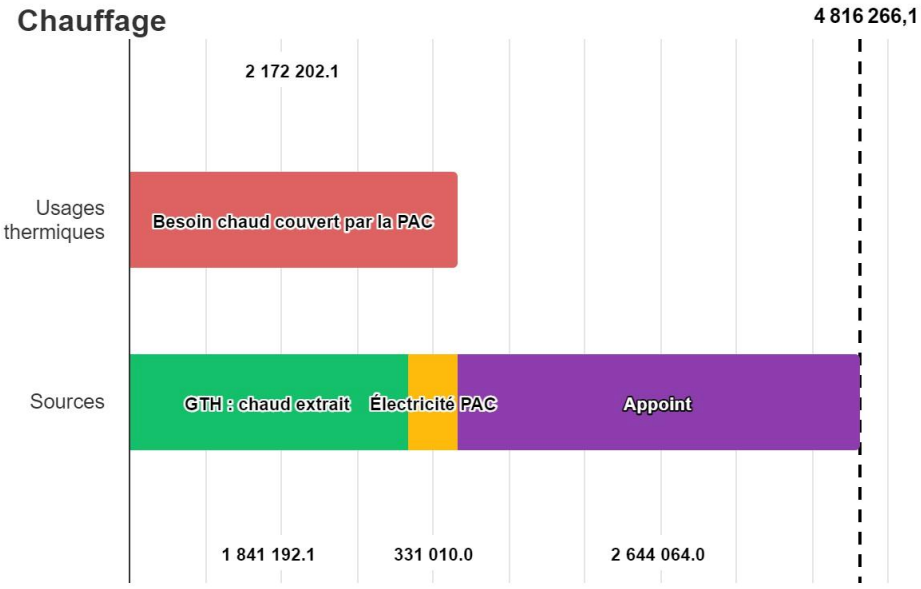
- Puissance chaud TFP géothermique (100 % sondes ou mixte) : 350 kW.
- Puissance froid PAC géothermique (100 % sondes ou mixte) : 350 kW.
- Puissance chaud appoint production existante : 4 MW
- Puissance froid appoint production existante : 4 MW.
- Besoins de chauffage couverts par la PAC géothermique : 1 580 000 kWh.
- % des besoins de chauffage couverts par la PAC géothermique : 30 %.
- Besoins de rafraichissement couverts par la PAC géothermique : 1 485 000 kWh.
- % des besoins de refroidissement couverts par la PAC géothermique : 40 %.
- Besoins de chauffage couverts par la production existante : 3 200 000 kWh.
- Besoins de rafraichissement couverts par le groupe froid d'appoint : 1 900 000 kWh.



Extrait du logiciel de calculs du BRGM

Puissance géothermique = 500 kW (scénarios 1B-2B)

- Puissance chaud TFP géothermique (100 % sondes ou mixte) : 500 kW.
- Puissance froid PAC géothermique (100 % sondes ou mixte) : 500 kW.
- Puissance chaud appoint production existante : 4 MW
- Puissance froid appoint production existante : 4 MW.
- Besoins de chauffage couverts par la PAC géothermique : 2 170 000 kWh.
- % des besoins de chauffage couverts par la PAC géothermique : 45 %.
- Besoins de rafraichissement couverts par la PAC géothermique : 1 785 000 kWh.
- % des besoins de refroidissement couverts par la PAC géothermique : 50 %.
- Besoins de chauffage couverts par la production existante : 2 600 000 kWh.
- Besoins de rafraichissement couverts par le groupe froid d'appoint : 1 600 000 kWh.



Extrait du logiciel de calculs du BRGM

Puissance géothermique = 230 kW (scénario 3)

- Puissance chaud TFP géothermique (nappe) : 230 kW.
- Puissance froid PAC géothermique (nappe) : 230 kW.
- Puissance chaud appoint production existante : 4 MW
- Puissance froid appoint production existante : 4 MW.
- Besoins de chauffage couverts par la PAC géothermique : 1 036 400 kWh.
- % des besoins de chauffage couverts par la PAC géothermique : 18 %.
- Besoins de rafraichissement couverts par la PAC géothermique : 1 083 230 kWh.
- % des besoins de refroidissement couverts par la PAC géothermique : 30 %.
- Besoins de chauffage couverts par la production existante : 4 721 405 kWh.
- Besoins de rafraichissement couverts par le groupe froid d'appoint : 2 527 540 kWh.

3. CARACTERISATION DES RESSOURCES GEOTHERMIQUES

Le rapport d'étude hydrogéologique, du TRT et de la modélisation des champs de sondes ont été réalisés par GEOSYNERGIE et sont joints au présent rapport.

3.1. CONCLUSION DE L'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

Comme le stipule l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités liées à la GMI, des précautions nécessaires lors de l'installation de l'échangeur géothermique doivent être prises (échangeur fermé, ici). Ces précautions ont pour objectif de prévenir les risques de déstabilisations géologiques, assurer l'étanchéité du forage par rapport aux horizons géologiques traversés et aux pollutions de surface, mais aussi assurer la protection de l'environnement souterrain en évitant les mélanges de nappes.

D'après l'étude hydrogéologique présentée précédemment, aucunes contraintes réglementaires ne s'opposent à l'implantation d'un échangeur géothermique. Les paramètres thermiques théoriques sont favorables à la réalisation d'un champ de sondes géothermiques.

Les terrains recoupés lors des futurs forages seront des calcaires compacts, avec des passages argileux. En considérant qu'un seul aquifère sera recoupé et que des cavités peuvent potentiellement être rencontrées lors de la foration, une méthode marteau fond de trou avec tubage à l'avancement sur la plus grande profondeur possible est recommandé. **La réalisation de deux forages test aux deux extrémités du champs de sondes est fortement recommandée.**

A travers l'étude bibliographique et étant donné la forte karstification des calcaires du Séquanien, il sera important de forer lentement afin de limiter l'emportement de la foreuse lors de la traversée d'éventuelles zone de vides et d'observer leurs importances (notamment par le biais d'une inspection vidéo du forage après foration). **Dans le cas où des zones de vides seraient trop importantes (type cavités de gros diamètre), il est conseillé de ne pas poursuivre le projet tant cela représentera des difficultés pour la cimentation des sondes, l'instabilité des terrains et/ou des venues d'eau importantes.**

Sinon, selon la norme NFX10-970, les sondes géothermiques doivent être complètement cimentées sur toute leur longueur à l'aide d'un coulis géothermique. La cimentation devra se faire sous pression (du bas vers le haut) par le tube d'injection placé au fond du forage.

Au vu de la nature fracturée des formations, il sera important ici d'adapter la technique de cimentation. En effet, un second tube d'injection pourra être mis en place jusqu'à 50 m/TN afin d'assurer la cimentation complète de l'ouvrage.

Enfin, si des zones fortement fracturées sont identifiées et que celles-ci entrainent des difficultés pour la cimentation, des solutions techniques peuvent être envisagées par la société de forage : mélange de ciment moins liquide, chaussette géotextile, tubage technique permanent et télescopage (longueur perdue rajoutée à la longueur totale forée), packer lors de la cimentation des zones de pertes…

Si l'entreprise de forage rencontre des difficultés de cimentation, celle-ci doit en informer le maître d'ouvrage. Si malgré ces solutions la cimentation s'avère impossible, cela entraînera un abandon de forage conformément à la norme NF X 10-999.

3.2. CONCLUSION DU TRT

La conductivité thermique λ du sous-sol caractérise la capacité du terrain à échanger de la chaleur avec la sonde géothermique et à la diffuser. La conductivité thermique déterminée grâce au Test de Réponse Thermique est ici de 5.038 W/m.K et témoigne donc d'excellentes conditions pour l'installation d'un champ de sondes géothermiques.

Cette valeur est plus élevée que la conductivité thermique moyenne donnée pour les calcaires (2.8 W/m.K, voir Annexe 1), roche majoritairement traversée lors du forage, cela peut s'expliquer par la forte productivité de la nappe. Toutefois, étant donné l'hétérogénéité géologique de la zone, il est préférable de se référer à la valeur maximum de la conductivité thermique pour les calcaires (4 W/m.K) .

La résistance équivalente de l'ouvrage est égale à Rb = 0,0702 m.K/W. C'est une bonne valeur pour une sonde géothermique diamètre 32 mm à 103 m de profondeur et démontre que la sonde a correctement été mise en place.

La température initiale T0 du sous-sol conditionne quant à elle directement le niveau de température du fluide circulant dans les sondes géothermiques. Les températures moyennes de sous-sol que nous avons pu mesurer sur le territoire français s'échelonnent de 8°C au nord ou dans les montagnes à plus de 19,6°C dans le sud de la France.

La température initiale du sous-sol mesurée sur site est ici de 21,81°C. Cette température est relativement élevée compte tenu de la profondeur et de la localisation du forage. Les importantes arrivées d'eau observées lors du forage test proviendraient de l'aquifère du Pli de Montpellier qui est réputé pour avoir des anomalies thermiques. En effet, la température de la nappe mesurée dans un forage à proximité du projet dans les mêmes formations géologiques se situe autour des 27°C (laboratoire HSM – 2019). Cette température en lieu et place du projet constitue un élément favorable à l'emploi de la géothermie sur sondes car elle permet d'obtenir des COP (Coefficient de Performance) élevés sur la ou les pompes à chaleur en production de chaud ou de froid.

Le test de réponse thermique réalisé ici a permis dans un premier temps de confirmer la lithologie de la zone d'étude mais aussi d'établir les caractéristiques thermodynamiques du sous-sol de la zone concernée par le projet.

Dans un second temps, le forage test et la réalisation du test de réponse thermique ont caractérisé les propriétés du sous-sol, avec des résultats qui démontrent la faisabilité d'un dispositif de chauffage et de rafraîchissement par géothermie sur sondes sèches, tout en fixant les limites et les contraintes.

En conclusion, l'ouvrage géothermique présente à la fois une très bonne température initiale du sous-sol et une excellente conductivité thermique permettant l'application d'une géothermie pérenne.

Résultats du test de réponse thermique	
Température initiale du sous-sol T_0	21,81 °C
Conductivité thermique λ du sous-sol	5,038 W/m.K
Chaleur spécifique C_p du sous-sol	2,228 MJ/m³.K
Résistance équivalente R_b de la sonde	0,0702 m.K/W

Résultats extraits du rapport du TRT

NOTA : Lors de la réalisation du forage test, la présence d'une nappe productive a été mise en évidence à environ 80 m de profondeur dont le débit a été estimé en première approche à 40 m³/h.

4. ADEQUATION DES BESOINS EN SURFACE AVEC LES RESSOURCES DU SOUS-SOL

4.1. DESCRIPTION DE LA SOLUTION GEOTHERMIE

Dans le cadre de cette étude et face à la complexité géologique du site, deux solutions géothermiques sont donc envisageables :

- Solution géothermique 100 % sondes verticales
- Solution géothermique mixte sondes et nappe

Dans la première solution, l'énergie nécessaire pour le chauffage et le rafraichissement sera apportée par l'énergie du sol et sera prélevée au moyen de sondes géothermiques verticales (SGV). Les calories ainsi captées seront dirigées vers la plateforme énergie via un regard de répartition et un réseau enterré.

Dans la seconde solution, l'énergie nécessaire pour le chauffage et le rafraichissement sera apportée par l'énergie du sol prélevée au moyen de sondes géothermiques verticales (SGV) mais aussi par l'énergie de la nappe. Les calories ainsi captées seront dirigées vers la plateforme énergie via un regard de répartition (pour les sondes) et deux réseaux enterrés (nappe + sondes).

4.1.1. SCENARIO 1A

Caractéristiques des systèmes – dimensionnement des équipements

Sans objet



4.1.3. SCENARIO 2A

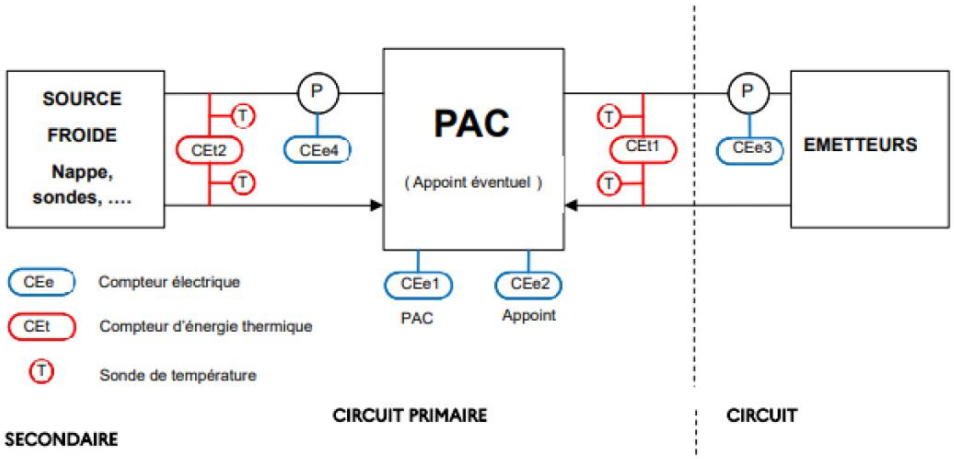
Caractéristiques des systèmes – dimensionnement des équipements

Création dans la plateforme énergie d'une nouvelle production thermique comprenant deux thermofrigopompes à condensation par eau raccordées sur l'installation existante

- Thermofrigopompes produisant chaud et froid simultanément dimensionnée pour assurer 25 à 30% des besoins de chauffage suivant la monotone. Régime de température 45/40°C conforme à l'existant et adapté à un fonctionnement basse température

  Caractéristiques techniques des TFP :
  - Marque : CLIMAVENETA modèles NECS-WQ 0412 et 0804 ou équivalent.
  - TER =7,8 / COP=4,3 / EER=5,3
  - SCOP : 5,73
  - SEER : 5,14
  - Fluides frigorigène R410a
  - Echangeur haute performance
  - Alimentation électrique triphasée 400V-50Hz
  - Compresseurs scroll
  - Liaison Modbus ou équivalent pour raccordement sur GTB existante
- Adaptations hydrauliques pour raccorder la nouvelle installation sur l'installation existante

La nouvelle production sera instrumentée suivant le schéma ci-dessous. Des compteurs d'énergie thermique et électrique seront mis en œuvre.



Local technique

Une réserve foncière est disponible dans la plateforme énergie et pourrait accueillir les nouveaux équipements.



Caractéristiques du champ de sondes

Les forages devront permettre de capter la puissance globale nécessaire à la thermofrigopompe.

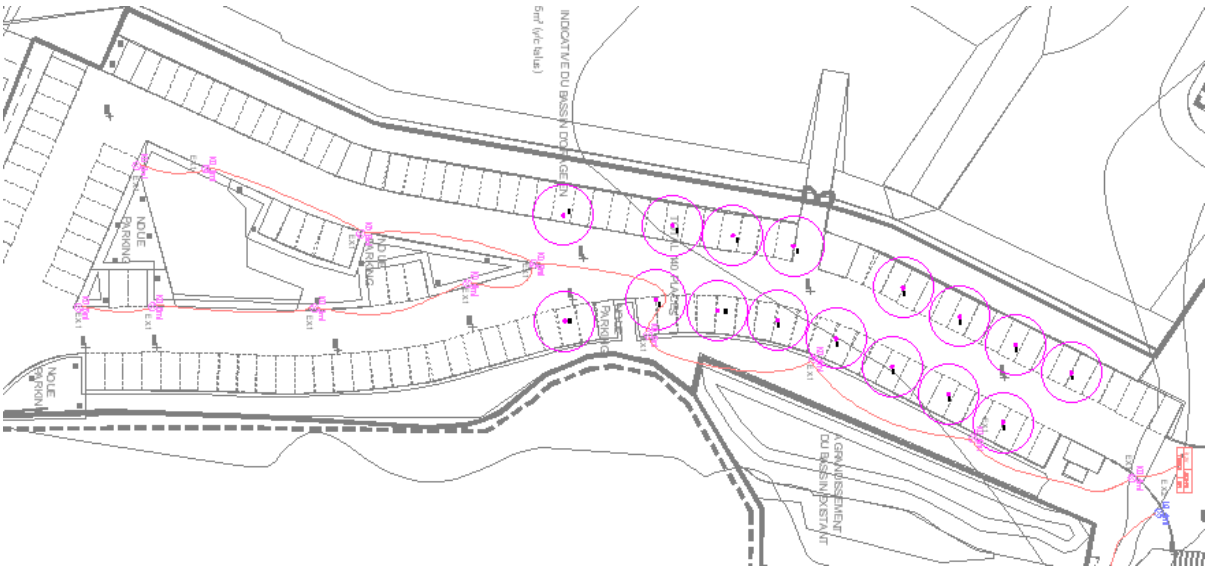
- Nombre de forages : **16**
- Profondeur de forage : **100 mètres**

Les forages devront être réalisés selon la norme en vigueur NF X10-999 par une entreprise de forage certifiée « QUALIFORAGE » en respectant les procédures administratives concernant la protection des sous-sols.

Les 75 sondes seront raccordées sur des collecteurs (aller/retour) desquels partiront les liaisons enterrées vers la plateforme énergie.

Les sondes et les cheminements principaux seront réalisés de manière à éviter au maximum les croisements avec les réseaux secs et humides existant sur le site.

Les sondes seront implantées sur le parking situé en contrebas du pôle Balard. La distance entre sondes serait réduite pour optimiser l'espace disponible et pouvoir réaliser plus de sondes.



Plan de principe d'implantation des sondes géothermiques verticales

Caractéristiques des forages sur nappe

Le dispositif sera composé d'un forage de pompage et de 1 ou plusieurs forages de rejet.

L'énergie nécessaire pour le chauffage et le rafraichissement passif sera apportée par l'énergie de la nappe. L'énergie contenue dans la nappe sera prélevée au moyen d'une pompe immergée, placée dans un forage.

Le dispositif de pompage et rejet sera déterminé précisément suite au forage de reconnaissance. Le forage de prélèvement sera positionné en amont hydraulique de la réinjection et à une distance suffisamment grande pour éviter ou limiter les risques de recyclage thermique.

Les forages seront réalisés selon la norme en vigueur NF X10-999 par une entreprise de forage certifiée « QUALIFORAGE » en respectant les procédures administratives concernant la protection des sous-sols. Ces prestations seront à la charge de l'entreprise.

Les forages devront permettre de capter le débit nécessaire à la puissance globale de la thermofrigopompe. Il sera réalisé 1 ou plusieurs forages de rejet. Le forage de pompage futur pourrait être le forage de reconnaissance.

Les forages seront espacés au minimum de :

- 5 mètres avec les arbres ou limite de propriété.
- 1,5 mètres avec les réseaux enterrés non hydrauliques.
- 3 mètres avec les fondations, puits, fosse septique et évacuations.

Le forage de reconnaissance sera dimensionné pour pouvoir être conservé dans le dispositif d'exploitation final. Il sera prévu l'adaptation du forage de reconnaissance.

Les équipements de pompage seront installés dans le forage de captage.

Il sera prévu une protection adaptée pour la protection des forages. Mise en œuvre d'un regard enterré étanche visitable pour chaque forage.

4.1.4. SCENARIO 2B

Sans objet

4.2. DESCRIPTION DE LA SOLUTION DE REFERENCE

La solution de référence considère une production de chaleur et de froid à partir d'une énergie conventionnelle couvrants les mêmes besoins thermiques et frigoriques que la solution étudiée. Dans le cas présent la solution retenue pour le site est la suivante :

- Production de chauffage par chaudières gaz à condensation de 3,5 MW.
- Production de froid par groupes froid à condensation par air d'une puissance de 3,2 MW avec un SEER de 3.

Une alternative pourrait être de considérer la solution de référence comme la solution actuelle.

4.3. DESCRIPTION DE LA SOLUTION EXISTANTE

Il paraît également intéressant de comparer la solution projetée avec la solution existante à savoir :

- 4 thermofrigopompes de 400 kW à débit variable de marque RHOSS modèle WinPOWER EXP TXAETY 4440
- 6 PAC réversibles de 400 kW à débit variable de marque RHOSS modèle WinPOWER HE-A THAETY 4460

5. BILAN THERMIQUE FINAL

		Consommation production géothermique 350 kW		*Consommation production géothermique 500 kW*		*Consommation production géothermique 230 kW*		*Consommation production de référence*		*Consommation existante*
	Besoins utiles	**TFP**	**Appoint**	**TFP**	**Appoint**	**TFP**	**Appoint**	**Combustible**	**Electricité**	**Electricité**
	kWh	*kWh ef*	*kWh ef*	*kWh ef*	*kWh ef*	*kWh ef*	*kWh ef*	*kWh ef*	*kWh ef*	*kWh ef*
Chauffage	5757810	230312	1213835	307083	1040430	138187	4721405	6397567		
Froid	3610771	192574	525141	240718	437617	72215	743949		1444308	
Total	9368581	422887	1738976	547801	1478047	210403	5465354	6397567	1444308	2844443

6. BILAN ECONOMIQUE

6.1. SOLUTION GEOTHERMIQUE

6.1.1. RECAPITULATIF DES INVESTISSEMENTS LIES A LA PAC ET A L'APPOINT

Les coûts d'investissement affichés ne comprennent pas les réseaux de distribution secondaires et les émetteurs correspondants en aval du « local pompes »

L'investissement tient compte :

- De la mise en place des sondes géothermiques incluant les forages, pose des sondes, cimentation, raccordement des sondes entre elles jusqu'au collecteur puis à la pompe à chaleur dans la plateforme énergie.
- De la réalisation des tranchées pour passage du réseau géothermie, puis rebouchages et finitions.

- De la fourniture et pose de la (ou des)TFP eau/eau, de l'appoint et du raccordement électrique.
- Des travaux d'aménagement de la plateforme énergie.
- Des travaux hydrauliques dans la plateforme énergie (départ circuit sondes géothermiques, départ circuit primaire, régulation etc).
- De la pose des compteurs d'énergie et d'une solution de lecture des données pour suivre les consommations d'énergie.
- De la dépose éventuelle des installations existantes non réutilisées
- Des honoraires de MOE.
- D'aléas divers

Scénario 1A



Scénario 1B



Scénario 2A

Désignation	*u*	*Qté*	*Pu*	*Montant € HT*
Forages de captage et de rejets + équipements de pompage	ens	1	280 000,00 €	280 000,00 €
Forages et sondes géothermiques y compris collecteur et réseaux enterrés	u	16	20 000,00 €	320 000,00 €
Réseaux enterrés des collecteurs jusqu'à la PLE	ml	570	130,00 €	74 100,00 €
Réseaux enterrés nappe	ml	560	130,00 €	72 800,00 €
Tranchées / rebouchages / reprises VRD	ml	450	900,00 €	405 000,00 €
Thermofrigopompe 120 kW yc pompes primaire sondes et secondaire	u	1	60 000,00 €	60 000,00 €
Thermofrigopompe 230 kW yc pompes primaire sondes et secondaire	u	1	90 000,00 €	90 000,00 €

Adaptation hydraulique - raccordement TFP sur le réseau existant - accessoires	ens	1	60 000,00 €	60 000,00 €
Régulation, Instrumentation et raccordement sur GTB du site	ens	1	25 000,00 €	25 000,00 €
Etudes complémentaires forage de reconnaissance	ens	1	20 000,00 €	20 000,00 €
Etudes de Maîtrise d'œuvre	ens	1		132 828,00 €
Aléas/imprévus	ens	1		188 959,20 €
				1 448 687,20 €

Scénario 2B



Scénario 3



6.1.2. COUTS D'EXPLOITATION PREVISIONNELS

L'évolution des prix des énergies oblige à avoir sur l'exploitation une vision dynamique sur la durée de vie de l'investissement, soit environ 25 ans pour les TFP. Il a donc été calculé toutes les valeurs année par année sur 25 ans, compte-tenu des hypothèses d'évolution de chaque paramètre.

Hypothèses :

- Durée de vie des TFP à condensation par eau : 25 ans.

- Pourcentages d'augmentation des coûts de ressource énergétique et de maintenance :
  - Energie : 2,5 %.
  - Pièces et main-d'œuvre : 1,5 %.
- Coût kWh électricité : 195 €HT/MWh (donnée calculée suivant facture du 29/01/2026 fournie par le CNRS).
- Périmètre du P3 couvrant l'ensemble des équipements de la plateforme énergie existants + les nouvelles installations (uniquement les machines TFP)

Scénario 1A

Scénario 1B

Scénario 2A

Suivant les éléments indiqués ci-avant, les coûts annuels d'exploitation la première année sont les suivants :

- P1 : 421 563 €HT
- P2 : 9 500 €HT.
- P3 : 32 200 €HT

Soit un coût d'exploitation total annuel la première année de :

- 463 263 €HT

Soit un coût d'exploitation total sur 25 ans de :

- **15 653 284 €HT**

Scénario 2B

Scénario 3

6.1.3. SUBVENTIONS MOBILISABLES

Aide à l'investissement de l'ADEME dans le cadre du fonds chaleur

Le Fonds Chaleur accompagne le financement des installations de production de chaleur renouvelable. Il s'adresse aux collectivités et aux entreprises afin de leur permettre de réaliser leur transition énergétique par le recours massif à la chaleur et au froid renouvelables sur leurs territoires et dans leurs activités.

Les porteurs de projet sont invités, dès le montage du dossier, à contacter la Direction Régionale de l'ADEME compétente sur le site d'implantation de leur projet.

Les opérations de géothermie de surface assistée par pompe à chaleur à l'exception des PAC air/air et ayant une production d'ENR minimum de 25 MWh/an dans les secteurs de l'habitat collectif, tertiaire, agricole et industriel sont éligibles aux aides financières. Celles-ci incluent les installations de PAC eau/eau sur sondes géothermiques.

Critères spécifiques pour les installations de TFP sur champ de sondes :

- Production minimum de l'installation 25 MWh EnR/an. Les MWh EnR correspondent aux MWh réellement extraits de la ressource. Ils sont comptabilisés selon la formule suivante :
  Production d'EnR = Production utile de chaud sortie PAC – Consommation électrique de la PAC
- Respect de la réglementation relative au sous-sol, en particulier les obligations réglementaires liées aux opérations de géothermie de minime importance encadrée par le décret de minime importance (publié le 8 janvier 2015 et entré en vigueur le 1er juillet 2015). Le décret précise les règles relatives aux droits et obligations des exploitants notamment en cas de dommages ainsi que celles relatives à l'arrêt d'exploitation. Il prévoit notamment que les travaux devront être réalisés par des entreprises prestataires de forage disposant des qualifications requises (NB : la qualification « Qualiforage Module Sondes » répond notamment à cette exigence).

- Respect des normes NFX 10-960-1, 10-960-2, 10-960-3, 10-960-4, NFX 10-970 relatives à la mise en place des sondes géothermiques.

	Pour les PAC destinées à la production de…		
	CHAUFFAGE	ECS OU ECS ET CHAUFFAGE (55 ├ 60 °C) (OU PROCESS)	FROID
Pour les PAC « électriques »	COP machine* ≥ 4	COP machine ≥ 4	EER machine*** ≥ 3,6
Dans les conditions d'application du projet	SCOP global annuel** > 3	SCOP global annuel > 2,8	SEER global annuel**** > 3,3

** mesuré dans les conditions d'essais de la norme européenne EN 14511 en régimes de températures 0/-3°C et 30/35°C).*

*** inclut la consommation électrique du compresseur de la PAC et des auxiliaires de l'installation côté circuit primaire (cf. schémas en Annexe 4). N'inclut pas les consommations d'électricité des pompes de circulation côté distribution dans le bâtiment.*

**** mesuré dans les conditions d'essais de la norme européenne EN 14511 en régimes de températures 12/7°C à l'évaporateur et 30/35°C au condenseur.*

***** Inclut la consommation électrique du compresseur de la PAC et des auxiliaires de l'installation telles que les pompes de circulation côté circuit primaire (cf schémas en Annexe 4). N'inclut pas les consommations d'électricité des pompes de circulation côté distribution dans le bâtiment.*

- Pour les opérations dont la longueur cumulée des sondes est supérieure à 1 000 mètres : réalisation obligatoire d'une sonde géothermique test, d'un test de mesure in situ des propriétés thermiques du terrain15 (TRT) et d'une modélisation dynamique sous-sol et surface (géomodélisation) afin d'optimiser le dimensionnement des installations en sous-sol et de valider le maintien des performances énergétiques de l'ensemble des installations sur le long terme.
- Pour les opérations dont la production reste inférieure ou égale à 100 MWh EnR/an, la réalisation d'un TRT et d'une géomodélisation n'est pas obligatoire mais peut être vivement conseillée selon le contexte sous-sol au droit du projet et le profil des besoins thermiques du bâtiment. L'étude de faisabilité d'un bureau d'études compétent peut être remplacée par une note d'opportunité suivie de la note de dimensionnement de l'entreprise en charge des travaux (installateur de la PAC en lien avec le foreur).

Pour les installations de thermofrigopompes géothermiques

- Les opérations devront respecter a minima les critères d'éligibilité définis dans les paragraphes précédents : réglementaires, normes applicables, évaluation préalable de la ressource EnR&R, …
- Le principe est d'accompagner les opérations de pompes à chaleur géothermiques en montage thermofrigopompes justifiant des besoins simultanés en chaud et en froid sur une partie de l'année.17
- Coefficient de performance des TFP en production simultanée supérieur à 7 et défini ci-dessous

$$\textit{Rapport d'efficacité instantanée} = \frac{(\textit{Puissance frigorifique} + \textit{Puissance thermique})}{\textit{Puissance électrique absorbée}}$$

- Un rendement de l'installation en mode TFP supérieur à 6,1 :

$$\textit{Rendement TFP} = \frac{\textit{Energie chaud sortie PAC} + \textit{Energie froid sortie PAC}}{\textit{Energie électrique PAC (mode TFP, mode chaud seul et mode froid seul)} + \textit{Energie électrique auxiliaires}}$$

- La part de fonctionnement en mode TFP de la production annuelle cumulée de chaud et froid est définie ci-dessous :

$$\textit{Part de fonctionnement en mode TFP}\ (\%) = \frac{\textit{Energie utile chaud mode TFP} + \textit{Energie utile froid mode TFP}}{\textit{Besoins chaud} + \textit{Besoins froid}}$$

Pour les installations de PAC géothermiques dont la production globale de chaleur et/ou de froid renouvelable est supérieure à 2000 MWh EnR/an

Les aides forfaitaires concernent les installations suivantes dont la production de chaleur et éventuellement de froid renouvelable est > ou = 25 MWh EnR/an et < ou = à 2000 MWh EnR/an :

L'aide Fonds Chaleur sera calculée par une méthode simplifiée proportionnelle aux MWh EnR&R produits et correspondant au minimum entre les deux valeurs suivantes :

- **Un taux d'aide maximum fixé par défaut à 45% des dépenses éligibles,**
- **Une aide en €/MWhEnR&R sur 20 ans calculée comme ci-après :**

Pour la production EnR chaud, l'aide en €/MWh est calculée sur la base des ratios ci-dessous par tranches marginales :

Production d'EnR&R CHAUD > 2000 MWh/an **Technologies**	**Ratios CHAUD en €/MWhEnR/an (sur 20 ans)**
PAC/TFP sur sondes et géostructures énergétiques	**De 0 à 2000 MWh = 50 €/MWh EnR chaud** **> 2000 MWh = 30 €/MWh EnR chaud**
PAC/TFP sur eau de nappe, sur eau de mer /eaux de surface	**De 0 à 2000 MWh = 25 €/MWh EnR chaud** **> 2000 MWh 15 €/MWh EnR chaud**
PAC aéro (PAC air/eau)	**De 0 à 2000 MWh = 6 €/MWh EnR chaud** **> 2000 MWh 4 €/MWh EnR chaud**

Pour la production EnR froid, l'aide en €/MWh est calculée sur la base des ratios ci-dessous :

Production d'EnR&R TOTALE > 2000 MWh/an **Technologies**	**Ratios FROID en €/MWhEnR/an (sur 20 ans)**
PAC/TFP sur sondes et géostructures énergétiques	10 €/MWhEnR froid
PAC/TFP sur eau de nappe, sur eau de mer /eaux de surface	10 €/MWhEnR froid
PAC aéro (PAC air/eau)	**NON AIDEE**
Rafraîchissement par géocooling*	10 €/MWhEnR froid

Ces éléments rendent ainsi le projet éligible au Fonds Chaleur. Les aides de l'ADEME seraient donc estimées à :





			Scénario 2A	Scénario 2B	Scénario 3
Sondes	Chaud	Conso sortie TFP	592232 kWh		
		Conso élec TFP	78964 kWh		
		kWh EnR	513268 kWh		
		Subvention	**513 267,67 €**		
	Froid	Conso sortie TFP	495191 kWh		
		Conso élec TFP	66026 kWh		
		kWh EnR	429166 kWh		
		Subvention	**85 833,18 €**		
Nappe	Chaud	Conso sortie TFP	1135111 kWh		
		Conso élec TFP	151348 kWh		
		kWh EnR	983763 kWh		
		Subvention	**590 257,82 €**		
	Froid	Conso sortie TFP	949117 kWh		
		Conso élec TFP	126549 kWh		
		kWh EnR	822568 kWh		
		Subvention	**164 513,60 €**		
	Total	kWh EnR	2748765 kWh		
		Subvention	**1 353 872,28 €**		

	Scénarios 1A	Scénarios 1B	Scénario 2A	Scénario 2B	Scénario 3
Dépenses éligibles			1 448 687,20 €		
45%			651 909,24 €		
Aides calculées			1 353 872,28 €		
Subvention ADEME			**651 909,24 €**		

Dépenses éligibles au titre du Fonds Chaleur :

- Bâtiment chaufferie dédié
- Équipement de production de chauffage, froid et ECS (PAC)
- Ballon tampon non ENR appoint
- Équipement de captage géothermique (forages, sondes, pompes, échangeurs, réseaux entre sondes et PAC…)
- Ballon ECS
- Compteurs, instrumentation, régulation
- Appoint aérothermie (peut faire l'objet d'une aide forfaitaire sous condition du respect des critères de performances énoncés au D-Critères spécifiques à chaque technologie)
- Ingénierie : MOE (doit être inférieure à 10% des dépenses totales si interne au bénéficiaire) et AMO

Dépenses non éligibles au titre du Fonds Chaleur :

- Équipements hydrauliques du réseau secondaire après le ballon tampon :
- Distribution ECS (bouclage, robinetterie, pompes secondaires)
- Alimentation eau froide
- Équipements de diffusion de la chaleur (émetteurs…)
- Appoints d'énergie fossile et appoint électrique
- Toutes dépenses liées à une mise en conformité ou une obligation réglementaire
- Acquisition de terrain

Aide FEDER

Le FEDER finance des projets de production d'énergie renouvelable et de stockage qui nécessitent des aides publiques pour leur assurer une compétitivité minimale comparativement aux énergies fossiles, tels que :

- Les chaufferies biomasses,
- Les installations géothermiques, (y compris thalassothermie),
- Les installations solaires thermiques,
- Les installations photovoltaïques en auto-consommation et sans vente du surplus,
- Les installations de méthanisation,
- Les installations de valorisation de la chaleur de récupération,

Critères d'éligibilité :

- Respect des dispositions règlementaires Respect des exigences sur la ressource géothermale
- Coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur (PAC) supérieur à 4 en régimes de températures 0/-3°C et 30/35°C ou en régime de températures 10/7°C et 30/35°C pour les PAC sur aquifères ou eaux de mer
- Nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC supérieur à 1000 heures/an (en mode chaud)

Aides :

Le seuil minimum d'assiette subventionnable est de 150 000 € HT

Le taux d'aide UE maximal est de 50% sous réserve de la prise en compte des autres co-financeurs

Ces éléments rendent ainsi le projet éligible aux aides FEDER qui pourraient être au maximum de :

	[redacted]	Scénario 2A	[redacted]
Subvention FEDER max		724 343,60 €	

6.2. SOLUTION DE REFERENCE

6.2.1. RECAPITULATIF DES INVESTISSEMENTS

Le calcul du coût d'investissement de la solution de référence a été réalisé en considérant une puissance chaud et froid de 4MW réalisée par le biais de 4 chaudières gaz et de 4 groupes froid.

Désignation	*u*	*Qté*	*Pu*	*Montant € HT*
Chaudière gaz 1 MW	u	4	65 000,00 €	260 000,00 €
Groupe froid 1 MW	ens	4	120 000,00 €	480 000,00 €
Adaptation hydraulique - raccordement TFP sur le réseau existant - accessoires	ens	1	75 000,00 €	75 000,00 €
Régulation, Instrumentation et raccordement sur GTB du site	ens	1	22 000,00 €	22 000,00 €
Etudes de Maîtrise d'œuvre	ens	1		100 440,00 €
Aléas/imprévus	ens	1		140 616,00 €
				1 078 056,00 €

6.2.2. COUTS D'EXPLOITATION PREVISIONNELS

Suivant les éléments indiqués ci-avant, les coûts annuels d'exploitation la première année sont les suivants :

- P1 : 838 228 €HT
- P2 : 7 500 €HT.
- P3 : 23 436 €HT

Soit un coût d'exploitation total annuel la première année de :

- 869 164 €HT

Soit un coût d'exploitation total sur 25 ans de :

- 29 562 040 €HT

6.3. SOLUTION EXISTANTE

Bien que non imposée puisque le cahier des charges de l'ADEME demande une comparaison par rapport à une solution de référence conventionnelle avec combustible (type gaz), il semblait intéressant d'amener des éléments de comparaison par rapport à la situation existant, d'autant plus que le bâtiment a été livré très récemment (2021)

6.3.1. RECAPITULATIF DES INVESTISSEMENTS

Les investissement de la solution existante sont considérés comme nul, les travaux ayant été réalisés dans le cadre du marché.

6.3.2. COUTS D'EXPLOITATION PREVISIONNELS

Suivant les éléments indiqués ci-avant, les coûts annuels d'exploitation la première année sont les suivants :

- P1 : 508 810 €HT
- P2 : 9 000 €HT.
- P3 : 28 000 €HT

Soit un coût d'exploitation total annuel la première année de :

- 545 810 €HT

Soit un coût d'exploitation total sur 25 ans de :

- 18 492 159 €HT

6.4. SYNTHESE

	SOLUTIONS GEOTHERMIQUES				
	Solution 1A	*Solution 1B*	*Solution 2A*	*Solution 2B*	*Solution 3*
Investissement (CAPEX)			1 448 687,20 €		
Exploitation (OPEX)			15 653 283,98 €		
TOTAL sur 25 ans			17 101 971,18 €		
Subventions théoriques ADEME			1 353 872,28 €		
Subventions théoriques max FEDER			724 343,60 €		
Subventions plafonnées			651 909,24 €		
TOTAL sur 25 ans yc subventions			**16 450 061,94 €**		

	SOLUTION REF	SIT EXISTANTE
	Gaz + GF	*TFP air/eau + PAC*
Investissement (CAPEX)	1 078 056,00 €	0,00 €
Exploitation (OPEX)	29 562 040,07 €	18 492 159,29 €
TOTAL sur 25 ans	**30 640 096,07 €**	**18 492 159,29 €**

Hors subventions, le bilan global sur 25 ans donne un quasi-équilibre entre les différentes solutions géothermiques et la solution existante avec malgré tout un avantage pour les solutions géothermiques. La solution de référence est quant à elle bien plus onéreuse et n'est donc pas un sujet à ce stade. L'intégration des subventions dans le bilan donne une dimension beaucoup plus favorable aux installations géothermiques qu'à la solution existante.
Cependant, la complexité du terrain et les incertitudes associées amènent vers une solution qui minimiserait au maximum les forages. De ce fait, la solution 2A mixant à la fois géothermie sur nappe et géothermie sur sondes semble être un bon compris.
Quoiqu'il en soit et qu'importe le scénario envisagé, le coût d'investissement de l'installation d'une PAC géothermique est relativement important notamment du fait de la nécessité de créer des réseaux enterrés entre le parking et la plateforme énergie. L'obtention des subventions est une condition indispensable à la pertinence économique du projet. De plus, les chiffrages seront à confirmer à la suite des études complémentaires nécessaires à la poursuite du projet (2ème forage test, forage de reconnaissance de la nappe).

7. BILAN ENVIRONNEMENTAL

7.1. ESTIMATION DES GAINS ENERGETIQUES ESCOMPTES

	SOLUTION GEOTHERMIQUE			SOLUTION REF	SIT EXISTANTE
		Solution 2A		*Gaz + GF*	*TFP air/eau + PAC*
Energie finale *[kWhef]*		2161863		7841876	2844443
Gains énergie finale		-24%			

Les % de gains sont calculés par rapport à la situation existante.

La mise en place d'une solution géothermique permettrait suivant la solution retenue, un gain théorique de 16 à 30 % en énergie finale sur les consommations de chaud et de froid du site.

7.2. ESTIMATION DE LA REDUCTION DES EMISSIONS CO2 CORRESPONDANTES

Sur la base des émissions de gaz à effet de serre suivant :

- Electricité : 0,06 kgCO2 /kWh.
- Gaz : 0,227 kgCO2 / kWh.

Les solutions ci-après émettraient les quantités de CO2 suivantes sur une année :

	SOLUTION GEOTHERMIQUE			SOLUTION REF	SIT EXISTANTE
		Solution 2A		*Gaz + GF*	*TFP air/eau + PAC*
Emissions GES *[t eqCO2]*		183		1569	220
Gains émissions GES		-17%			

Les % de gains sont calculés par rapport à la situation existante.

La mise en place d'une solution géothermique permettrait suivant la solution retenue, un gain théorique de 12 à 20 % sur les émissions de gaz à effet de serre liées à la production de chaud et de froid du site en tenant compte d'un taux de fuite de fluide frigorigène de 3%/an. La solution existante était déjà globalement décarbonée.

8. CONCLUSION

Le site Balard, livré en 2021 est un site relativement complexe accueillant à la fois des activités de bureaux mais également un grand nombre d'activités de recherche. De ce fait, les besoins chaud et froid du bâtiment sont importants et simultanés. Aujourd'hui, la production chaud-froid est réalisée par une production décarbonée composée de thermofrigopompes à condensation par air en base et de PAC réversibles en appoint.

Le CNRS a souhaité étudier la pertinence technico-économique d'avoir recours à l'énergie géothermique pour compléter/substituer une partie de sa production existante.

Dans un premier temps, l'étude hydrogéologique et le forage test ont mis en évidence deux points :

- La présence d'une nappe d'eau souterraine de 40 m3/h à environ 80m de profondeur
- La complexité à forer et à réaliser des sondes verticales du fait des arrivées d'eau (profondeur maximale de sonde de 100m).

Ensuite, plusieurs scénarios d'installations géothermiques ont été étudiés au stade de la faisabilité de manière à rendre compte au CNRS des ordres de grandeur qu'impliquerait la mise en œuvre d'une installation géothermique.

- Scénario 100% sondes – 350 kW
- Scénario 100% sondes – 500 kW
- Scénario mixte sondes-nappe – 350 kW
- Scénario mixte sondes-nappe – 500 kW
- Scénario nappe – 230 kW

Chaque scénario présente des avantages et des inconvénients mais plusieurs points doivent être retenus :

- En l'absence de consommations réelles chaud/froid et face à la complexité à appréhender théoriquement le comportement d'un bâtiment de recherche, l'étude de faisabilité a été menée à partir d'un certain nombre d'hypothèses dont la modification peut avoir un impact sur les conclusions définitives. Les résultats sont donc plutôt à considérer en ordre de grandeur plutôt qu'au kWh ou à l'euro près.
- Le recours à la géothermie est possible mais les travaux engendrés par ce dernier sont importants, coûteux et entraineront des impacts non négligeables sur les espaces extérieurs sur le parking et entre le parking et la plateforme énergie (forages, tranchées etc.)
- La production actuelle est déjà globalement performante et décarbonée (thermofrigopompes en production de base)
- Sur 25 ans, les projets de géothermie présentent un temps de retour sur investissement intéressants par rapport à la situation existante
- Le montant théorique des subventions sera à confirmer avec les organismes financeurs (ADEME/Hérault Energies, FEDER).
- Avant d'envisager une mission de maîtrise d'œuvre et bien qu'un montant d'aléas ait été considéré dans les chiffrages, des études complémentaires seraient à mener pour fiabiliser les informations à disposition : 2ème forage test de l'autre côté du parking, forage de reconnaissance de la nappe dans le cadre d'une solution intégrant la nappe.

La complexité du sous-sol amène donc à privilégier une solution nécessitant le minimum de forages afin de limiter le coût des travaux mais aussi les aléas associés à ces opérations de forage. De ce fait, le scénario 2A semblerait être la piste la plus intéressante en mixant une installation sur sondes et sur nappe.

Quoiqu'il en soit, le choix de tel ou tel scénario sera à discuter avec les équipes du CNRS en fonction de leurs objectifs, qu'ils soient d'ordre financiers ou énergétiques. Les solutions géothermiques nécessitent un investissement conséquent et l'ensemble des impacts sur le site doivent être pris en considération (travaux sur voierie notamment, travaux sur la production avec maintien de l'activité etc.).

Suite à cette étude de faisabilité et avant d'aller plus loin dans les études complémentaires, deux étapes semblent indispensables :

- Une réunion d'échanges techniques entre le CNRS et BETSO suite à la présentation de l'étude
- La communication de cette étude aux organismes financeurs et notamment à Hérault Energies pour confirmer ou non la possibilité de bénéficier de subventions.

9. ANNEXES

Annexe n° 1 : Rapport d'étude hydrogéologique du 11/03/2024 - GEOSYNERGIE

Annexe n° 2 : Rapport d'étude TRT du 12/07/2024 - GEOSYNERGIE

Annexe n° 3 : Rapport de modélisation des champs de sondes du XX/XX/2024 – GEOSYNERGIE