

Hôpital Bicêtre
78, rue du Général Leclerc
94270 LE KREMLIN BICETRE
Tél. : 01 53 14 69 00



48, brd Sérurier - 75019 PARIS



ARCHITECTES

23 rue de Cronstadt - 75015 PARIS
Tél : 01 53 68 93 00
aia.architectes.paris@a-i-a.fr



INGENIERIE

20 rue Lortet, 69007 Lyon
Tél : 04 78 62 88 23
aia.ingenierie.lyon@a-i-a.fr



ENVIRONNEMENT

23 rue de Cronstadt - 75015 PARIS
Tél : 01 53 68 93 00
aia.environnement.paris@a-i-a.fr



TERRITOIRES

23 rue de Cronstadt - 75015 PARIS
Tél : 01 53 68 93 00
territoires@a-i-a.fr



CONCEPT
Consulting

55 rue des Bruyères – 35360
MONTAUBAN DE BRETAGNE
Tél : 02 99 61 73 18
2bc@2b-concept-consulting.fr

HOPITAL ROBERT DEBRE - CONSTRUCTION DE L'INSTITUT DU CERVEAU DE L'ENFANT



DCE

CCTP CORPS D'ETAT GEOTHERMIE

31/03/2025



SOMMAIRE

1	PRESCRIPTIONS TECHNIQUES GENERALES	4
1.1	DESCRIPTIF SUCCINCT DES TRAVAUX	4
1.2	DESCRIPTION GENERALE DE LA PRESTATION	4
1.2.1	Etudes de dimensionnement en phase exécution	4
1.2.2	Mise en œuvre du captage énergétique	4
1.2.3	Points d'arrêt	4
1.3	DEMARCHE HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE (HQE)	5
1.4	NORMES ET REGLEMENTS	5
1.5	DOCUMENTS D'APPEL D'OFFRES ET REPONSE DE L'ENTREPRISE	6
1.5.1	Documents contractuels	6
1.5.2	Qualifications de l'entrepreneur	6
1.5.2.1	Références de l'entreprise	6
1.5.2.2	Avis technique	6
1.5.2.3	Assurances	6
1.5.3	Détection d'anomalie	7
1.5.4	Description du matériel	7
1.5.5	Indications quantitatives	7
1.5.6	Présentation des offres	7
1.5.7	Offre de l'entreprise	7
1.5.8	Produits, systèmes et procédés dont les caractéristiques sont vérifiées et compatibles avec l'usage	8
1.5.9	Variantes et options	8
1.5.10	Documents à fournir par l'entrepreneur	8
1.5.10.1	Documents à fournir avant le début des travaux	8
1.5.10.2	Documents à fournir en cours de travaux	8
1.5.10.3	Documents à fournir en fin de travaux	9
1.5.11	Test préalables à la mise en service et réception	9
1.5.11.1	Tests préalables à la mise en service	9
1.5.11.2	Réception	10
1.5.12	Garantie	10
1.6	BASES DE CALCUL	11
1.6.1	Besoins énergétiques des bâtiments	11
1.6.2	Nombre de pieux à équiper	11
2	DESCRIPTION DETAILLEE DE LA PRESTATION	12
2.1	ETUDES D'EXECUTION	12
2.1.1	Conception et dimensionnement des pieux de fondation	12
2.1.2	Dimensionnement thermique, hydraulique et thermomécanique du champ de captage énergétique	12
2.1.3	Réalisation des plans d'exécution	13
2.2	MISE EN ŒUVRE DU CAPTAGE ENERGETIQUE	13
2.2.1	Fourniture des tubes d'échange géothermique	13
2.2.2	Mise en œuvre des tubes de captage dans les cages d'armatures des pieux	13
2.2.3	Mise en œuvre des liaisons horizontales entre pieux et collecteurs	14



2.2.4	Fourniture et pose des collecteurs de géothermie	15
2.2.5	Remplissage et équilibrage du système	15
2.3	ESSAIS – RECEPTION	16
2.3.1	Essais	16
2.3.2	Réception	16
2.4	LIMITES DE PRESTATIONS	17
2.4.1	Limites de prestation avec le lot fondations spéciales	17
2.4.2	Limite de prestation avec le lot gros œuvre	17
2.4.3	Limites de prestation avec le lot CVC	17
2.5	ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT FONDATIONS SPECIALES	19
2.5.1	Caractéristique des pieux géothermiques à armaturer toute hauteur	19
2.5.2	Dimensionnement des pieux géothermiques :	19
2.5.3	Recépage sur béton frais	19
2.5.4	Equipement des cages d'armatures des pieux et réalisation des fondations (Phase 1)	19
2.5.5	Points d'arrêts pour contrôle et transferts de responsabilité	20
2.6	ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT GROS ŒUVRE	21
2.6.1	Points d'arrêts pour contrôle des opérations de captage énergétique	21
2.6.1.1	Phase 1 : réalisation des pieux de fondation et recépage sur béton frais	21
2.6.1.2	Phase 2 : Liaisons horizontales des tubes jusqu'aux collecteurs de géothermie	21
2.6.2	Limites de prestation avec le lot GEOTHERMIE	22
2.7	ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT CVC	23
2.7.1	Limites de prestation avec le lot GEOTHERMIE	23
2.7.2	Réception du système de captage géothermique	23
2.7.3	Limitation des températures	23
2.8	ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT VRD	24
2.9	ELEMENTS COMPLEMENTAIRES A INTEGRER DANS LE CCTP PRESCRIPTIONS COMMUNES	24
2.10	ELEMENTS COMPLEMENTAIRES A INTEGRER DANS LES CCTP DES AUTRES CORPS D'ETAT (FONDATIONS SPECIALES / GROS ŒUVRE / CVC)	24
2.10.1	Géothermie (tous lots)	24
2.10.2	Formation / Information	24
2.10.3	Points d'arrêts	25
2.10.4	Dégradation des éléments techniques du captage énergétique	25
2.10.5	Phasage de mise en œuvre	25

1 PRESCRIPTIONS TECHNIQUES GENERALES

1.1 DESCRIPTIF SUCCINCT DES TRAVAUX

Le présent dossier concerne les installations de génie climatique à réaliser dans le cadre de la construction de l'Institut du Cerveau de l'Enfant sur le site existant de l'hôpital Robert Debré 48 bd Sérurier 75019 PARIS.

La nature du terrain et les caractéristiques du bâtiment à construire nécessitent la mise en œuvre de fondations profondes sur pieux. A ce titre il est envisagé d'activer énergétiquement certains pieux de fondation du bâtiment comme échangeur géothermique, et d'alimenter le bâtiment au moyen d'une PAC à compression électrique eau/eau. On parlera alors de « pieux énergétiques ».

Le captage énergétique sera composé d'environ **50 pieux** d'une profondeur d'environ **15 ml (750 ml de captage au total)** sur environ 115 pieux de fondations au total. L'objet des travaux est d'équiper les cages d'armatures des pieux de fondations de tubes caloporteurs permettant d'échanger (injecter / extraire) de l'énergie avec le sol.

1.2 DESCRIPTION GENERALE DE LA PRESTATION

1.2.1 Etudes de dimensionnement en phase exécution

L'entreprise en charge du captage énergétique devra réaliser en phase Exécution et préalablement au démarrage des travaux :

- L'ensemble des calculs thermiques permettant la validation du nombre de pieux à équiper et la performance du système à court et long terme ;
- Le calcul des effets mécaniques liés aux effets thermiques, à intégrer dans le dimensionnement des pieux de fondations par l'entreprise de fabrication des pieux (Calcul des efforts de compression/traction générés par la sollicitation géothermique des pieux; détermination des charges variables à intégrer du fait de la sollicitation/relaxation de l'effort de frottement ; vérification de l'impact des effets thermiques sur les tassements différentiels induits entre pieux; effet cyclique éventuel);
- Les calculs hydrauliques permettant de définir les pertes de charge et les débits de circulation à transmettre à la maîtrise d'œuvre et à l'entreprise en charge du lot CVC ;
- L'ensemble des plans d'exécution nécessaires à la réalisation des installations de fondations thermoactives.

Les études produites par l'entreprise devront permettre de garantir le fonctionnement des installations conformément aux niveaux de performance définis dans les études d'exécution.

1.2.2 Mise en œuvre du captage énergétique

L'entreprise titulaire du présent lot sera en charge des prestations de mise en œuvre de captage énergétique, à savoir :

- Fourniture et pose des tubes de captage dans les cages d'armatures ;
- Fourniture et pose des tubes de liaisons et raccordement des tubes de captage en pieux jusqu'aux points d'installation des collecteurs de géothermie (local « Sous-station Chaud » situé au SS2) ;
- Fourniture et pose des collecteurs avec vannes d'arrêt et vannes d'équilibrage ;
- Fourniture du fluide de remplissage (mélange eau/glycol) des réseaux géothermiques jusqu'aux collecteurs de géothermie ;
- Remplissage et purge des réseaux géothermiques jusqu'aux collecteurs de géothermie ;
- Equilibrage de chaque réseau géothermique sur les différents collecteurs.

1.2.3 Points d'arrêt

Après chaque étape de mise en œuvre des tubes de captage énergétique, un procès-verbal d'essais sera réalisé permettant de valider l'intégrité du système. Le procès-verbal d'essais sera signé par l'entreprise en charge du présent lot et les autres corps d'état présents sur le site (fondations spéciales, gros œuvre). Tout manquement à ces signatures de procès-verbal par une entreprise engagera sa responsabilité lors de dégradations effectuées sur le système de captage énergétique.

Les différentes étapes de procès-verbaux d'essais du processus de mise en œuvre du captage énergétique sont les suivantes :

- **Point d'arrêt 1** : Après installation des tubes échangeurs dans les cages d'armatures et avant réalisation des pieux de fondations (entreprise captage énergétique/fabricant pieux) ;
- **Point d'arrêt 2** : Après réalisation des pieux de fondations (entreprise captage énergétique/fabricant pieux/entreprise gros œuvre) ;
- **Point d'arrêt 3** : Après réalisation des liaisons horizontales entre pieux ou groupes de pieux jusqu'aux collecteurs géothermiques (GEOTHERMIE / GROS ŒUVRE) ;
- **Point d'arrêt 4** : Après réalisation des collecteurs (GEOTHERMIE / CVC).

Chaque phase de réalisation fera l'objet d'un point d'arrêt avec procès-verbal d'essais. Seule la levée du point d'arrêt par la maîtrise d'œuvre permettra de passer aux phases de réalisation suivantes.

1.3 DEMARCHE HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE (HQE)

Le maître d'ouvrage a souhaité inscrire le projet dans une démarche environnementale exemplaire matérialisée par l'objectif de certification HQE® bâtiment et HQE® bâtiment durable santé.

1.4 NORMES ET REGLEMENTS

Les installations seront réalisées conformément à la réglementation en vigueur dans son édition la plus récente, à tous les DTU (cahier des charges et règles de calculs), aux avis techniques sur les matériaux et matériels.

D'une manière générale, les indications données dans la présente notice ne portent que sur les points non précisés par les règlements, sur les bases à admettre pour les calculs et en aucun cas sur les règlements que l'entrepreneur déclare, par le fait même qu'il soumissionne, parfaitement connaître.

Si une modification à une norme ou à un règlement intervenait après la date d'établissement de l'étude d'appel d'offres, il appartiendra à l'adjudicataire, sous sa seule responsabilité, d'en informer le Maître d'œuvre, par écrit, éventuellement avec accusé de réception (ou sur le compte rendu de chantier) en indiquant les conséquences techniques et financières résultant de cette modification.

Le Maître d'œuvre soumettra la proposition, avec éventuellement l'avis motivé du bureau de contrôle, au Maître d'Ouvrage, qui prendra la décision nécessaire. Si cette décision est négative, l'installateur devra en demander notification par écrit.

L'entreprise en charge du captage énergétique devra se conformer à l'ensemble des textes officiels, règlements ou recommandations applicables à la date de signature des marchés et que l'entrepreneur est réputé connaître, entre autres :

Lois, décrets et arrêtés :

- Le code du travail ;
- Le code des marchés publics ;
- Le code de la construction et de l'habitation ;
- Le code de l'urbanisme ;
- Le code de la santé publique ;
- Le décret du 14 novembre 1988 : protection des travailleurs ;
- Le C.C.T.G (cahier des clauses techniques générales) ;
- Le règlement sanitaire départemental type.
- NF EN 12201-1-2-3-4-5 : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression - Polyéthylène (PE) ;
- NF EN ISO 15874-2, NF EN ISO 15875-2, NF EN ISO 15876-2 : Systèmes de canalisations en plastique pour les installations d'eau chaude et d'eau froide ;
- NF T54-070 : Tubes et raccords en polyéthylène haute densité (PEHD) - Résistance chimique vis-à-vis des fluides à véhiculer ;
- ISO/TR 10358 : Tubes et raccords en matières plastiques - Tableau de classification de la résistance chimique - Tubes et raccords en matières plastiques - Tableau de classification de la résistance chimique ;

- Les normes européennes homologuées CE ;
- DTU 65.9 : Transport de chaleur ou de froid entre bâtiments ;
- DTU 65.10 : Canalisations d'eau chaude ou froide sous pression et canalisations d'eaux usées et des eaux pluviales à l'intérieur des bâtiments.

Autres textes :

- Les spécifications locales des concessionnaires ;
- Les avis techniques et les exemples de solutions du CSTB ;
- Les consignes de montage et d'entretien données par les constructeurs.

La liste ci-dessus n'est nullement exhaustive et le fait que toutes les réglementations ne soient pas systématiquement rappelées ne dispense pas l'entrepreneur de s'y conformer.

L'Entrepreneur en signant son marché, prend la responsabilité de la conception et de l'exécution des installations. Il devra donc faire part de ses remarques éventuelles sur la conception du dossier avant la signature de son marché.

Si, en cours de travaux, de nouveaux règlements entraient en vigueur, l'Entrepreneur serait tenu d'en informer le Maître d'œuvre par écrit, en spécifiant les modalités d'application de ces nouveaux règlements et leur incidence sur l'opération en cours.

1.5 DOCUMENTS D'APPEL D'OFFRES ET REPONSE DE L'ENTREPRISE

1.5.1 Documents contractuels

L'entreprise doit prendre connaissance de la globalité des pièces du marché et prendre en compte l'ensemble des éléments relatifs à son lot :

- CCAP
- CCTPC
- Tous les CCTP
- Toutes les notices spécifiques : acoustiques, environnementale, énergétiques, etc.
- Toutes les pièces graphiques
- Les Annexes
- ...

L'entreprise devra impérativement consulter les plans "Architecte", qui restent les ~~seuls~~ plans de référence pour la construction des ouvrages.

Se référer à la liste de documents mentionnés au CCAP.

1.5.2 Qualifications de l'entrepreneur

1.5.2.1 Références de l'entreprise

L'entreprise en charge du captage énergétique devra apporter la preuve de son expertise tant en termes de conception qu'en termes de réalisations relatives à ce type de procédé. Cette expertise pourra notamment prendre la forme d'une présentation des références d'opérations similaires ou approchantes.

1.5.2.2 Avis technique

L'entreprise devra disposer d'un Avis technique pour la conception et la mise en œuvre des systèmes de captage géothermique sur pieux de fondations.

1.5.2.3 Assurances

L'entreprise titulaire du présent lot devra posséder une assurance « Génie climatique » permettant de couvrir la conception et la mise en œuvre des systèmes énergétiques sur la globalité, de la prestation de conception à la mise en œuvre.

Les attestations d'assurance correspondantes seront transmises à la remise de l'offre.

1.5.3 Détection d'anomalie

L'entreprise reconnaît avoir lu, pris connaissance, étudié l'intégralité des pièces du présent marché et reconnaît n'avoir constaté aucune incohérence, prestations quelle juge mal définies ou description sujette à interprétation qui puisse porter préjudice à la bonne réalisation de son offre.

Si tel est le cas, elle en informera le maître d'œuvre par écrit qui apportera les précisions ou éventuelles modifications nécessaires à la complétude du dossier.

Dans le cas contraire, toute interprétation possible reste de la compétence du maître d'œuvre. Ces interprétations s'appuient systématiquement sur l'optimisation de la performance énergétique, du confort et de la qualité des ouvrages. Elles ne seront déterminées qu'en ce sens.

L'entreprise s'engage à la réalisation de l'intégralité des travaux incombant à son lot dans le respect des pièces du présent marché.

1.5.4 Description du matériel

Les documents techniques d'appel d'offres précisent les solutions, les matériels et les dispositions à adopter pour assurer le programme à réaliser.

Les marques et types cités s'entendent avec la mention "OU EQUIVALENT".

L'entreprise a la faculté de proposer d'autres matériels ou matériaux, à la condition qu'ils soient de qualité et de performances au moins équivalentes à celles prévues dans les documents d'appel d'offres et que la garantie constructeur soit au moins identique.

Le Maître d'Œuvre se réserve le droit d'imposer le matériel prévu dans les documents d'appel d'offres, ou tout autre matériel de qualité équivalente, en cas d'incertitude sur la qualité, les performances, la garantie, etc., des matériels proposés par l'entreprise.

Les matériaux, équipements et travaux, qui ne rempliraient pas rigoureusement les conditions stipulées dans les documents d'appel d'offres, seront refusés et leur remplacement quelle que soit sa valeur à la charge de l'entreprise.

Les indications de dimensionnement portées sur les documents d'appel d'offres (encombrement, puissances, débits, dimensions des réseaux, etc.) sont données à titre indicatif et devront être vérifiées par l'entreprise lors de l'exécution des travaux.

1.5.5 Indications quantitatives

Les indications quantitatives sont données pour faciliter le travail de l'entreprise pour l'établissement de son offre. L'entreprise doit réaliser ses propres bilans les vérifier, signaler tout écart au maître d'œuvre et prévoir dans son offre les prestations nécessaires à la conformité au présent dossier.

1.5.6 Présentation des offres

Les Entreprises devront obligatoirement présenter leurs offres suivant les bordereaux cadres de la Décomposition du Prix Global et Forfaitaire au format EXCEL ou compatible équivalent (CSV), prévus à cet effet et qu'elle pourra compléter si elle le juge nécessaire. Une réponse de l'entreprise qui ne respecterait pas la décomposition de notre cadre de bordereau ne sera pas analysée.

1.5.7 Offre de l'entreprise

L'entreprise indiquera toutes les modifications et/ou compléments qui nécessitent d'être apportés à son offre. Elle joindra à sa proposition tous les éléments complémentaires nécessaires à sa définition et compréhension avec la justification des modifications des documents d'appel d'offres.

Le prix global comprendra implicitement toutes les fournitures, même non mentionnées, nécessaires à l'atteinte des objectifs et au parfait achèvement des ouvrages.

L'offre de l'entreprise sera forfaitaire quelles que soient les adaptations des réseaux dans leur parcours et leur dimensionnement qui s'avéreraient nécessaires lors des mises au point d'exécution.

1.5.8 Produits, systèmes et procédés dont les caractéristiques sont vérifiées et compatibles avec l'usage

Tous les matériaux doivent être conformes aux normes françaises (ou EN lorsqu'elles existent) et posséder un Avis Technique.

Les matériaux, éléments ou ensembles non traditionnels devront faire l'objet :

- Soit d'un avis technique en cours de validité, accepté par l'APSAD (Assemblée Plénière des Sociétés d'Assurances Dommages) et respectant les réserves de cet organisme,
- Soit d'un avis de chantier avec avis favorable de la part d'un laboratoire agréé.

Il devra être choisi des produits, systèmes ou procédés avec les caractéristiques suivantes :

- Avis technique direct (AT ou Atec),
- Document technique d'application (DTA),
- Confirmation d'agrément par un membre de l'UEATc (Union Européenne pour l'agrément Technique dans la construction),
- Appréciation technique expérimentale (ATEX) favorable,
- Agrément technique européen (ATE), Pass Innovation feu vert du CSTB,
- Certification par un membre de l'European Accreditation CSTB, ACERMI, NF, etc.

Les produits certifiés ou disposant d'un Avis Technique choisis devront être compatibles avec l'usage de l'ouvrage et de chaque zone ou local, en termes d'agressivité éventuelle de l'air intérieur, de taux d'humidité, de produits stockés, de risque incendie, etc.

Autant que possible, tous les produits de construction sont issus de filières d'approvisionnement durable. Des usines de fabrication certifiées ISO 14001 permettent de répondre à la demande.

1.5.9 Variantes et options

L'entrepreneur devra impérativement répondre à la solution de base.

Néanmoins, il aura la possibilité de proposer toutes variantes qu'il juge intéressantes, mais elles devront figurer en dehors du cadre du DPGF joint au dossier d'appel d'offres et qu'il doit remplir obligatoirement.

Ces variantes feront l'objet d'une offre forfaitaire établie sur un formulaire séparé.

Certaines options sont éventuellement demandées dans le présent cahier.

L'entrepreneur devra y répondre obligatoirement sous peine de voir sa proposition non retenue.

1.5.10 Documents à fournir par l'entrepreneur

1.5.10.1 Documents à fournir avant le début des travaux

- le Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la santé (PPSPS) ;
- les plans d'exécution complets de tous les ouvrages proposés ;
- tous les plans de réservations nécessaires à la bonne réalisation des travaux ;
- nomenclature et fiches techniques des équipements, matériaux, à mettre en œuvre : marques, références, caractéristiques ;
- nomenclature et fiches techniques des produits utilisés (fluide antigel) en précisant la quantité utilisée.

1.5.10.2 Documents à fournir en cours de travaux

En dehors des plans reçus, tous les croquis détaillés de montage et détails d'exécution. Seront également remis au bureau d'études en charge du contrôle technique des travaux, les différentes fiches de contrôles aux différentes étapes de réalisation

1.5.10.3 Documents à fournir en fin de travaux

Dès que possible et obligatoirement à la réception des ouvrages, l'entrepreneur devra remettre au Maître d'œuvre les documents suivants :

- Les Procès-Verbaux d'essais, les certificats NF et CE des matériels normalisés.
- Les Procès-Verbaux des essais d'étanchéité des réseaux.
- Les Procès-Verbaux d'essais réalisés par l'entreprise avec indication des valeurs relevées.
- L'ensemble des documents nécessaires à la constitution du dossier d'identité SSI.
- Les plans et schémas d'exécution certifiés « bon pour exécution » à la réalisation.
- La nomenclature du matériel, avec indication des différents fournisseurs : nom, adresse, téléphone.
- La notice d'exploitation et les consignes détaillées de fonctionnement des installations permettant à toute personne chargée de la maintenance d'intervenir sans erreur ni omission, ainsi que les garanties sur les différents matériels mis en œuvre.
- L'état des interventions obligatoires à prévoir dans le contrat de maintenance avec leur périodicité.
- Une liste des pièces de rechange de première nécessité à approvisionner par le Maître d'Ouvrage, ainsi que la nomenclature de tous les matériels mis en œuvre (marques et caractéristiques des appareils, notices de fonctionnement et d'entretien).
- Dossier des Ouvrages Exécutés (D.O.E.).
- le dossier de sous-traitance (le cas échéant) : liste des sous-traitants éventuels de l'entreprise, certificats de mise en route ou de réception de certains fabricants pour leurs matériels ;
- le Dossier d'Intervention Ulérieure sur l'Ouvrage (DIUO).

Les DOE seront remis au maître d'ouvrage après validation du maître d'œuvre.

1.5.11 Test préalables à la mise en service et réception

1.5.11.1 Tests préalables à la mise en service

Après la fourniture, la pose et le remplissage par le lot CVC des réseaux et organes en aval des vannes d'arrêt laissées en attente par le présent lot dans les locaux techniques, le présent lot reviendra sur site et effectuera les tests préalables à la mise en service de l'ensemble des installations du captage énergétique et les réglages définitifs, avec le titulaire du lot CVC.

Le présent lot procédera à l'équilibrage des réseaux de géothermie et fournira une note de calculs détaillée avec indication du réglage de chaque organe concerné. Le repérage des organes de réglage sera indiqué sur les plans de récolement.

1.5.11.2 Réception

Pour la réception des travaux, les installations seront livrées en ordre de fonctionnement et en parfait état de propreté.

Les opérations de réception ne seront réalisées qu'une fois la totalité des essais préalables à la mise en service effectués, les résultats de ceux-ci étant concluants.

Dès que possible et obligatoirement à la réception des ouvrages, l'entrepreneur devra remettre au Maître d'œuvre les dossiers des ouvrages exécutés.

Pour les travaux de géothermie, le dossier DOE comportera une partie spécifique comprenant à minima :

- Liste récapitulative des pièces du DOE (avec numérotation et précisant date, indice et échelle) ;
- Libellé – marque – localisation – classement particulier (sous forme de tableau de synthèse) des matériels / matériaux utilisés ;
- Adresse des fournisseurs locaux : pour chaque marque ou matériel ;
- Notices techniques et PV des matériels / matériaux, classés et repérés conformément à la numérotation ;
- Les Procès-verbaux des essais, les certificats NF et CE des matériels normalisés ;
- Les Procès-verbaux des essais d'étanchéité des réseaux ;
- Notes et notices de calculs ;
- Consignes, d'entretien et d'exploitation ;
- Plans de récolement et schémas d'exécution ;
- La notice d'exploitation et les consignes détaillées de fonctionnement des installations permettant à toute personne chargée de la maintenance d'intervenir sans erreur ni omission, ainsi que les garanties sur les différents matériels mis en œuvre ;
- Une liste des pièces de rechange de première nécessité à approvisionner par le Maître d'Ouvrage.

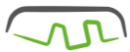
1.5.12 Garantie

Le système de captage énergétique devra être garanti sur une durée minimale de 10 ans.

Cette durée de garantie s'appliquera aussi à la performance de l'installation dans son fonctionnement et dans ses résultats (respect des puissances de production), dans les conditions d'utilisation prévues.

La garantie prendra effet à partir de la réception de la totalité de l'installation de captage.

Pendant cette période, l'entreprise sera tenue d'intervenir à la demande du Maître d'Ouvrage pour remettre en état ou remplacer à sa charge tous les éléments reconnus défectueux ou inadaptés, ainsi que prendre en charge la remise en état due aux dégradations occasionnées.



1.6 BASES DE CALCUL

1.6.1 Besoins énergétiques des bâtiments

Les besoins énergétiques de chauffage et de rafraîchissement nécessaires au dimensionnement thermique de l'installation (puissances et énergies au pas de temps mensuel à minima) seront communiqués par la Maîtrise d'œuvre ou l'entreprise en charge du lot CVC.

1.6.2 Nombre de pieux à équiper

Le dimensionnement prévisionnel du système réalisé en phase de conception est basé sur l'équipement thermoactif de 50 pieux d'une longueur moyenne de 15 m (linéaire total de captage 750 ml).

L'équipement des pieux considère les paramètres suivants :

- Les pieux sont supposés armaturés toute hauteur, les armatures faisant partie de la prestation du lot fondations spéciales ;
- Une longueur non équipable sur chaque pieu d'environ 1 mètre sera considérée.

Dans le cas où l'ajout de pieux supplémentaires serait caractérisé en phase d'exécution, ces pieux pourront faire l'objet d'un équipement de captage énergétique à prix bordereau unitaire.

A l'inverse la réduction du nombre de pieux à équiper pourra entraîner une moins-value pour l'entreprise de captage énergétique à prix bordereau unitaire.

2 DESCRIPTION DETAILLEE DE LA PRESTATION

2.1 ETUDES D'EXECUTION

L'entreprise de captage énergétique sera en charge des études d'exécution décrites ci-dessous :

- Dimensionnement thermique et hydraulique du captage énergétique ;
- Etude des effets thermiques à intégrer dans le dimensionnement mécanique des pieux ;
- Réalisation des plans d'exécution.

2.1.1 Conception et dimensionnement des pieux de fondation

La phase de mise en œuvre sera précédée d'une phase de conception et de dimensionnement. A titre informatif, on retiendra les étapes suivantes :

- Etape 1 : Prédimensionnement mécanique des pieux (entreprises de fondations spéciales) sans intégration des effets thermiques du captage énergétique ;
- Etape 2 : Evaluation des effets thermiques des fondations thermoactives par l'entreprise de captage énergétique pour intégration dans le dimensionnement des pieux par l'entreprise de fondations spéciales.
- Etape 3 : Dimensionnement mécanique définitif des pieux de fondation (entreprise de fondations spéciales) avec intégration des charges supplémentaires issues du dimensionnement thermique de l'étape 2.

L'évaluation des effets thermiques par l'entreprise de captage énergétique comprendra à minima les vérifications suivantes :

- Calcul des efforts de compression / traction générés par l'équipement géothermique des pieux ;
- Détermination des charges variables à intégrer du fait de la sollicitation/relaxation de l'effort de frottement ;
- Vérification de l'impact des effets thermiques sur les tassements différentiels induits entre pieux ;
- Effet cyclique éventuel.

2.1.2 Dimensionnement thermique, hydraulique et thermomécanique du champ de captage énergétique

L'entreprise titulaire du présent lot devra réaliser le dimensionnement thermique, hydraulique et thermomécanique définitif du système du captage énergétique sur la base des éléments et études suivantes :

- Plans d'implantation des pieux de fondations en phase d'exécution transmis par le lot fondation spéciale ;
- Charges à l'ELS quasi permanent transmises par la maîtrise d'œuvre ou l'entreprise de fondations spéciales ;
- Besoins énergétiques en puissance et énergie qui lui seront transmis par la Maîtrise d'œuvre, au minimum au pas mensuel ;
- Caractéristiques des équipements techniques de chauffage et correspondants transmis par la Maîtrise d'œuvre ou l'entreprise CVC.

Le dimensionnement thermique définitif du système de captage énergétique sera réalisé sur la base d'un logiciel de calcul dynamique adapté au système et éprouvé.

Ce dimensionnement permettra d'apprécier la pérennité du système énergétique et l'évolution des températures de fluide au sein du captage sur une durée minimale de 25 ans.

Les températures de fluide devront être limitées de manière à ne pas engager la fonction structurelle des fondations (1°C et +30°C en entrée de pieux).

Le dimensionnement définitif devra détailler à minima les éléments suivants :

- Nombre de pieux équipés de tubes d'échange géothermiques ;
- Longueur et diamètre des tubes d'échange géothermiques par pieu ;
- Principe de sortie des tubes en tête de pieu ;
- Liaisons entre pieux, montage en série ou parallèle ;
- Liaisons horizontales entre pieux et collecteurs géothermiques ;

- Caractéristiques et nombre de collecteurs prévus ;
- ...

Le dimensionnement hydraulique permettra de renseigner les éléments suivants pour le système de captage énergétique :

- Calculs du débit nécessaire à l'installation ;
- Calculs des pertes de charges du réseau de captage (jusqu'aux collecteurs, les pertes de charge après le collecteur devant être calculées par le lot CVC).

2.1.3 Réalisation des plans d'exécution

L'entreprise titulaire du présent lot devra réaliser les plans d'exécution pour la partie captage énergétique, à savoir :

- Plans de disposition des réseaux énergétiques au sein des cages d'armatures (cheminement, coupes,...) ;
- Plans de détails des sorties de tubes dans les têtes de pieux ;
- Plans d'exécution détaillés avec indication des directions de sortie des tubes en massif et indication des zones de captage et liaisons horizontales de raccordement ;
- Plan de réservation pour les passages des faisceaux de tubes dans les éléments de la structure :
 - Traversées de dalles ;
 - Passage à travers des longrines ;
 - ...

2.2 MISE EN ŒUVRE DU CAPTAGE ENERGETIQUE

L'entreprise titulaire du présent lot sera en charge des prestations de mise en œuvre de captage énergétique, à savoir :

- Fourniture et pose des tubes de captage dans les cages d'armatures ;
- Fourniture et pose des tubes de liaisons et raccordement des tubes de captage en pieux jusqu'aux points d'installation des collecteurs de géothermie ;
- Fourniture et pose des collecteurs avec vannes d'arrêt et vannes d'équilibrage ;
- Fourniture du fluide de remplissage (mélange eau/glycol) des réseaux géothermiques jusqu'aux collecteurs de géothermie ;
- Remplissage et purge des réseaux géothermiques jusqu'aux collecteurs de géothermie ;
- Equilibrage de chaque réseau géothermique sur les différents collecteurs.

2.2.1 Fourniture des tubes d'échange géothermique

Les caractéristiques des tubes d'échange énergétiques mis en œuvre par le titulaire du présent lot seront de type PEHD, ou équivalent, disposant d'un avis technique, norme NF ou ISO :

- Matériau : Polyéthylène PE80– PN12,5 ;
- Diamètre extérieur : 25 mm ;
- Résistance au poinçonnement : très élevée ;
- Coefficient de dilatation : 0.2 mm/ (m.K) ;
- Conductivité thermique : 0.4 W/ (m.K).

La durée de vie minimale des tubes dans la plage d'utilisation prévue sera au minimum de 30 ans.

2.2.2 Mise en œuvre des tubes de captage dans les cages d'armatures des pieux

- Mise en place des tubes et fixation ;
- Mise en pression avant coulage des pieux (point d'arrêt n°1) ;
- Mise en pression après coulage des pieux (point d'arrêt n°2) ;

La mise en place des tubes de captages dans les cages d'armatures sera réalisée de manière soignée afin de préserver l'intégrité du matériel. Toutes les sujétions relatives à la mise en place des capteurs seront à la charge du présent lot.

Une fois installés, les tubes de captage seront mis en pression par le lot captage énergétique afin de vérifier leur étanchéité. Un point d'arrêt consigné par procès-verbal sera effectué avec l'entreprise de fondations spéciales afin de constater la bonne mise en œuvre des tubes de captage. Une fois le pieu et le recépage du pieu sur béton frais réalisés, la pression du réseau du pieu sera contrôlée et consignée.

En cas de dégâts constatés ou d'omission de recépage sur béton frais, l'entreprise de fondations spéciales sera tenue responsable, cet élément constituant un point d'arrêt d'exécution.

Une étroite collaboration entre les différents intervenants doit permettre la mise en œuvre optimale des cages d'armatures dans les puits de forage.

A l'issue de la phase de réalisation des pieux, un point d'arrêt sera réalisé avec les responsables des lots captage énergétique, fondations spéciales et Gros Œuvre. Le contrôle d'étanchéité des pieux coulés sera réalisé, consigné par procès-verbal puis visé par les personnes présentes.

En cas d'absence du responsable d'une entreprise tenue d'assister au point d'arrêt, le procès-verbal sera déclaré accepté par l'entreprise absente au rendez-vous.

L'entreprise de Gros Œuvre ne pourra débuter son intervention (réalisation des massifs en tête de pieux) avant réalisation du point d'arrêt. En fonction de l'avancement du chantier, un point d'arrêt partiel pourra être réalisé afin de libérer une zone de travail pour que l'entreprise de Gros Œuvre puisse débuter son intervention.

2.2.3 Mise en œuvre des liaisons horizontales entre pieux et collecteurs

Les tubes utilisés pour la réalisation des liaisons horizontales entre pieux et collecteurs seront identiques aux tubes d'échanges géothermiques mis en place dans les fondations.

Les divers raccordements seront effectués à l'aide de pièces fournies ou validées par le fabricant des tubes. Tous les raccordements seront effectués selon la technique de l'électro soudure, aucune autre technique n'est autorisée.

Les tubes seront posés en fond d'une tranchée sur un lit de sable de 10 cm d'épaisseur minimale. Les tranchées, lit de sable et réservations éventuelles en longrines seront à la charge du titulaire du lot Gros-œuvre.

Les tranchées seront réalisées suivant le plan des liaisons horizontales et pourront éventuellement suivre une pente ascendante jusqu'au collecteur, le collecteur constituant alors le point haut du système.

Chaque zone de captage correspondant à la totalité des pieux raccordés à un collecteur devra être réalisée en une seule fois.

Les dimensions et positions des tranchées et/ou réservations dans les fondations seront définies suite à la réalisation du plan de cheminement des réseaux géothermiques.

Les travaux de raccordement des réseaux de captage énergétique débuteront après réalisation des tranchées/réservations. Aucun travaux de réseaux concernant les autres fluides (EU, EV, EP, réseaux hydrauliques,...) ne devra intervenir sous le niveau des liaisons à partir de leur mise en œuvre. L'entreprise titulaire du lot Gros-œuvre devra tenir compte de cette contrainte dans son planning.

Après réalisation des liaisons horizontales, les tubes seront recouverts d'une couche de béton maigre ou d'un lit de sable de 10 cm à la charge du lot Gros-œuvre afin de limiter les risques de dégradations pouvant être occasionnés sur les faisceaux de tubes horizontaux.

Le remblaiement des tranchées ne pourra débuter qu'après réalisation du point d'arrêt sur le contrôle d'étanchéité des réseaux. En fonction de l'avancement du chantier, un point d'arrêt partiel pourra être réalisé afin de libérer une zone de travail pour que l'entreprise de Gros-œuvre puisse débuter son intervention. Pour ce faire, il est impératif que l'entreprise de Gros-œuvre respecte les contraintes de mise en œuvre des tubes de captage par la libération d'une zone de captage complète, telle que définie lors des études d'exécution et des réunions de coordination préparatoires.

Un contrôle qualité réalisé permettra la traçabilité de l'intégrité du système et les passages de responsabilités pendant l'intervention des autres lots concernés. Ces contrôles seront réalisés sur toute la durée de mise en œuvre afin de s'assurer qu'aucune dégradation n'aura été occasionnée sur les faisceaux de tubes horizontaux (passage d'engins, cisaillement de tubes par pressions différentielles extérieures,...).

En cas de dégradations opérées sur les faisceaux de tubes géothermiques horizontaux, il sera rédigé une fiche de non-conformité indiquant si les réseaux sont réparables ou non, et le cas échéant, l'entreprise en charge du présent lot procédera aux réparations qui resteront à la charge de l'entreprise responsable des dégradations.

Le titulaire du présent lot devra réaliser un contrôle d'étanchéité des réseaux géothermiques avant les phases de coulage de la dalle afin de vérifier qu'aucune dégradation n'aura été engendrée par les travaux depuis la phase de réalisation des liaisons horizontales.



A l'issue de la phase de réalisation des liaisons horizontales, un point d'arrêt sera réalisé avec les responsables des lots captage énergétique et Gros Œuvre. Le contrôle d'étanchéité des liaisons sera réalisé, consigné par procès-verbal puis visé par les personnes présentes.

En cas d'absence du responsable d'une entreprise tenue d'assister au point d'arrêt, le procès-verbal sera déclaré accepté par l'entreprise absente au rendez-vous.

2.2.4 Fourniture et pose des collecteurs de géothermie

Le présent lot devra la fourniture et la pose des collecteurs des réseaux de géothermie. Ces collecteurs seront implantés au niveau du local « Sous-station Chaud » situé au niveau SS2.

Les caractéristiques des collecteurs seront les suivantes :

- Collecteur en laiton ou PEHD compatible avec les tubes utilisés ;
- Fixation des tubes par raccord mécanique ;
- Manomètres (sur aller et retour) ;
- Robinets à boisseau sur nourrice aller et retour ;
- Vannes d'équilibrage à lecture directe de débit sur chaque circuit sur le collecteur retour ;
- Systèmes de fixation sur parois ;
- Vannes d'isolement générales A/R et vanne d'équilibrage (attente raccords lot CVC) ;
- Thermomètres A/R ;
- Etiquetage et identification.

Le nombre de réseaux géothermiques connectés sur chaque collecteur sera limité à 12, de manière à limiter les pertes de charges des collecteurs. Afin de limiter l'encombrement dans le local technique, les collecteurs seront disposés en « escalier ».

Suite à la mise en œuvre des collecteurs, les réseaux aériens du captage géothermique devront être isolés thermiquement par un isolant de type Armaflex (ep.13 mm), ou équivalent, afin d'éviter le phénomène de condensation.

2.2.5 Remplissage et équilibrage du système

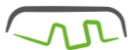
L'entreprise en charge des travaux de captage énergétique réalisera le remplissage du système dans les réseaux géothermiques au niveau des différents collecteurs de géothermie (y/c réseaux entre collecteurs et local PAC)..

Le fluide utilisé pour le remplissage du système devra présenter des caractéristiques compatibles avec les équipements et niveaux de température du système en fonctionnement.

L'antigel utilisé sera le monopropylène glycol pour limiter les risques de pollution. Une concentration minimale en antigel de **10%** est exigée dans les réseaux géothermiques.

Chaque circuit sera rempli puis purgé individuellement. Une mesure du taux de glycol par un système de type réfractomètre devra être réalisée de manière à s'assurer que le mélange fluide / antigel est homogène dans les réseaux géothermiques.

L'équilibrage des réseaux géothermiques, au niveau de chaque collecteur et de chaque réseau géothermique, est à la charge du titulaire du présent lot.



2.3 ESSAIS – RECEPTION

2.3.1 Essais

Les essais sont effectués par le titulaire en charge du lot captage énergétique, sauf spécifications particulières, avant la réception des ouvrages. Le titulaire en charge du présent lot consigne tous les résultats relevés pour former le rapport des essais.

Les moyens nécessaires à tous ces essais (moyens humains, appareils de mesure et de contrôle, consommables) sont fournis par le titulaire du présent lot qui assure également les formalités auprès des différents organismes de contrôle notamment.

Après remplissage des réseaux compris entre les collecteurs géothermiques et la chaufferie par le lot CVC, le présent lot reviendra sur site et effectuera les essais de l'ensemble des installations du captage énergétique et les réglages définitifs, avec le titulaire du lot CVC au niveau de la chaufferie PAC

Le présent lot procédera à l'équilibrage des réseaux et fournira une note de calculs détaillée avec indication du réglage de chaque organe concerné.

Le repérage des organes de réglage sera indiqué sur les plans de récolement.

2.3.2 Réception

Pour la réception des travaux, les installations seront livrées en ordre de fonctionnement et en parfait état de propreté.

Les opérations de réception ne seront réalisées qu'une fois la totalité des essais effectués, les résultats de ceux-ci étant concluants.

2.4 LIMITES DE PRESTATIONS

Cette partie vise à définir les actions propres à chaque intervenant concernant la réalisation des fondations spéciales, le lot Gros Œuvre et le lot CVC, vis-à-vis de la mise en œuvre du captage énergétique.

2.4.1 Limites de prestation avec le lot fondations spéciales

Sont à la charge de l'entreprise de fondations spéciales :

- Dimensionnement mécanique des pieux en intégrant les éventuelles charges additionnelles dues aux sollicitations thermiques, ces dernières étant transmises par le titulaire du lot captage énergétique ;
- Fourniture des cages d'armatures des fondations, équipées toute hauteur, et leur mise à disposition au présent lot au minimum cinq (5) jours ouvrés avant le démarrage de sa propre prestation (travaux de forage) ;
- Manipulation et manutention des cages et mise à disposition permettant leur équipement ;
- Réalisation des pieux
- Recépage des pieux sur béton frais.

2.4.2 Limite de prestation avec le lot gros œuvre

Sont à la charge de l'entreprise de Gros Œuvre :

- Mise en œuvre des massifs en tête de pieux ;
- Dégagements éventuels autour des têtes de pieux permettant le raccordement des tubes en sortie de pieux vers les réseaux de tubes horizontaux ;
- Réservations dans les éléments structurels du bâtiment pour le passage des réseaux de tubes ainsi que l'adaptation éventuelle du ferrailage ;
- Réalisation des tranchées et toutes sujétions nécessaires et mise à disposition avant intervention du titulaire du lot captage énergétique pour les liaisons horizontales. Les positions et dimensions des tranchées seront indiquées sur les plans d'exécution communiqués par l'entreprise de captage énergétique ;
- Lit de sable épaisseur minimum 10 cm en dessous et au droit des réseaux de tubes horizontaux entre pieux et collecteurs en locaux techniques ;
- Chape maigre en béton ou lit de sable épaisseur minimum 10 cm au-dessus et au droit des réseaux de tubes horizontaux ;
- Remblaiement des tranchées ;
- Travaux de terrassement complémentaires nécessaires à la création des zones de collecte des tubes de captage ;

L'entreprise de Gros Œuvre devra prendre toutes les précautions nécessaires pour ne pas entraîner de dégradation des tubes de captage lors de la mise en œuvre des cages de massifs en tête de pieux (destruction des tubes, pli des tubes,...). Les tubes devront être orientés selon les directions indiquées sur les plans d'exécution communiqués par l'entreprise de captage énergétique.

Chaque zone de captage correspondant à la totalité des pieux raccordés à un collecteur devra être réalisée en une seule fois. Le coulage des dalles béton devra être réalisé sur une zone complète de collecte, suivant un zonage précis réalisé en concertation avec le lot captage énergétique.

2.4.3 Limites de prestation avec le lot CVC

La limite de prestation entre le lot géothermie et le lot GEOTHERMIE se situe au niveau des vannes d'arrêt des collecteurs géothermiques.

Le lot GEOTHERMIE fournira au lot CVC :

- Les caractéristiques du fluide de captage (fraction volumique de glycol, caractéristique du glycol,...) afin que le lot CVC puisse remplir les réseaux hydrauliques entre les collecteurs géothermiques et l'évaporateur de la PAC avec un mélange de fluide identique au lot captage énergétique ;
- La note de calcul des pertes de charges maximales du réseau de captage jusqu'aux collecteurs géothermiques / Local PAC et les débits nécessaires au captage énergétique pour le dimensionnement des circulateurs hydrauliques ;
- Les niveaux de températures du fluide caloporteur.

Sont à la charge du lot CVC :

- Transmission à l'entreprise en charge du lot captage énergétique des informations relatives aux puissances maximales à couvrir en chaud (kW),
- Transmission à l'entreprise en charge du lot captage énergétique des informations relatives aux besoins à couvrir en chaud, si possible au pas de temps horaire, ou à minima au pas de temps mensuel (kWh),
- Fourniture et pose des réseaux hydrauliques en local PAC (en aval des vannes d'arrêt du captage énergétique) ;
- Equilibrage des réseaux hydrauliques entre collecteurs géothermiques / pompe à chaleur,
- Pompes de circulation entre le réseau de captage géothermique et la pompe à chaleur,
- Compteur d'énergie ou débitmètre éventuels sur le réseau de captage géothermique,
- Mise en œuvre d'un dispositif de sécurité permettant de garantir que la température de départ vers les réseaux sera supérieure ou égale à 1°C, et inférieure ou égale à 30°C ;
- Remplissage des réseaux hydrauliques entre les collecteurs de géothermie et les équipements du local PAC.

Le lot CVC et le lot GEOTHERMIE se coordonneront afin de réaliser les prestations d'équilibrage hydraulique suivant les limites de prestations précédemment établies :

- Equilibrage des réseaux géothermiques jusqu'aux collecteurs géothermiques à la charge du lot GEOTHERMIE ;
- Equilibrage des réseaux hydrauliques entre collecteurs géothermiques et chaufferie à la charge du lot CVC.

2.5 ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT FONDATIONS SPECIALES

2.5.1 Caractéristique des pieux géothermiques à armaturer toute hauteur

Un total de **50 pieux** de fondations sera équipé de captage géothermique. Ces pieux sont prévus pour une longueur minimale de **15 mètres (Longueur de captage de 750 ml au total)**. Ces pieux seront armaturés toute hauteur. Dans la mesure où l'entreprise de fondations spéciales souhaiterait réaliser des pieux de dimension inférieure, elle devra obtenir préalablement l'autorisation de la Maîtrise d'œuvre et se coordonner avec l'entreprise en charge du lot captage énergétique afin d'identifier les pieux pouvant éventuellement compenser les linéaires de captage à compenser. Elle prendra en ce cas en charge le coût d'équipement géothermique des pieux complémentaires éventuellement à équiper et les coûts des armatures sur les pieux additionnels.

2.5.2 Dimensionnement des pieux géothermiques :

La phase de mise en œuvre sera précédée d'une phase de conception et de dimensionnement. Le dimensionnement des fondations géothermiques nécessite de réaliser plusieurs vérifications et d'intégrer les charges variables induites par les sollicitations géothermiques dans le dimensionnement définitif des fondations. L'entreprise en charge du lot Fondations spéciales transmettra à l'entreprise en charge du lot " captage énergétiques" les charges à l'ELS des pieux correspondants. Elle transmettra en retour les éléments à intégrer dans le dimensionnement définitif au titre de charges variables.

Les étapes de dimensionnement des pieux géothermiques sont les suivantes :

- Etape 1 : Prédimensionnement mécanique des pieux (entreprises de fondations spéciales) sans intégration des effets thermiques du captage énergétique ;
- Etape 2 : Evaluation des effets thermiques des fondations thermoactives par l'entreprise de captage énergétique pour intégration dans le dimensionnement des pieux par l'entreprise de fondations spéciales.
- Etape 3 : Dimensionnement mécanique définitif des pieux de fondation (entreprise de fondations spéciales) avec intégration des charges supplémentaires issues du dimensionnement thermique de l'étape 2.

2.5.3 Recépage sur béton frais

Le recépage sera à la charge du lot fondations spéciales. Il sera impérativement réalisé sur béton frais, afin de ne pas entraîner de dégradations des tubes de captage énergétique lors d'un recépage sur béton fini.

2.5.4 Equipement des cages d'armatures des pieux et réalisation des fondations (Phase 1)

Eléments à la charge du lot FONDATIONS SPECIALES :

- Dimensionnement mécanique des pieux en intégrant les éventuelles charges additionnelles dues aux sollicitations thermiques, ces dernières étant transmises par le titulaire du lot captage énergétique ;
- Fourniture des cages d'armatures toute hauteur des fondations et leur mise à disposition au présent lot au minimum cinq (5) jours ouvrés avant le démarrage de sa propre prestation (travaux de forage) ;
- Manipulation et manutention des cages et mise à disposition permettant leur équipement ;
- Réalisation des pieux ;
- Recépage sur béton frais.

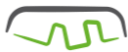
Les manipulations des cages d'armature, leur manutention et leur mise à disposition au titulaire du lot Captage énergétique pour installation des tubes de captage seront à la charge du lot Fondations spéciales.

L'entreprise de fondations spéciales devra prévoir des équipes afin de réaliser le recépage sur béton frais au rythme de la réalisation des pieux de fondations.

Les études d'exécution du captage énergétique seront réalisées par l'entreprise de captage conjointement avec l'ensemble des intervenants impliqués dans la réalisation des fondations spéciales afin d'intégrer l'impact thermique de la géothermie dans le dimensionnement des cages d'armature des pieux de fondation et d'intégrer les contraintes d'intégration dans le planning.

Le lot fondation spéciale devra intégrer les spécificités de mise en œuvre à mettre en place concernant le captage énergétique en termes de planning et de réalisation avec, notamment, la prise en compte du temps d'équipement des tubes sur les cages d'armature des pieux dans le processus de réalisation des fondations.

Eléments à la charge du lot GEOTHERMIE :



- Détermination des charges additionnelles dues aux sollicitations thermiques des pieux ;
- Plans d'exécution captage énergétique ;
- Installation des tubes de captage énergétique dans les cages d'armatures ;
- Essais de mise en pression.

2.5.5 Points d'arrêts pour contrôle et transferts de responsabilité

Point d'arrêt n°1 :

Une fois installés dans les cages d'armatures, les tubes de captage seront mis en pression par le lot captage énergétique afin de vérifier leur étanchéité. Un point d'arrêt consigné par procès-verbal sera effectué avec l'entreprise de fondations spéciales afin de constater la bonne mise en œuvre des tubes de captage et leur intégrité, préalablement à leur insertion dans les forages. En cas d'absence de constat contradictoire, l'entreprise de fondations spéciales sera déclarée acceptée l'équipement des tubes et leur intégrité préalable à leur insertion dans les forages.

Point d'arrêt n°2 :

A l'issue de la phase de réalisation des pieux, un point d'arrêt sera réalisé avec les responsables des lots captage énergétique, fondations spéciales et Gros Œuvre. Le contrôle d'étanchéité des pieux coulés sera réalisé, consigné par procès-verbal puis visé par les personnes présentes.

En cas d'absence du responsable d'une entreprise tenue d'assister au point d'arrêt, le procès-verbal sera déclaré accepté par l'entreprise absente au rendez-vous.

L'entreprise de Gros Œuvre ne pourra débuter son intervention (réalisation des massifs en tête de pieux) avant réalisation du point d'arrêt. En fonction de l'avancement du chantier, un point d'arrêt partiel pourra être réalisé afin de libérer une zone de travail pour que l'entreprise de Gros Œuvre puisse débuter son intervention.

2.6 ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT GROS ŒUVRE

2.6.1 Points d'arrêts pour contrôle des opérations de captage énergétique

2.6.1.1 Phase 1 : réalisation des pieux de fondation et recépage sur béton frais

Point d'arrêt n°2 :

A l'issue de la phase de réalisation des pieux, un point d'arrêt sera réalisé avec les responsables des lots GEOTHERMIE, FONDATIONS SPECIALES et GROS ŒUVRE. Le contrôle d'étanchéité des pieux coulés sera réalisé, consigné par procès-verbal puis visé par les personnes présentes.

En cas d'absence du responsable d'une entreprise tenue d'assister au point d'arrêt, le procès-verbal sera déclaré accepté par l'entreprise absente au rendez-vous.

L'entreprise de Gros Œuvre ne pourra débuter son intervention (réalisation des massifs en tête de pieux) avant réalisation du point d'arrêt. En fonction de l'avancement du chantier, un point d'arrêt partiel pourra être réalisé afin de libérer une zone de travail pour que l'entreprise de Gros Œuvre puisse débuter son intervention.

2.6.1.2 Phase 2 : Liaisons horizontales des tubes jusqu'aux collecteurs de géothermie

Point d'arrêt n°3 :

A l'issue de la phase de réalisation des liaisons horizontales, un point d'arrêt sera réalisé avec les responsables des lots GEOTHERMIE et GROS ŒUVRE. Le contrôle d'étanchéité des liaisons sera réalisé, consigné par procès-verbal puis visé par les personnes présentes.

En cas d'absence du responsable d'une entreprise tenue d'assister au point d'arrêt, le procès-verbal sera déclaré accepté par l'entreprise absente au rendez-vous.

L'entreprise de GROS ŒUVRE ne pourra débuter le remblaiement des tranchées qu'après réalisation du point d'arrêt. En fonction de l'avancement du chantier, un point d'arrêt partiel pourra être réalisé afin de libérer une zone de travail pour que l'entreprise de GROS ŒUVRE puisse débuter son intervention. Pour ce faire, il est impératif que l'entreprise de Gros Œuvre respecte les contraintes de mise en œuvre des tubes de captage par la libération d'une zone de captage complète telle que définie lors des études d'exécution et des réunions de coordination préparatoires.

Aucun travaux de réseau (EU, EV, EP, réseaux hydrauliques, ...) ne devra intervenir sous le niveau des liaisons après réalisation du point d'arrêt et établissement des procès-verbaux d'essai. L'entreprise de GROS ŒUVRE devra tenir compte de cette contrainte dans son planning.

De plus, l'entreprise de Gros-œuvre devra réaliser à minima un contrôle visuel des pressions des réseaux de captage avant réalisation du radier.

2.6.2 Limites de prestation avec le lot GEOTHERMIE

Eléments à la charge du lot GROS ŒUVRE :

- Mise en œuvre des massifs en tête de pieux ;
- Dégagements éventuels autour des têtes de pieux permettant le raccordement des tubes en sortie de pieux vers les réseaux de tubes horizontaux ;
- Réservations dans les éléments structurels du bâtiment pour le passage des réseaux de tubes ainsi que l'adaptation éventuelle du ferrailage ;
- Réalisation des tranchées et toutes sujétions nécessaires et mise à disposition avant intervention du titulaire du lot captage énergétique pour les liaisons horizontales. Les positions et dimensions des tranchées seront indiquées sur les plans d'exécution communiqués par l'entreprise de captage énergétique ;
- Lit de sable épaisseur minimum 10 cm en dessous et au droit des réseaux de tubes horizontaux entre pieux et collecteurs en locaux techniques ;
- Chape maigre en béton ou lit de sable épaisseur minimum 10 cm au-dessus et au droit des réseaux de tubes horizontaux ;
- Remblaiement des tranchées ;
- Travaux de terrassement complémentaires nécessaires à la création des zones de collecte des tubes de captage.

L'entreprise de GROS ŒUVRE devra prendre toutes les précautions nécessaires pour ne pas entraîner de dégradation des tubes de captage lors de la mise en œuvre des cages de massifs en tête de pieux (destruction des tubes, pli des tubes, ...). Les tubes devront être orientés selon les directions indiquées sur les plans d'exécution communiqués par l'entreprise de captage énergétique.

Les tranchées avec lit de sable sont à la charge du lot GROS-ŒUVRE. Chaque zone de captage correspondant à la totalité des pieux raccordés à un collecteur devra être réalisée en une seule fois.

En cas de dégradations des éléments techniques du lot GEOTHERMIE, l'entreprise de Gros Œuvre ou ses sous-traitants est tenue d'en informer le titulaire du lot GEOTHERMIE dans les plus brefs délais. Celui-ci se rendra sur site afin de constater les dégâts éventuels et d'évaluer les possibilités de réparation des éléments dégradés.

Eléments à la charge du lot GEOTHERMIE :

- Plans d'exécution détaillés avec indication des directions de sortie des tubes en massif et indication des zones de captage et liaisons horizontales de raccordement ;
- Liaisons horizontales entre pieux jusqu'aux jusqu'au local PAC.
- Mise en attente des tubes de captage avant raccordement aux collecteurs géothermiques ;
- Essais de mise en pression.



2.7 ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT CVC

2.7.1 Limites de prestation avec le lot GEOTHERMIE

Eléments à la charge du lot GEOTHERMIE :

- Note de calcul de pertes de charge des réseaux de captage énergétique ;
- Indication des débits et températures de fluide dans les réseaux de captage énergétique ;
- Transmission des caractéristiques du fluide caloporteur (mélange eau / monopropylène glycol) au lot CVC ;
- Liaisons horizontales des tubes sous dalle ;
- Collecteurs géothermiques (local « Sous-station Chaud » niveau SS2) ;
- Remplissage du système en mélange eau/monopropylène glycol jusqu'aux collecteurs géothermiques ;
- Purge complète des réseaux ;
- Equilibrage des réseaux de captage jusqu'aux collecteurs géothermiques.

Eléments à la charge du Lot CVC :

- Transmission à l'entreprise en charge du lot captage énergétique des informations relatives aux puissances maximales à couvrir en chaud et en froid (kW) ;
- Transmission à l'entreprise en charge du lot captage énergétique des informations relatives aux besoins à couvrir, en chaud et en froid, si possible au pas de temps horaire, ou à minima au pas de temps mensuel (kWh) ;
- Réseaux hydrauliques et accessoires entre attentes (vannes d'arrêt) du captage énergétique (Cf. 2.2.4) et échangeurs / pompe à chaleur, raccordement sur vanne d'arrêt sur nourrice aller et retour ;
- Pompes de circulation du réseau de captage sur la base des éléments communiqués par le lot captage énergétique ;
- Pot à boue ;
- Vase d'expansion ;
- Filtre éventuel ;
- Equilibrage des réseaux hydraulique entre collecteurs géothermiques et chaufferie ;
- Equipements de régulation, de mesure et de contrôle. Mise en œuvre d'un dispositif de sécurité permettant de garantir que la température de départ vers les réseaux sera supérieure ou égale à 1°C, et inférieure ou égale à 30°C ;
- Débitmètre éventuel sur réseau de captage géothermique ;
- Compteur d'énergie éventuel sur le réseau de captage géothermique.

2.7.2 Réception du système de captage géothermique

Réception définitive du système complet après test de l'installation de captage et validation des pressions du réseau en présence du lot captage géothermique au niveau des collecteurs géothermiques.

2.7.3 Limitation des températures

Les températures de fluide devront être limitées de manière à ne pas engager la fonction structurelle des fondations (1°C et +30°C en entrée de pieux). L'entreprise devra prévoir les dispositions permettant de garantir le non-dépassement de ces consignes de température.

2.8 ADDITIFS SPECIFIQUES AU LOT VRD

Précaution envers le captage énergétique

Un captage énergétique sera mis en œuvre dans les pieux de fondations. Des réseaux horizontaux chemineront des pieux vers les locaux techniques, dans des tranchées prévues à cet effet (à la charge du lot gros œuvre).

Aucuns travaux de réseau (EU, EV, EP, réseaux hydrauliques, ...) ne devra intervenir sous le niveau des liaisons à partir de leur réalisation. L'entreprise de VRD devra tenir compte de cette contrainte dans son planning.

2.9 ELEMENTS COMPLEMENTAIRES A INTEGRER DANS LE CCTP PRESCRIPTIONS COMMUNES

Une réunion de coordination devra être organisée en début de chantier avec les entreprises concernées afin de définir la méthodologie, le phasage de mise en œuvre, les points d'arrêt et les responsabilités incombant à chaque corps d'état.

La procédure sera arrêtée et consignée par la Maîtrise d'œuvre à l'issue de cette réunion. Son application sera de la responsabilité du macro-lot Gros-œuvre.

Une étroite collaboration entre les différents intervenants doit permettre la mise en œuvre optimale de ces captages, en intégrant les éléments de coordination et d'exécution spécifiques dans les méthodologies des corps d'état concernés (Gros œuvre, VRD, Fondations spéciales, CVC).

A l'issue de la phase de réalisation des pieux, un point d'arrêt sera réalisé avec les responsables des lots captage énergétique, fondations spéciales et Gros Œuvre. Le contrôle d'étanchéité des pieux coulés sera réalisé, consigné par procès-verbal puis visé par les personnes présentes.

En cas d'absence du responsable d'une entreprise tenue d'assister au point d'arrêt, le procès-verbal sera déclaré accepté par l'entreprise absente au rendez-vous.

Les travaux de raccordement des réseaux de captage énergétique (liaisons horizontales) débiteront après réalisation des tranchées/réservations. Aucun travaux de réseaux concernant les autres fluides (EU, EV, EP, réseaux hydrauliques, HT, BT...) ne devra intervenir sous le niveau des liaisons géothermiques à partir de leur mise en œuvre. L'entreprise titulaire du lot Gros-œuvre/VRD devra tenir compte de cette contrainte dans son planning.

Un contrôle qualité réalisé permettra la traçabilité de l'intégrité du système et les passages de responsabilités pendant l'intervention des autres lots concernés. Ces contrôles seront réalisés sur toute la durée de mise en œuvre afin de s'assurer qu'aucune dégradation n'aura été occasionnée sur les faisceaux de tubes horizontaux (passage d'engins, cisaillement de tubes par pressions différentielles extérieures,...).

2.10 ELEMENTS COMPLEMENTAIRES A INTEGRER DANS LES CCTP DES AUTRES CORPS D'ETAT (FONDATIONS SPECIALES / GROS ŒUVRE / CVC)

2.10.1 Géothermie (tous lots)

Le captage énergétique sur fondations profondes est basé sur une mise en œuvre débutant lors de la réalisation des fondations des bâtiments et s'achevant au niveau des vannes d'arrêts des collecteurs de géothermie et essais correspondants. La mise en place de ce procédé énergétique nécessite une implication forte de l'ensemble des corps d'état afin de s'assurer de la mise en œuvre des éléments de captage dans les meilleures conditions permettant de garantir la pérennité du système.

2.10.2 Formation / Information

Chaque entreprise sera tenue d'informer son personnel quant à la prise en compte des éléments techniques du captage énergétique dans les gammes de travail habituelles.

Chaque entreprise (GROS-ŒUVRE, FONDATIONS SPECIALES, VRD, CVC) devra désigner un responsable tenu d'assister aux points d'arrêt les concernant.

Une réunion de coordination devra être organisée en début de chantier avec les entreprises concernées afin de définir la méthodologie, le phasage de mise en œuvre, les points d'arrêt et les responsabilités incombant à chaque corps d'état.

La procédure sera arrêtée et consignée par la Maîtrise d'œuvre à l'issue de cette réunion. Son application sera de la responsabilité du macro-lot GROS-ŒUVRE.

2.10.3 Points d'arrêts

Chaque phase de mise en œuvre fera l'objet d'un point d'arrêt dont le but est de réaliser un test d'intégrité sur les éléments installés. Y seront présents le titulaire du lot GROS-ŒUVRE ainsi que les responsables des entreprises amenées à intervenir dans les zones d'installation ou de passage des éléments techniques du lot captage énergétique.

- **Point d'arrêt 1** : Après installation des tubes échangeurs dans les cages d'armatures et avant réalisation des pieux de fondations (GEOTHERMIE / FONDATIONS SPECIALES) ;
- **Point d'arrêt 2** : Après réalisation des pieux de fondations (entreprises GEOTHERMIE / FONDATIONS SPECIALES / GROS ŒUVRE) ;
- **Point d'arrêt 3** : Après réalisation des liaisons horizontales entre pieux ou groupes de pieux jusqu'aux collecteurs géothermiques (GEOTHERMIE / GROS ŒUVRE) ;
- **Point d'arrêt 4** : Après réalisation des collecteurs (GEOTHERMIE / CVC).

Chaque test d'intégrité sera basé sur un test de mise en pression des réseaux de tubes afin de vérifier leur étanchéité. Un procès-verbal contradictoire sera rédigé à l'issue des tests d'intégrité. La phase suivante ou la poursuite des travaux des autres corps d'état ne pourra être engagée avant réalisation du point d'arrêt.

2.10.4 Dégradation des éléments techniques du captage énergétique

En cas de dégradation des éléments techniques du captage énergétique, l'entreprise responsable ou son sous-traitant est tenue d'en informer le titulaire du lot captage énergétique dans les plus brefs délais. Celui-ci se rendra sur site afin de constater les dégâts éventuels et d'évaluer les possibilités de réparation des éléments dégradés. Les frais de réparation (transport, matériels et main-d'œuvre) seront directement imputés à l'entreprise responsable des dégradations.

Si des dégâts à répétition sont constatés lors d'une même phase de réalisation, une réunion technique devra être provoquée par l'entreprise responsable. Une solution technique viable devra être déterminée d'un commun accord et intégrée dans les gammes de travail de l'entreprise concernée.

Il convient de souligner que tout élément dégradé de manière irréversible entraînera une perte d'exploitation dans la fourniture énergétique du système au bâtiment.

2.10.5 Phasage de mise en œuvre

Le captage énergétique sur fondations profondes se déroule en quatre phases principales, chacune nécessitant une collaboration étroite avec les différents corps d'état concernés :

- Phase 1 : Equipement des cages d'armatures des pieux (Point d'arrêt 1)
- Phase 2 : Réalisation des fondations (Point d'arrêt 2) ;
- Phase 3 : Liaisons horizontales des tubes sous dalle (Point d'arrêt 3) ;
- Phase 4 : Installation des collecteurs de géothermie (Point d'arrêt 4) ;
- Phase 5 : Remplissage, purge et équilibrage du système.

Au cours de chaque phase, l'impact des éléments techniques du système de captage énergétique doit être explicitement pris en compte par tous les corps d'état tant en termes de mise en œuvre que de planning.

AIA Ingénierie

Hôpital Robert Debré - Institut du Cerveau de l'enfant

Mission d'assistance technique

Etude technique de faisabilité pour l'étude de mise en œuvre d'un système de géothermie sur pieux

Rapport de géomodélisation



ECOME Ingénierie :

65 rue Jean-Jacques Rousseau
92150 Suresnes
Tel. : 09.81.71.16.02



AIA Ingénierie :

20 rue Lortet
69007 Lyon
Tel. : 04.72.18.02.40

Phase	Date	Version	Révision	Réalisé par
Faisa	20/12/2024	A		QS
Faisa	07/01/2025	B		QS
Faisa	04/02/2025	C		QS

Sommaire :

1	PRESENTATION DU PROJET	4
1.1	CONTEXTE	4
1.2	DOCUMENTS DE REFERENCE	4
2	SYNTHESE	5
3	ETUDE DU PROJET	6
3.1	DESCRIPTION DU PROJET	6
3.2	BILAN ENERGETIQUE	6
3.3	FONCTIONNEMENT DE L'INSTALLATION	9
3.3.1	SCHEMA DE L'INSTALLATION	9
3.3.2	CONFIGURATIONS DE FONCTIONNEMENT ENVISAGEES EN RAFRAICHISSEMENT	10
4	ÉTUDE DE LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE	11
4.1	PRINCIPE	11
4.2	CAPTAGE SUR BOUCLE OUVERTE ET SUR BOUCLE FERMEE	11
4.3	DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE A CHALEUR (PAC)	12
4.3.1	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	12
4.3.2	PERFORMANCE ET NIVEAUX DE TEMPERATURE	13
4.4	CAPTAGE GEOTHERMIQUE	14
4.4.1	CONTEXTE GEOLOGIQUE LOCAL	14
4.4.2	IMPLANTATION DU CAPTAGE GEOTHERMIQUE	16
4.4.3	MISE EN PLACE DE PIEUX GEOTHERMIQUES	17
4.4.4	HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT	20
4.5	RESULTAT DU DIMENSIONNEMENT	21
4.5.1	PRINCIPAUX RESULTATS	21
4.5.2	COUVERTURE DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DE CHAUFFAGE « SORTIE CHAUFFERIE »	23

Liste des figures :

Figure 1 : Plan masse du projet (Architecte).	4
Figure 2 : Consommation "sortie chaufferie" pour le chauffage / rafraîchissement.	7
Figure 3 : Courbe de charge monotone des consommations "sortie chaufferie" pour le chauffage.	7
Figure 5 : Courbe de charge monotone des consommations "sortie chaufferie" pour le rafraîchissement. ...	8
Figure 6 : Extrait du synoptique hydraulique de l'installation.	9
Figure 6 : Extrait du synoptique aéraulique de l'installation.....	9
Figure 14 : Température de production en fonction des conditions extérieures.	10
Figure 15 : Température moyenne de production des PAC en chauffage.	10
Figure 9 : Principe de géothermie par PAC eau/eau sur « boucle fermée ».	11
Figure 10 : Principe de géothermie par PAC eau/eau sur « circuit ouvert ».	11
Figure 11 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur. [Source : BRGM].	12
Figure 12 : Evolution du COP en fonction de la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur.	13
Figure 13 : Carte géologique du secteur [Source : Etude géotechnique].....	14
Figure 15 : Evolution des températures mini/maxi dans les réseaux.	22
Figure 16 : Evolution des températures aller/retour dans le système sur la 25ème année.	22
Figure 17 : Evolution du COP mensuel brut en fonction du temps.	23
Figure 20 : Couverture des consommations « sortie chaufferie » de chauffage par le système - année 25..	23
Figure 21 : Courbe de charge monotone des consommations « sortie chaufferie » de chauffage couvertes par le système - année 25.....	24
Figure 22 : Couverture des consommations « sortie chaufferie » de chauffage par le système - année 25..	24
Figure 23 : Courbe de charge monotone des consommations « sortie chaufferie » de chauffage couvertes par le système - année 25.....	24

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Consommations "sortie chaufferie" par poste.	6
Tableau 2 : Détermination des données thermiques du sol.	15
Tableau 3 : Hypothèses sous-sol.	15
Tableau 4 : Prédimensionnement des pieux (G2 AVP).....	16
Tableau 5 : Coupe géologique interprétative (G2 AVP).	16
Tableau 6 : Hypothèses pour les dimensionnements sur pieux.....	20
Tableau 7 : Résultats du dimensionnement.	21
Tableau 8 : coût estimatif de la mise en œuvre des systèmes de captage géothermique.Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 9 : Intégration des subventions du Fonds Chaleur ADEME. Erreur ! Signet non défini.	

1 Présentation du projet

1.1 Contexte

Dans le cadre de la construction de l'Institut du cerveau de l'enfant sur le site de l'Hôpital Robert Debré à Paris (19^{ème}), il est souhaité d'étudier les potentialités offertes par la mise en œuvre d'une installation de géothermie éventuelle. A cet effet, il a été demandé à la société ECOME Ingénierie d'analyser les potentialités géothermiques sur pieux de fondation.

La présente note a pour objectif de présenter les résultats de l'étude de faisabilité de la mise en place d'une solution de production géothermique pour alimenter le projet.

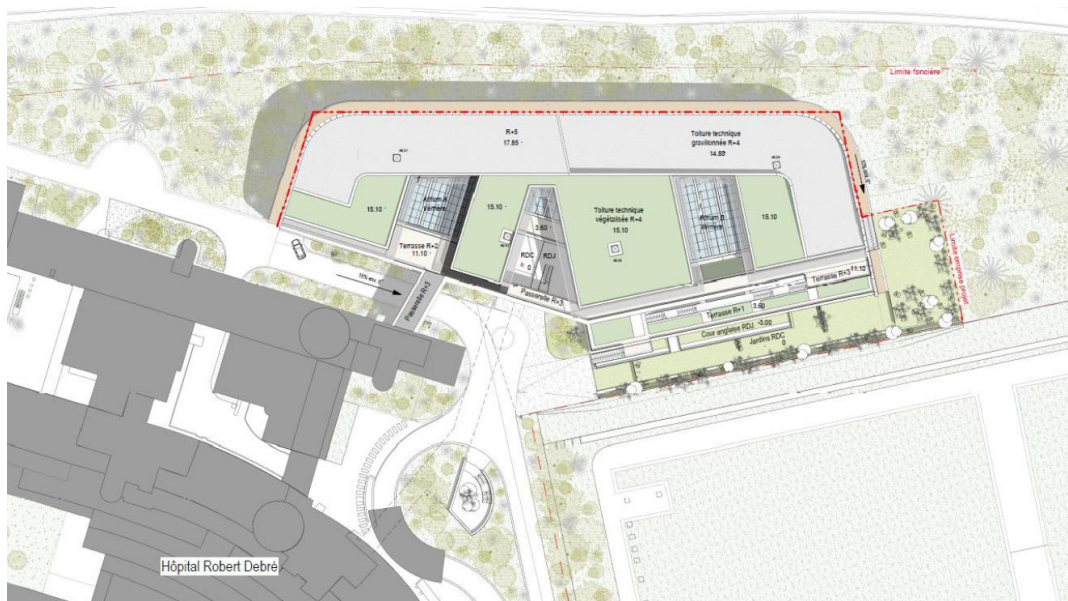


Figure 1 : Plan masse du projet (Architecte).

1.2 Documents de référence

L'étude de faisabilité du système géothermique a été réalisée sur la base des éléments suivants du projet transmis par les différents interlocuteurs à la date d'émission du présent rapport :

- Notice G2 AVP « A129685_Hôpital Robert Debré_ICE_G2 AVP_vB »;
- Plan de structure : « 6100 - Plan de structure FONDATIONS », « 6101 - Plan de structure PLANCHER HAUT SS2 », « 6102 - Plan de structure PLANCHER HAUT SS1 », « 6103 - Plan de structure PLANCHER HAUT RJ », « 6104 - Plan de structure PLANCHER HAUT RC », « 6105 - Plan de structure PLANCHER HAUT N1 », « 6105 - Plan de structure PLANCHER HAUT N2 », « 6105 - Plan de structure PLANCHER HAUT N3 », « 6105 - Plan de structure PLANCHER HAUT N4 » ;
- Export STD : « ICE - Puissance horaire chaud Hall 2 - 02012025 » ;
- Schéma hydraulique de principe : « ICE_APD_7100_CVC_Carnet synoptique » ;
- Notice CVCD : « ICE_APD_0120_NOT_LotCVCD ».

Les résultats présentés dans cette note sont basés sur les éléments cités précédemment. Toute modification ou mise à jour apportée à ces éléments est susceptible de remettre en cause le dimensionnement de l'installation géothermique présenté dans ce rapport.

2 Synthèse

Plusieurs simulations réalisées de manière itérative ont permis de valider que **750 ml de captage (50 pieux d'une profondeur moyenne de 15 ml)** étaient nécessaires afin de garantir les performances du système sur la durée :

- Le système géothermique est en mesure de couvrir la l'intégralité des consommations énergétiques de chauffage et de rafraîchissement du projet ;
- Les mises à jour des données de simulations (besoin themiques à prendre en compte, conditions de fonctionnement), viennent confirmer les résultats de la version A du rapport ;
- Le système est fortement déséquilibré du point de vue thermique. En effet l'énergie injectée représente seulement 22% de l'énergie extraite ce qui implique un refroidissement progressif du sol au cours du temps ;
- On notera que c'est la puissance qui est dimensionnante dans ce scénario. En effet les ratios de puissance extraite / injectée sont supérieurs aux ratios usuels (40W/ml). En revanche les ratios concernant l'énergie extraite sont « normaux » par rapports aux ratios usuels (35-60 kWh/ml/an) ;
- Le COP moyen sur 25 ans est de 6,1 ce qui correspond à la production d'environ 2,6 Tep/an ;
- Le débit présenté ci-dessus est le débit minimal à faire circuler dans les pieux afin de garantir un écoulement de type turbulent (favorisant l'échange thermique) ;;
- **Afin d'améliorer la « balance thermique du sosu-sol », le système serait en mesure de couvrir des besoins de rafraîchissement complémentaires.**

Remarque : La réalisation d'un forage et d'un test de réponse thermique permettront de déterminer définitivement les capacités thermiques du sous-sol.

3 Etude du projet

3.1 Description du projet

Le bâtiment concerné par le projet est composé de 2 niveaux en infrastructures (SS1 et SS2) et de 6 niveaux en superstructures (RDJ,RDC, R+1-> R+4).

Il est prévu que le système géothermique soit dédié au traitement thermique du hall d'accueil et réception du bâtiment situé à RDJ.. A cet effet les données présentées ci-après sont « centrées » sur cette partie du bâtiment.

3.2 Bilan énergétique

Le dimensionnement des systèmes de captage géothermique nécessite des informations sur les puissances et les consommations au pas de temps horaire. Dans le cas présent, ces informations ont été transmises par le AIA sous la forme d'un tableur EXCEL. Ces données sont issues d'une STD

Il est considéré que les surpuissances pour relances et les pertes liées à la distribution / émission sont intégrées aux données transmises. On parlera ainsi de consommations « sortie chaufferie ».

Le tableau ci-dessous présente les consommations et puissances "sortie chaufferie "pour le chauffage, l'ECS et le rafraîchissement réparties au pas de temps mensuel :

	Consommations de chauffage "sortie chaufferie" (MWh/an)	Puissance chauffage (kW)	Consommations ECS "sortie chaufferie" (MWh/an)	Puissance ECS (kW)	Consommations de rafraîchissement "sortie chaufferie" (MWh/an)	Puissance Rafraîchissement (kW)
Janvier	8,3	45,2	0,0	0,0	0,0	0,1
Février	6,6	48,7	0,0	0,0	0,0	0,1
Mars	4,9	37,6	0,0	0,0	0,0	0,2
Avril	2,3	36,4	0,0	0,0	0,0	1,4
Mai	0,5	17,4	0,0	0,0	0,3	9,6
Juin	0,3	20,2	0,0	0,0	1,1	15,9
Juillet	0,0	0,3	0,0	0,0	2,2	17,6
Août	0,0	0,3	0,0	0,0	2,6	17,7
Septembre	0,2	13,3	0,0	0,0	0,6	14,3
Octobre	1,7	32,0	0,0	0,0	0,1	6,4
Novembre	5,4	38,2	0,0	0,0	0,0	0,3
Décembre	5,6	39,0	0,0	7,3	0,0	0,4
Total	35,7		0,0		7,0	

Tableau 1 : Consommations "sortie chaufferie" par poste.

Les consommations de chauffage "sortie chaufferie" s'élèvent à 36 MWh pour une puissance maximale appelée (horaire) de 49 kW. Il n'y a pas de besoins d'ECS. Concernant le rafraîchissement, les consommations "sortie chaufferie" s'élèvent à 7 MWh pour une puissance maximale appelée (horaire) de 18 kW

Remarque :

- La partie de bâtiment traitée par le système géothermique est caractérisée par une demande de chauffage largement majoritaire (rapport de 5 pour 1) vis-à-vis du rafraîchissement ;
- On notera que par rapport à la version A du rapport, les consommations de rafraîchissement « sortie chaufferie » ont été augmentées de 75%.

Le graphique ci-dessous présente la répartition horaire des consommations "sortie chaufferie" pour le chauffage et le rafraîchissement :

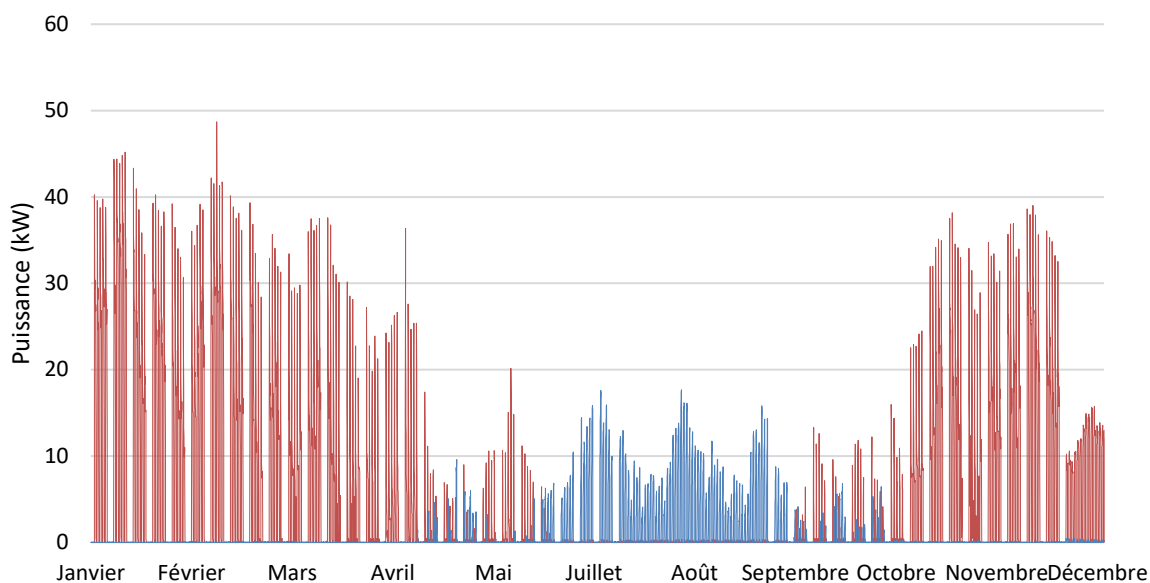


Figure 2 : Consommation "sortie chaufferie" pour le chauffage / rafraîchissement.

Le graphique ci-dessous présente la courbe de charge monotone des consommations "sortie chaufferie" pour le chauffage :

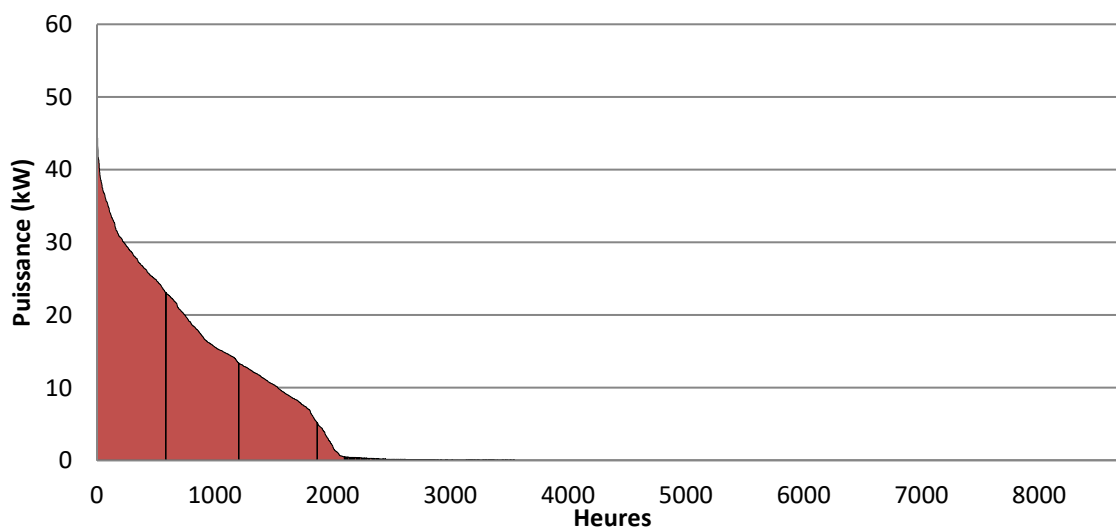


Figure 3 : Courbe de charge monotone des consommations "sortie chaufferie" pour le chauffage.

Les appels de puissances sont présents environ 2200h/an. La puissance appelée est supérieure à 20 kW environ 800h/an.

Le graphique ci-dessous présente la courbe de charge monotone des consommations "sortie chaufferie" pour le rafraîchissement :

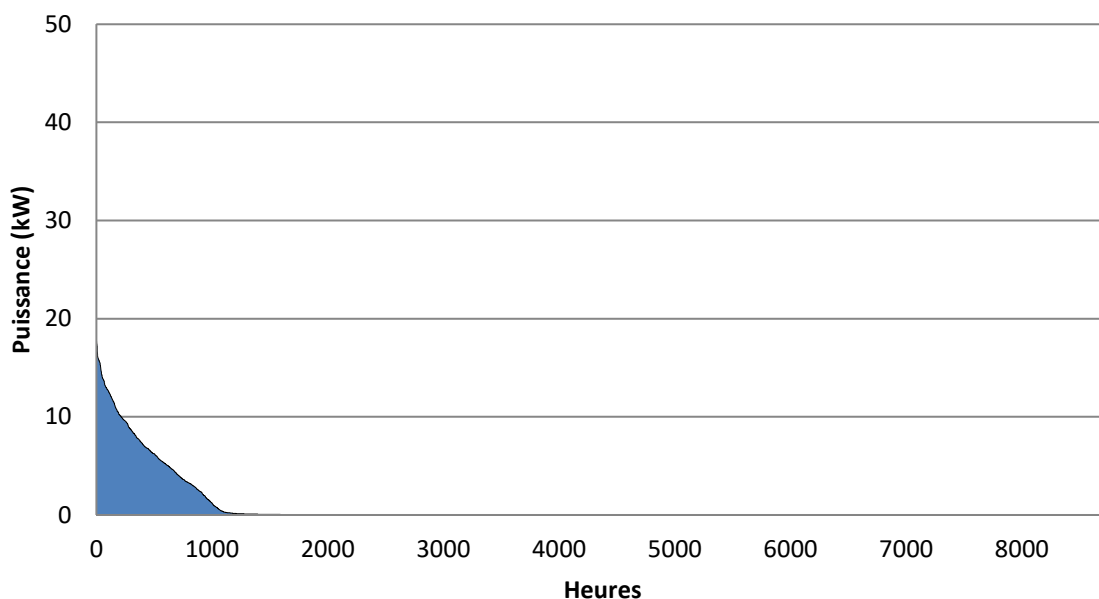


Figure 4 : Courbe de charge monotone des consommations "sortie chaufferie" pour le rafraîchissement.

Les appels de puissances pour le rafraîchissement sont présents environ 1200h/an. La puissance appelée est supérieure à 10 kW environ 180h/an.

Remarque : L'analyse des données indique des périodes de simultanéité entre les besoins de chauffage et les besoins de rafraîchissement. On relève ainsi 1700h de simultanéité pour des besoins très faibles de l'ordre de 2 MWh.

3.3 Fonctionnement de l'installation

3.3.1 Schéma de l'installation

Il n'est pas prévu en base de production géothermique dans le cadre du projet. Dans le cadre de l'étude il est souhaité étudier la mise en place d'un captage géothermique associé à une PAC à compression électrique (Type Weishaupt WWP S 50 ID dans le cadre de l'étude) afin d'assurer la couverture des besoins de chauffage et rafraîchissement du hall d'accueil du bâtiment.

Cette partie du bâtiment sera traitée thermique par 2 émetteurs distincts ;

- Plancher chauffant / rafraîchissant RDJ ;
- Batterie chaude de la CTA Hall ;

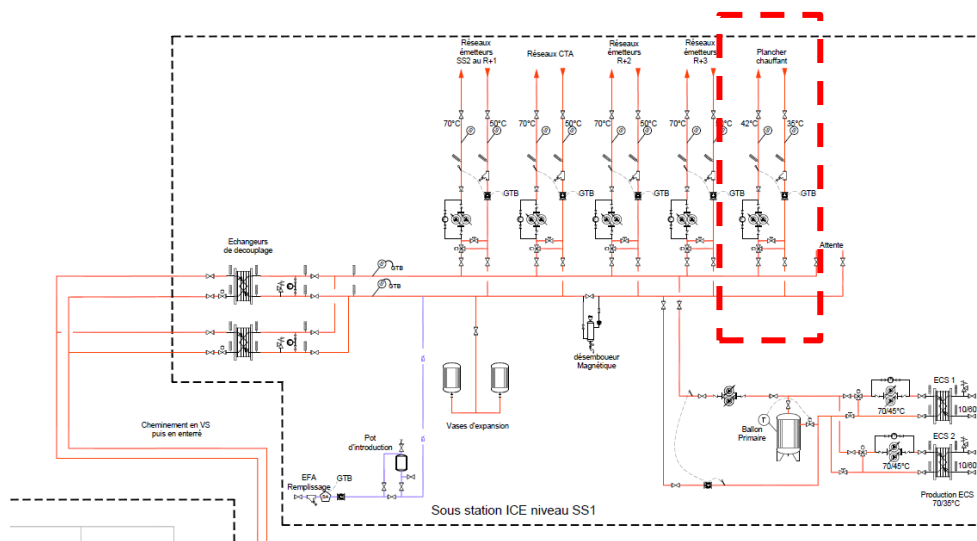


Figure 5 : Extrait du synoptique hydraulique de l'installation.

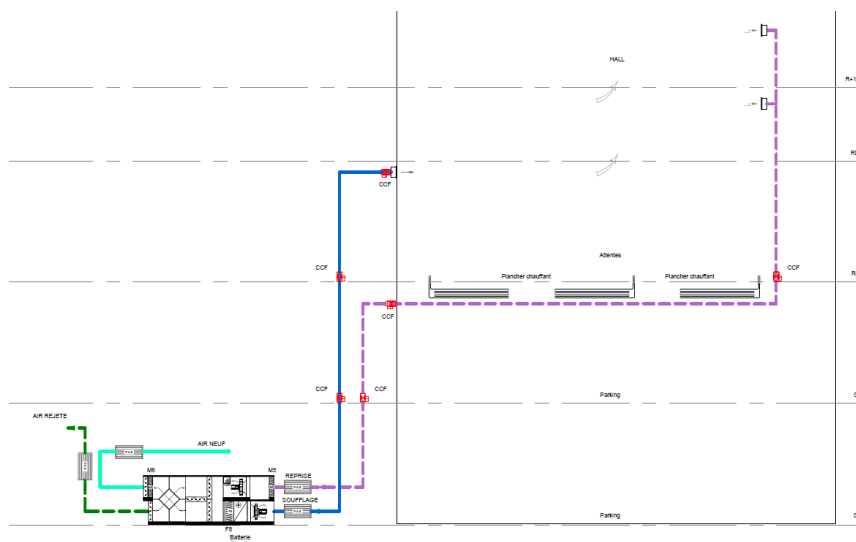


Figure 6 : Extrait du synoptique aéraulique de l'installation.

La PAC sera régulée suivant une loi d'eau (Cf. ci-après) supérieure à la courbe de chauffe des réseaux de distribution (dans la mesure du possible) de manière à répondre à l'ensemble des sollicitations tout en limitant les courts cycles en mi-saison (et la sollicitation thermique du sol par la dégradation du COP).

Avec une température maximale de production de 35°C, l'ensemble des consommations énergétiques « sortir chaufferie » pourront être couvertes (indépendamment de la puissance).

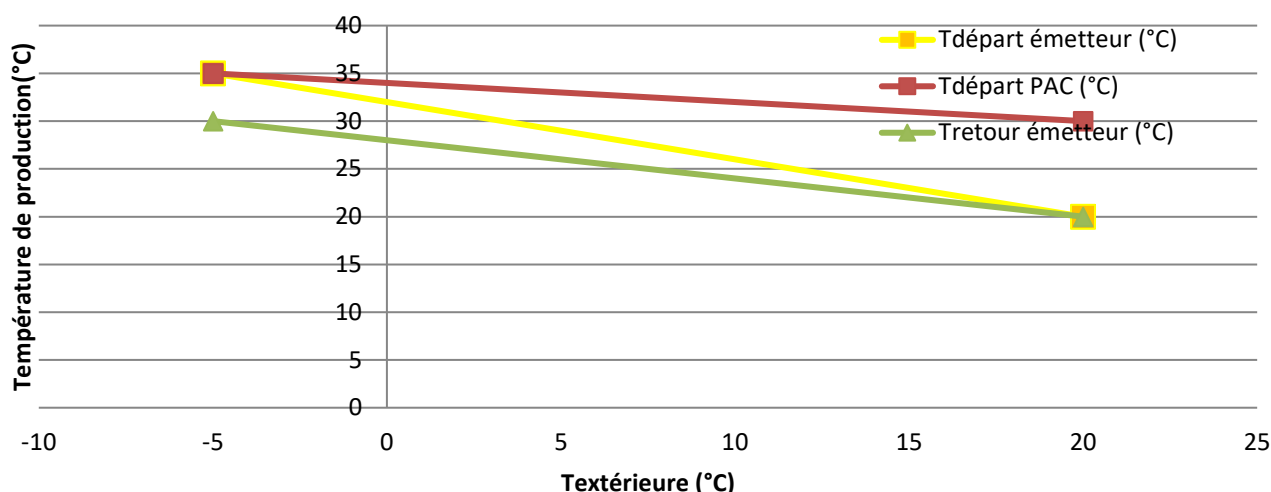


Figure 7 : Température de production en fonction des conditions extérieures.

Le graphique ci-après présente l'évolution de la température de production de la PAC en fonction de la demande :

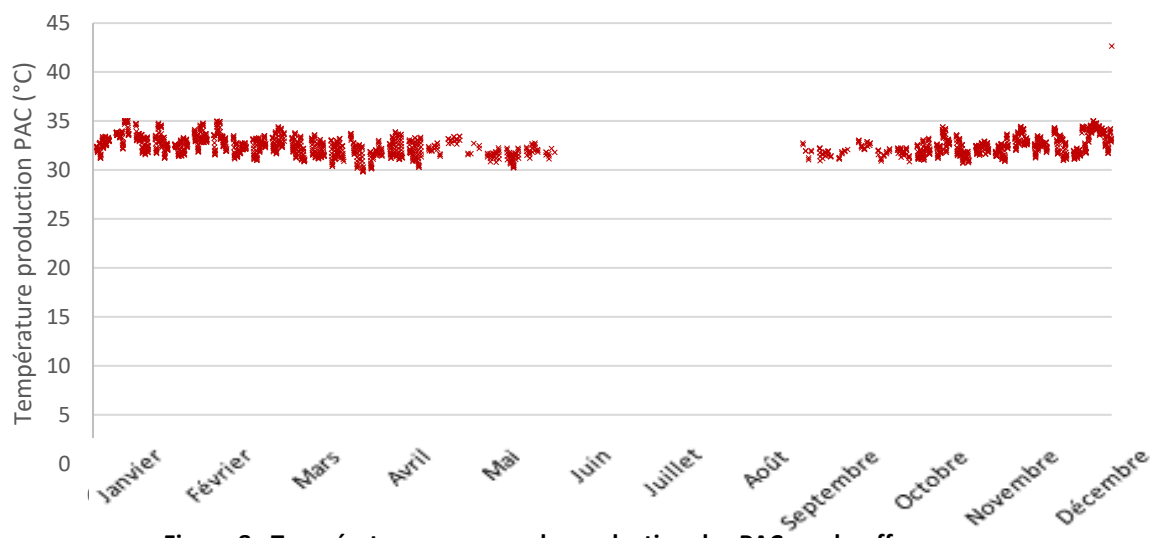


Figure 8 : Température moyenne de production des PAC en chauffage.

On peut observer que les PAC fonctionneront avec une température moyenne de production d'environ 32,5°C (températures moyennes horaires de production pondérées des quantités d'énergies produites).

3.3.2 Configurations de fonctionnement envisagées en rafraîchissement

Lors des périodes de rafraîchissement, le système fonctionnera en geocooling avec une loi d'eau avec un régime 18,5 / 21,5°C. On retiendra un pincement d'échangeur de 1°K.

4 Étude de la ressource géothermique

4.1 Principe

La géothermie très basse énergie repose sur l'utilisation de nappes superficielles présentes dans le proche sous-sol ou d'échangeurs de chaleur (sondes géothermiques, fondations thermoactives...) avec une ressource à une température comprise entre 10 et 15°C nécessitant d'installer un système thermodynamique de type pompe à chaleur pour relever le niveau de température. Cette contrainte impose l'installation d'émetteurs de chaleur basse température (radiateur basse température, plancher chauffant...) dans les bâtiments exploitant cette ressource géothermique.

En fonction des ressources locales disponibles, l'utilisation de la nappe phréatique permet de couvrir des puissances plus importantes voire d'envisager l'alimentation d'un réseau de chaleur.

Les sondes présentent l'avantage de pouvoir être implantées partout en France sauf contexte géologique particulier. En revanche, cette technique est plus adaptée à des faibles et moyennes puissances car les investissements deviennent conséquents lorsqu'il s'agit de couvrir des puissances élevées.

4.2 Captage sur boucle ouverte et sur boucle fermée

Dans le cas d'une pompe à chaleur géothermique, le captage de l'énergie peut se faire sur un circuit fermé ou sur un circuit ouvert.

Le principe de la « boucle fermée » est de faire circuler de l'eau en boucle dans le sol afin de la réchauffer en captant les calories du terrain. Cette boucle, généralement constituée de tubes en polyéthylène peut être installée dans une sonde de géothermie, dans les fondations, en captage horizontal...

Le principe de la géothermie sur « circuit ouvert » consiste à pomper de l'eau dans une nappe phréatique ou eaux de ruissellement afin d'en extraire des calories, puis de la rejeter plus froide dans cette même nappe en aval.

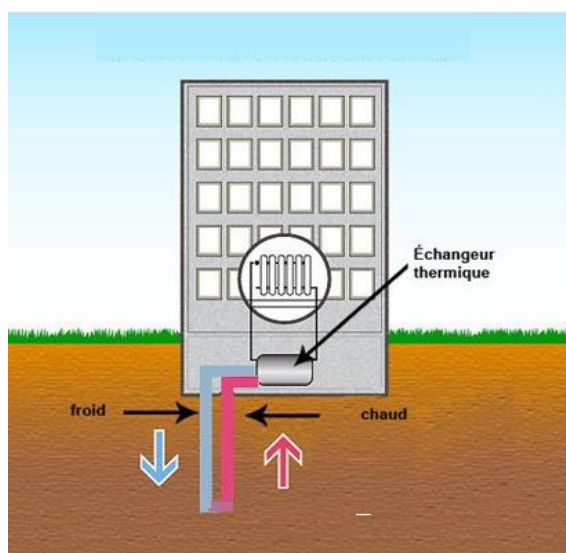


Figure 9 : Principe de géothermie par PAC eau/eau sur « boucle fermée ».

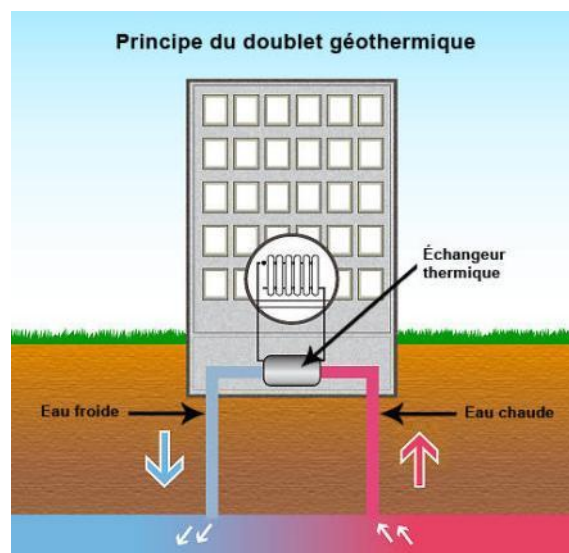


Figure 10 : Principe de géothermie par PAC eau/eau sur « circuit ouvert ».

4.3 Description du fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)

4.3.1 Principe de fonctionnement

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique permettant de transférer les calories entre deux milieux, la source froide (extraction d'énergie : sous-sol, eau de nappe...) et la source chaude (diffusion d'énergie : réseau de chauffage...). Ce système est donc capable d'extraire les calories présentes dans un fluide et de les restituer à un autre fluide.

Si la pompe à chaleur est réversible, les sources « froide » et « chaude » peuvent être inversées ce qui permet de réaliser le chauffage ou le rafraîchissement du bâtiment suivant les besoins.

La chaleur prélevée dans la source froide est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur (1'). Le fluide change d'état et se transforme en vapeur (1). Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température (2). C'est au niveau du condenseur que la vapeur en se condensant transmet sa chaleur au milieu à chauffer (2'). La température de ce dernier s'abaisse fortement (3) le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer (4, 5).

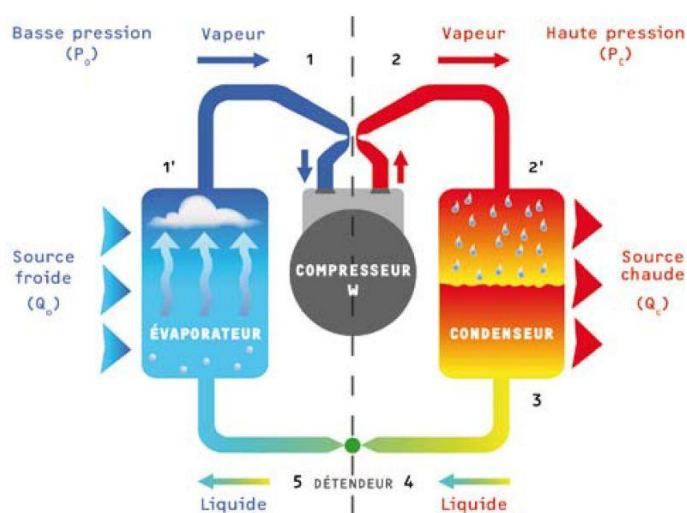


Figure 11 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur. [Source : BRGM].

4.3.2 Performance et niveaux de température

La performance d'une pompe à chaleur est caractérisée par son Coefficient de Performance (COP). Par exemple, une pompe à chaleur dont le coefficient de performance est de 4, va produire 4 kWh d'énergie thermique pour 3 kWh captés dans le sous-sol et 1 kWh d'électricité consommée. Concernant les installations géothermiques et plus particulièrement sur nappe phréatique, il est nécessaire d'intégrer aux consommations des auxiliaires (pompe(s) de forage, pompes de charge PAC).

Le coefficient de performance va dépendre de la température de la source froide (évaporateur) et de la température désirée côté source chaude (condenseur). Plus l'écart entre les niveaux de température côté source froide et côté source chaude est important, plus le COP sera faible et inversement.

L'évolution du COP en fonction des températures côté source froide (évaporateur) et côté source chaude (condenseur) sont présentées sur le graphique suivant :

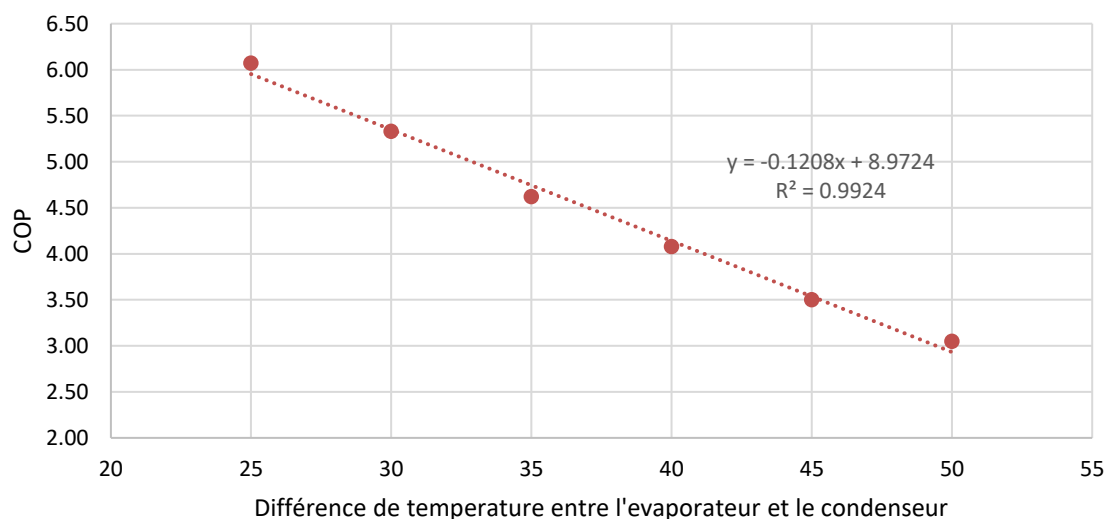


Figure 12 : Evolution du COP en fonction de la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur.

Les pompes à chaleur sont capables de délivrer des températures maximales côté source chaude de l'ordre de 55°C. Certaines pompes à chaleurs dites « haute température » sont capables d'atteindre 65°C.

Il est important de souligner que lorsque les températures côté source froide sont les plus faibles, les pompes à chaleur ne sont plus en mesure d'assurer les températures maximales côté source chaude.

Du fait de ces niveaux de température maximaux, les pompes à chaleur doivent être associées à des émetteurs fonctionnant à des régimes de température bas (planchers chauffants/rafraîchissants, radiateurs basse température, ventilo-convecteurs, poutres climatiques...). Par conséquent, les surfaces d'émission installées dans les bâtiments sont beaucoup plus importantes en comparaison à des systèmes d'émission haute température (radiateurs, panneaux rayonnants, aérothermes...).

4.4 Captage géothermique

4.4.1 Contexte géologique local

D'après la carte géologique au 1/5000ème du 19ème arrondissement de Paris et sa proche banlieue, la stratigraphie attendue au droit du site est la suivante :

- **Remblais** : Formation superficielle d'origine anthropique, d'épaisseur généralement variable liée à l'aménagement du site et à la construction du boulevard périphérique ;
- **Calcaire de Brie (Sannoisien supérieur – g1b)** : Cette formation géologique est caractérisée par une alternance de bancs calcaires saccharoïde tendre et de marnes, parfois sableuses, verdâtres. Au droit du site, cette formation peut être présente sur des épaisseurs variant de 1 à 3 m.
- **Argile verte (Sannoisien inférieur – g1a)** : Ces argiles sont feuilletées vertes et brunâtres, et peuvent présenter des bancs de sable très fin. Cette formation voit varier son épaisseur entre à 9 m. Au droit du site, cette formation est mentionnée sur une épaisseur variable de 2 à 9 m.
- **Marnes supragypseuses (Ludien supérieur – e7c)** : Formation subdivisée en deux niveaux distincts :
- **Marnes blanches de Pantin** : Horizon de marnes calcaires blanchâtres ou grisâtres, à montmorillonite et illite, pouvant renfermer sur leur partie supérieure un banc de gypse de 1 m environ, discontinu sous Belleville. Cet horizon a une épaisseur moyenne variant entre 3 et 4 m.
- **Marnes bleues d'Argenteuil** : Marnes bleues, à montmorillonite et illite, d'environ 8 à 11 mètres d'épaisseur, devenant souvent calcareuses en base. Elle peut localement contenir 3 bancs de gypse saccharoïde très durs.
- **Masses et marnes du gypse (Ludien moyen – e7b)** : Alternance de masses de gypse et de bancs marneux sur une épaisseur pouvant atteindre 20 m.

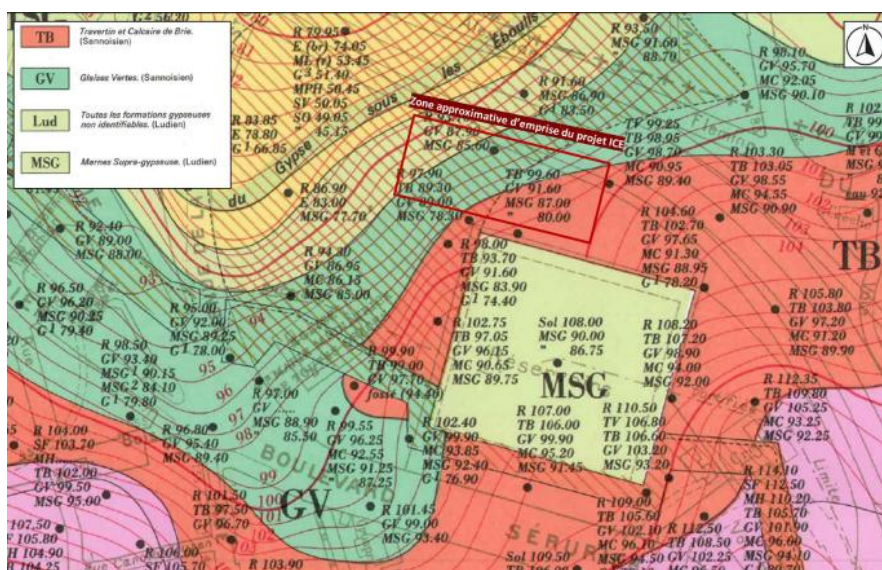


Figure 13 : Carte géologique du secteur [Source : Etude géotechnique].

A partir de l'analyse du tableau ci-dessous et de la bibliographie existante, il est possible de déterminer les hypothèses à prendre en compte pour la géomodélisation :

Profondeur (m)	Epaisseur (m)	Terrain rencontré	Conductivité thermique	Capacité thermique
de 0 à 6 m	6	Remblais	1,8	2.40
de 6 à 7,5 m	1,5	Calcaires de brie	2,2	2.30
de 7,5 à 13,5 m	6	Argiles vertes	1,6	2.40
de 13,5 à 16,5 m	3	Marnes blanches de Pantin	2,1	2.30

de 16,5 à 18,5 m	2	Marnes bleues d'Argenteuil	1,6	2.40
de 18,5 à 21 m	2,5	Masses et marnes du gypse	2,2	2.30
Valeurs à prendre en compte :			1,84	2,40

Tableau 2 : Détermination des données thermiques du sol.

Concernant la température initiale du sol, une première approche est de considérer que celle-ci est égale à la température moyenne de l'air extérieur sur l'ensemble de l'année.

Afin de tenir compte de l'incertitude sur les données, les valeurs conservatrices récapitulées dans le tableau suivant ont été utilisées :

Paramètres	Valeurs
Température initiale du terrain T_i (°C)	11,60 °C
Conductivité thermique du sol λ (W/ (m.K))	1,84 W/m/K
Capacité thermique volumique du terrain C_v (MJ/ (m³.K))	2,40 MJ/ (m ³ .K)

Tableau 3 : Hypothèses sous-sol.

On notera que d'après ma bibliographie, le terrain présente des dispositions favorables pour la réalisation d'un captage géothermique.

- Concernant la conductivité thermique du sol (capacité à échanger de l'énergie), la valeur prise en compte se trouve dans la tranche basse de l'intervalle des valeurs couramment rencontrées pour la réalisation de ce type de captage ($1,5 < \lambda < 3,5$ W/ (m.K)) ;
- Concernant la température initiale du sol, celle-ci est élevée ce qui aura tendance à favoriser la production de chauffage par la PAC, mais à l'inverse dévaforisera la production de rafraîchissement ;
- S'agissant de la capacité thermique (quantité d'énergie par volume de terrain), celle-ci est bonne.

Remarque : Seule la réalisation d'un forage et d'un test de réponse thermique sont susceptibles de déterminer la faisabilité technique d'un forage et les capacités thermiques du sous-sol.

4.4.2 Implantation du captage géothermique

Les caractéristiques des fondations du bâtiment ont été transmises via l'étude géotechnique G2 AVP. L'étude géotechnique définie à ce stade des pieux ayant une longueur comprise en 13 et 18m de profondeur. Ces profondeurs sont définies pour :

- Une tête de pieux à +95mNGF ;
- Un ancrage dans les marnes d'Argenteuil ou les Masses et Marnes du gypse, soit entre +77 et +82 mNGF par rapport à la localisation du pieux.

Tête pieu m NGF	Ancrage m NGF	L	Φ m	RC _{ELS:QP} kN	RC _{ELS:CAR} kN	RC _{ELU:FON} kN	RC _{ELU:ACC} kN
95	82	13	1,0	2 451	2 997	4 015	4 417
95	81	14	1,0	2 815	3 442	4 663	5 130
95	80	15	1,0	3 180	3 889	5 314	5 846
95	79	16	1,0	3 322	4 062	5 517	6 069
95	78	17	1,0	3 464	4 236	5 720	6 293
95	77	18	1,0	3 621	4 428	5 944	6 539
95	82	13	0,8	1 816	2 221	2 924	3 217
95	81	14	0,8	2 071	2 533	3 370	3 708
95	80	15	0,8	2 328	2 846	3 819	4 201
95	79	16	0,8	2 441	2 986	3 982	4 380
95	78	17	0,8	2 555	3 125	4 144	4 559
95	77	18	0,8	2 680	3 278	4 323	4 756
95	82	13	0,6	1 254	1 534	1 977	2 175
95	81	14	0,6	1 418	1 734	2 258	2 484
95	80	15	0,6	1 583	1 937	2 540	2 794
95	79	16	0,6	1 669	2 041	2 662	2 929
95	78	17	0,6	1 754	2 145	2 784	3 063
95	77	18	0,6	1 848	2 260	2 918	3 210

Tableau 4 : Prédimensionnement des pieux (G2 AVP).

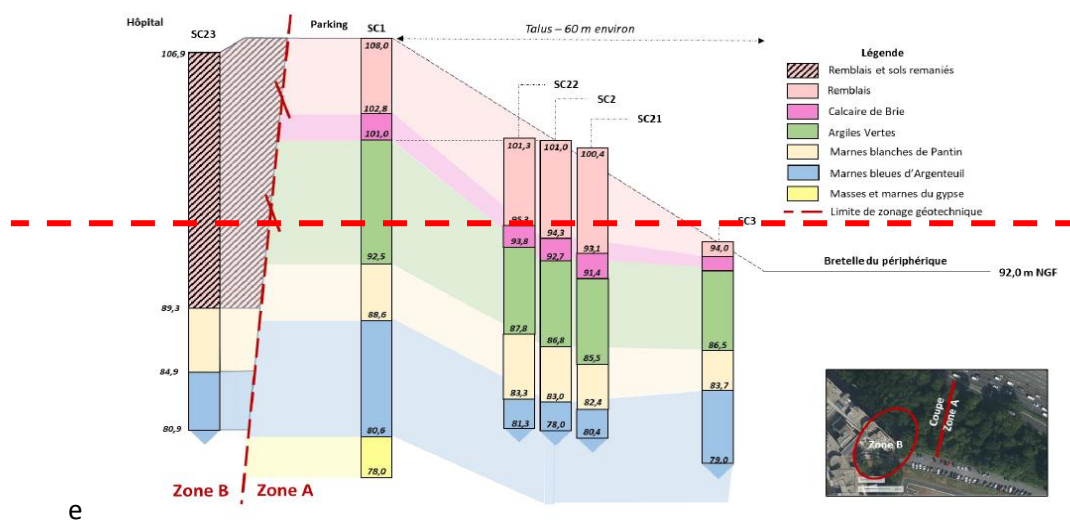


Tableau 5 : Coupe géologique interprétative (G2 AVP).

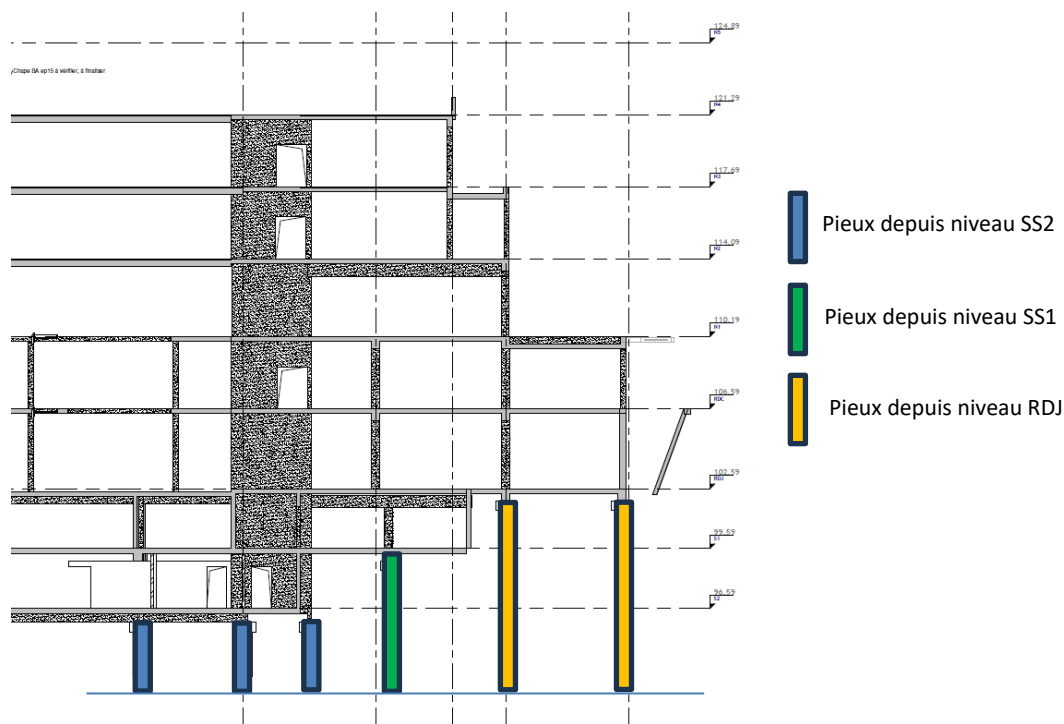
Il est à noter qu'il est préférable que les pieux équipés en géothermie soient les plus profonds possibles, ce qui pour un linéaire de captage global permettrait de diminuer le nombre de pieux à équiper.

Au stade de la faisabilité on retiendra une longueur moyenne des pieux de 15 m. Les caractéristiques détaillées des pieux de fondation devront être précisées lors des phases ultérieures du projet.

4.4.3 Mise en place de pieux géothermiques

Suivant les études structures, les pieux seront implantés sur 3 niveaux différents ::

- Sous-sol 2 ;
- Sous-sol 1
- RDJ:



Les différentes dalles reposeront sur des longrines. Il sera nécessaire de prévoir des réservations dans celles-ci afin de faciliter le raccordement des liaisons hydrauliques des têtes de pieux vers les nourrices de géothermie située dans le local technique PAC.

L'ensemble des cheminements pourront donc être réalisés sous dalle.

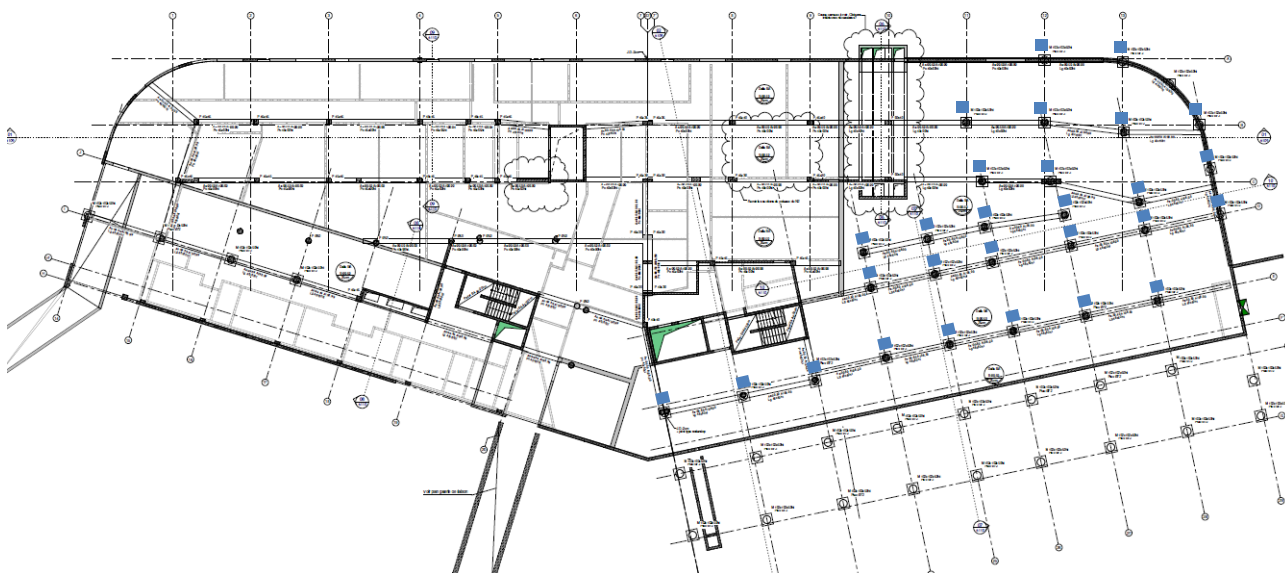
En fonction du nombre de pieux équipés et du raccordement inter-pieux retenu (nombre de pieux raccordés en série), plusieurs nourrices de géothermie devront être mises en place. Une nourrice de géothermie peut raccorder au maximum 10 à 12 réseaux (afin de minimiser les pertes de charge hydraulique) ce qui peut correspondre à environ 25 à 30 pieux raccordés (le nombre de pieux raccordés en série sur un réseau est compris entre 2 et 3 en fonction de la distance par rapport à la nourrice).

Les études détaillées permettront de préciser le nombre de pieux, les principes de cheminement sous-dalle ainsi que le nombre et les positions des nourrices de géothermie.

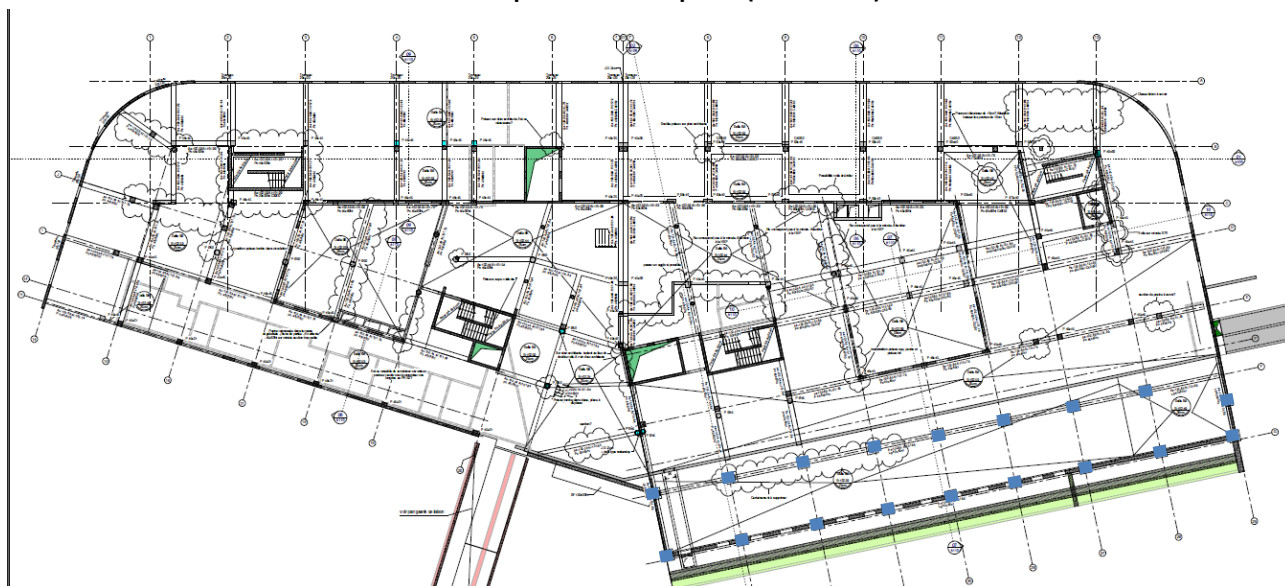
La figure ci-après représente le plan prévisionnel d'implantation des pieux de fondation avec leur disposition.



Plan d'implantation des pieux (niveau SS2).



Plan d'implantation des pieux (niveau SS1).



Plan d'implantation des pieux (niveau RDJ).

Le nombre de pieux relevé est supérieur à 100 ce qui représente un potentiel énergétique important. Cependant tous les pieux ne présentent pas forcément un intérêt pour le captage énergétique. On exclura notamment :

- Les pieux fortement chargés ;
- Les pieux trop proches les uns des autres (pieux doubles notamment) ;
- Les pieux trop éloignés du point de collecte intermédiaire.

En fonction de l'avancée des études et du scénario retenu, il sera pertinent, de prévoir un équipement des pieux géothermiques à proximité immédiate des locaux techniques CVC (position à définir).

On trouvera ci-dessous le tableau récapitulatif du nombre de pieux par niveaux avec la distinction entre pieu équipable » et « non équipable ».

	Nombre de pieu	Pieu non équipable	Pieu équipable
Niveaux SS2	69	11	58
Niveau SS1	28	0	28
Niveau RDJ	18	0	18
Total	115	11	104

On dénombre 115 pieux de fondations réparties sur les 3 niveaux de fondations du bâtiment. Du fait des conditions d'exclusion définies précédemment, 11 pieux sont à exclure, soit un total de 104 pieux équipables.

On notera que le niveau SS2 présente le nombre de pieux équipables (58) le plus important. Ce niveau devrait être privilégié pour l'équipement géothermique.

4.4.4 Hypothèses de dimensionnement

L'objectif des dimensionnements est de déterminer le linéaire de captage nécessaire pour pérenniser le système dans le temps en fonction du scénario et de la variante étudiée.

Les hypothèses de dimensionnement du système sont récapitulées dans le tableau suivant.

Paramètre		Valeur
Sous-sol	Température initiale	11,6°C
	Conductivité thermique	1,84 W/ (m.K)
	Capacité thermique du terrain	2,4 MJ/ (m ³ .K)
	Gradient de température	0,03 K/m
Pompe à chaleur ¹	Type	Weishaupt WWP S 50 ID
	Puissance nominale	47,8
	COP / EER	3,70
	Régime de température	0/-3°C et 40/45°C
	Delta T entrée/sortie captage	A définir en fonction du nombre de pieux
	Delta T entrée/sortie production	5,0°K
	Diamètre des pieux	820 mm
	Espace inter pieux	≈ 4,5 m
	Débit total par PAC	A définir en fonction du nombre de réseau
	Type de fluide	Mélange eau / mono propylène glycol 10%
	Configuration	Double U 25x 3,0 mm
	Résistance thermique sonde (Rb)	0,114 K/ (W/m)
	Résistance thermique interne (Ra)	0,241 K/ (W/m)
	Raccordement des pieux	Par groupe de 2-3
	Période de simulation	25 ans

Tableau 6 : Hypothèses pour les dimensionnements sur pieux.

Les simulations sont paramétrées en tenant compte des températures min/max de +0°C / +30°C en pointe en sortie du primaire de la pompe à chaleur, c'est-à-dire en entrée des pieux.

Il conviendra de s'assurer que le système de production retenu dans le cadre des études ultérieures est compatible avec ces régimes de température et d'adapter les systèmes de régulation de la production pour respecter ces valeurs.

¹ Les hypothèses présentées ci-dessus pour la PAC sont issues de données constructeurs. La puissance nominale de la PAC est valable dans les conditions nominales de fonctionnement. Selon les conditions de fonctionnement, des variations de performances peuvent être constatées.

4.5 Résultat du dimensionnement

4.5.1 Principaux résultats

Plusieurs simulations réalisées de manière itérative ont permis de valider que **750 ml de captage (50 pieux d'une profondeur moyenne de 15 ml)** étaient nécessaires afin de garantir les performances du système sur la durée.

Les principaux résultats des dimensionnements sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres		Année 25	Moyenne sur 25 ans
Chauffage	Puissance maximale extraite (W/ml)	52,6	52,6
	Puissance maximale extraite (kW)	39,4	/
	Puissance maximale - chauffage (kW)	48,7	/
	Energie annuelle extraite (kWh/ml/an)	39,7	39,7
	Energie produite (MWh)	35,7	35,7
	Energie compresseur (MWh)	5,90	5,86
	Energie extraite terrain (MWh)	29,8	29,8
	COP (global production de chaud))	6,05	6,09
	Température minimale du fluide (°C)	1,6	/
	Taux de couverture puissance (%)	100%	/
	Taux de couverture Energie (%)	100%	100%
	Tep EnR	2,56	2,56
Rafraîchissement	Puissance maximale injectée (W/ml)	24.0	24.0
	Puissance maximale injectée (kW)	18.0	/
	Puissance maximale - rafraîchissement (kW)	18.0	/
	Energie annuelle injectée (kWh/ml/an)	9.2	9.2
	Energie produite (MWh)	6.9	6.9
	Energie injectée terrain (MWh)	6.9	6.9
	Energie produite par froid actif (MWh)	0.0	0.0
	Energie produite par géocooling (MWh)	6.9	6.9
	Energie produite par TFP	0,0	0,0
	Energie compresseur (MWh)	/	/
	EER (froid actif)	/	/
	EER (global production de froid)	/	/
	Température maximale du fluide (°C)	18.7	/
	Taux de couverture puissance (%)	100%	/
	Taux de couverture Energie (%)	100%	100%
	Débit unitaire par forage	0,44	
	Débit total géothermie (m ³ /h)	11,0	

Tableau 7 : Résultats du dimensionnement.

Analyse des résultats :

- Le système géothermique est en mesure de couvrir la l'intégralité des consommations énergétiques de chauffage et de rafraîchissement du projet ;
- Le système est fortement déséquilibré du point de vue thermique. En effet l'énergie injectée représente seulement 23% de l'énergie extraite ce qui implique un refroidissement progressif du sol au cours du temps ;

- On notera que c'est la puissance qui est dimensionnante dans ce scénario. En effet les ratios de puissance extraite / injectée sont supérieurs aux ratios usuels (40W/ml). En revanche les ratios concernant l'énergie extraite sont « normaux » par rapports aux ratios usuels (35-60 kWh/ml/an) ;
- Le COP moyen sur 25 ans est de 6,05 ce qui correspond à la production d'environ 2,6 Tep/an ;
- Le débit présenté ci-dessus est le débit minimal à faire circuler dans les pieux afin de garantir un écoulement de type turbulent (favorisant l'échange thermique).

4.5.1.1 Évolution du système

Le premier graphique représente l'évolution des températures moyennes minimales et maximales pour les demandes de base et les demandes de pointe de chauffage et de rafraîchissement :

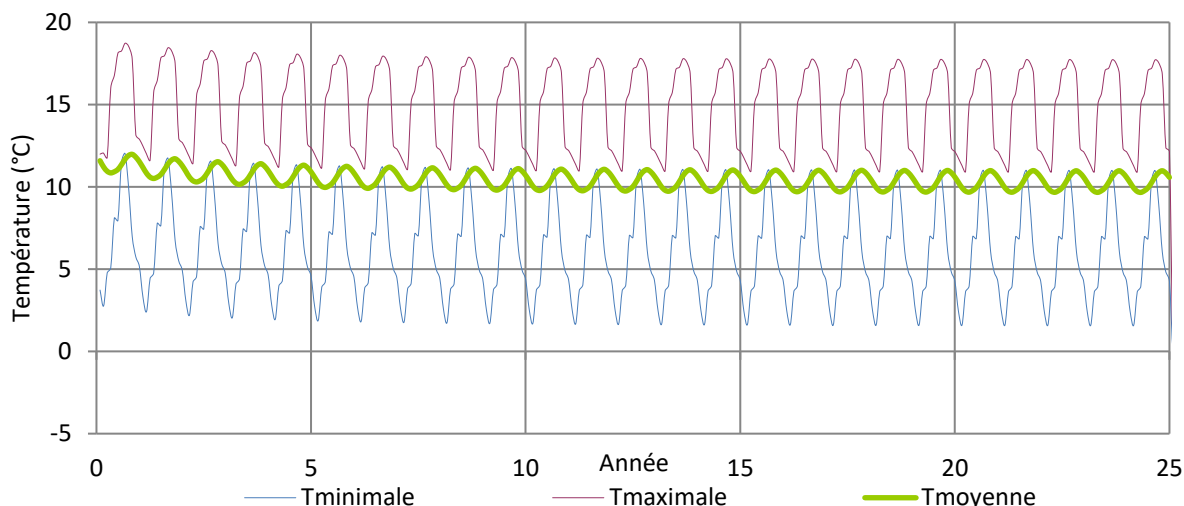


Figure 14 : Evolution des températures mini/maxi dans les réseaux.

On remarque que la température du terrain est stable au cours du temps, on notera toutefois un léger refroidissement. La température minimale atteinte dans les pieux géothermiques est de +1,6°C lors de la dernière année de simulation. La température maximale est de 18,7°C en pointe dès la première année de simulation (système en fonctionnement). **Le système géothermique est donc pérenne dans le temps.**

Le deuxième graphique représente l'évolution de la température moyenne du fluide pour la dernière année de simulation à l'entrée / sortie des pieux :

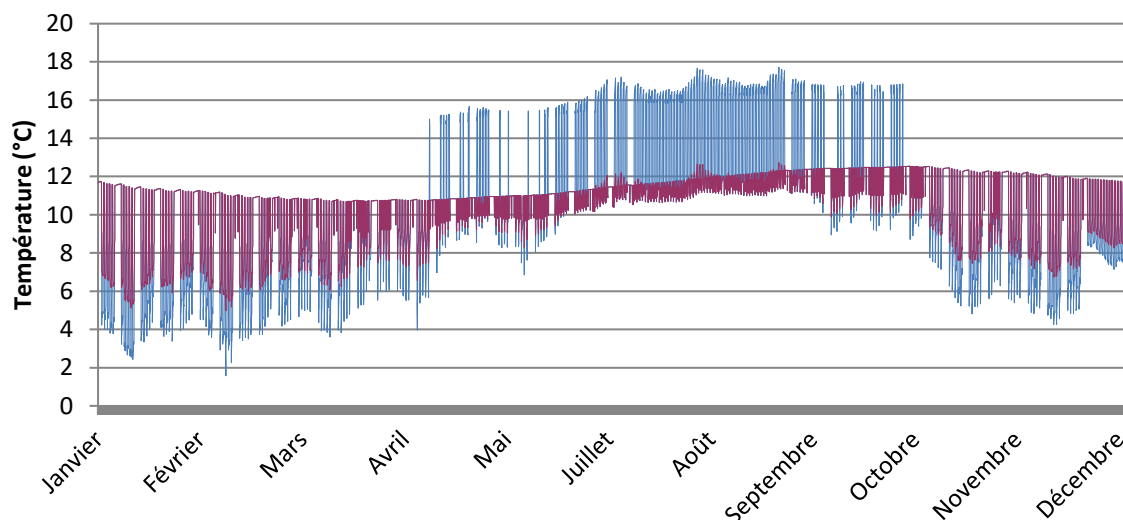


Figure 15 : Evolution des températures aller/retour dans le système sur la 25ème année.

Dans la configuration retenue, la température dans les pieux n'est jamais inférieure à 0°C. Le fonctionnement de l'installation est donc pérenne.

Les graphiques ci-dessous présentent l'évolution du COP / EER mensuel Brut de l'installation sur 25 ans :

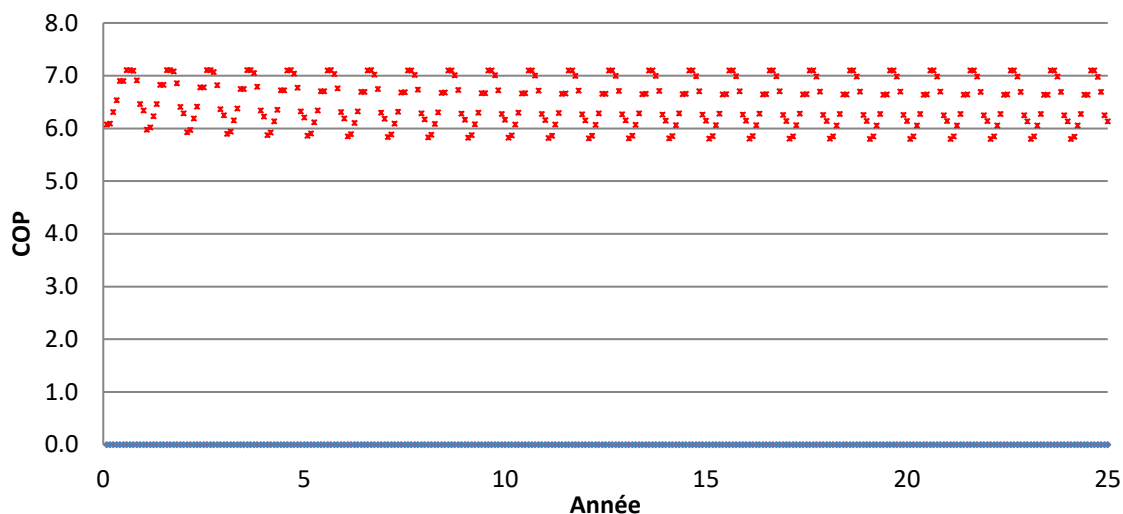


Figure 16 : Evolution du COP mensuel brut en fonction du temps.

On peut observer que les performances de l'installation varient faiblement d'un mois à l'autre (température de production de la PAC variable). On constate au fur et à mesure des années une stabilité des performances.

4.5.2 Couverture des consommations énergétiques de chauffage « sortie chaufferie »

Les graphiques ci-dessous présentent la couverture des consommations énergétiques de chauffage « sortie chaufferie » par le système géothermique

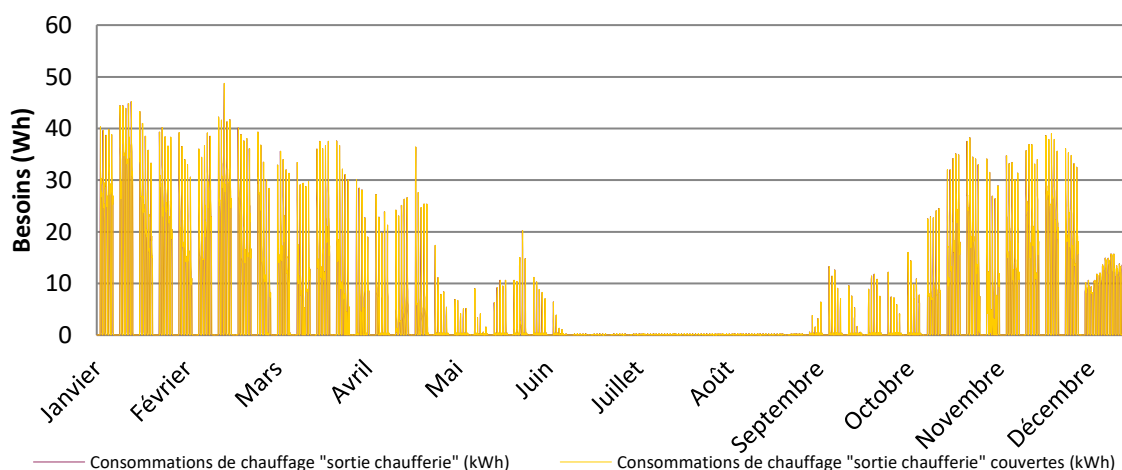


Figure 17 : Couverture des consommations « sortie chaufferie » de chauffage par le système - année 25.

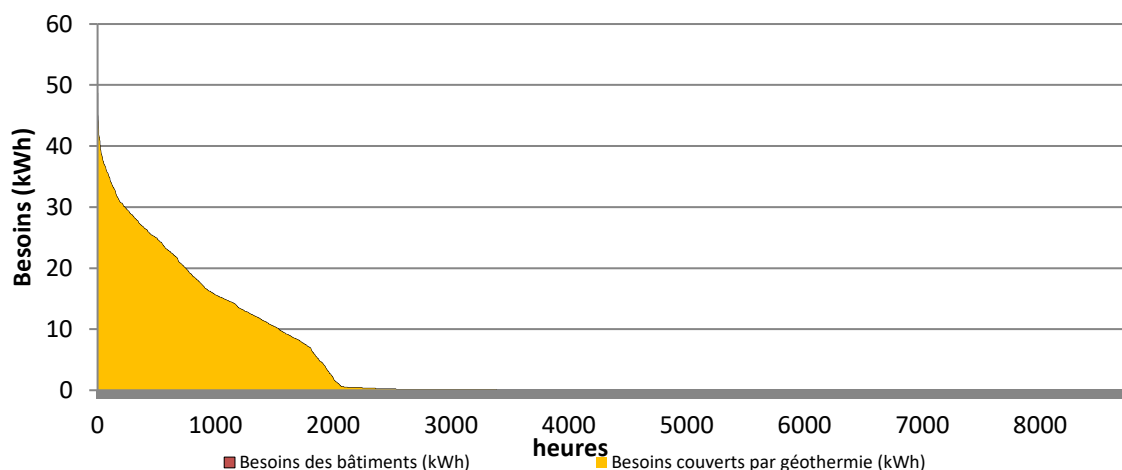


Figure 18 : Courbe de charge monotone des consommations « sortie chaufferie » de chauffage couvertes par le système - année 25.

4.5.2.1 Couverture des consommations énergétiques rafraîchissement « sortie chaufferie »

Les graphiques ci-dessous présentent la couverture des consommations énergétiques de rafraîchissement « sortie chaufferie » par le système géothermique au cours du temps.

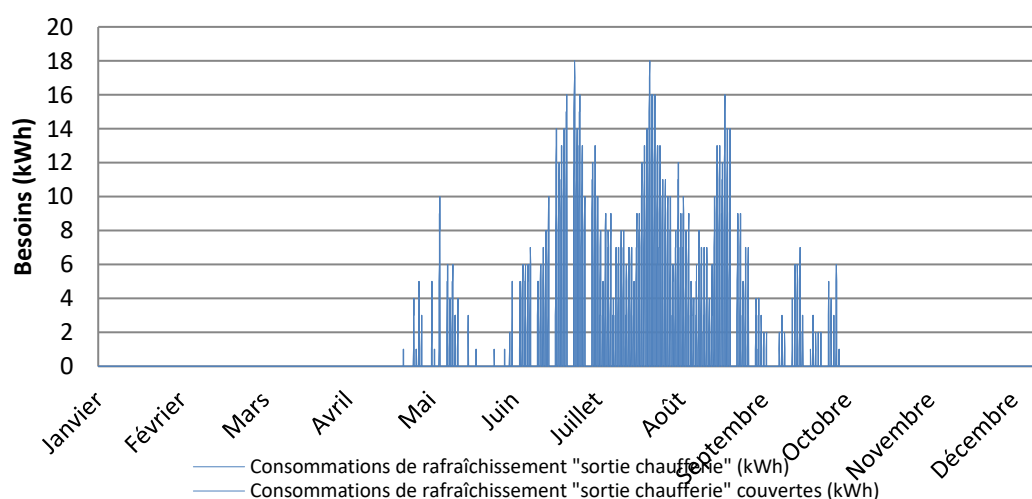


Figure 19 : Couverture des consommations « sortie chaufferie » de chauffage par le système - année 25.

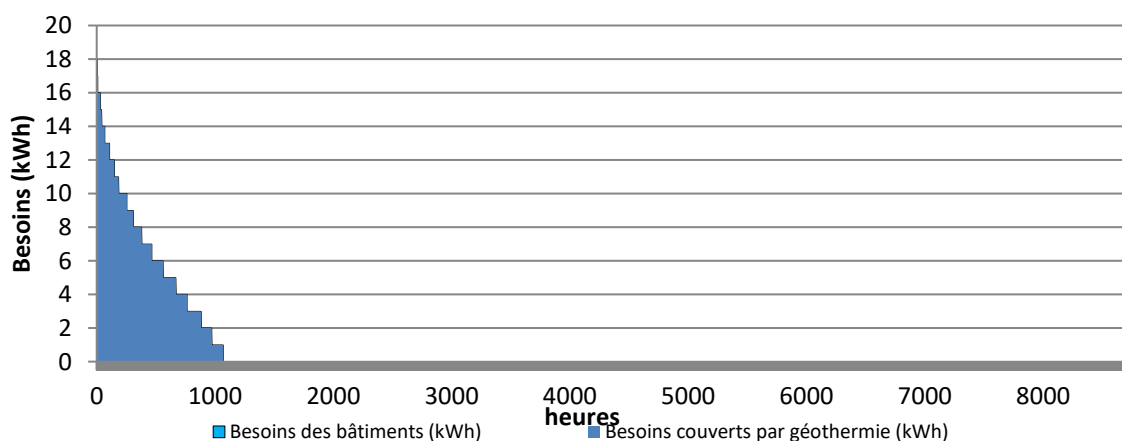


Figure 20 : Courbe de charge monotone des consommations « sortie chaufferie » de chauffage couvertes par le système - année 25.