CEN/TC 451

Date: 2020-05

prEN 17522:2020

CEN/TC 451

Secrétariat: AFNOR

Conception et construction des échangeurs géothermiques

Design and construction of borehole heat exchangers

Planung und Bau von Erdwärmesonden

ICS :

Descripteurs :

Type de document : Norme européenne
Sous-type de document :
Stade du document : Enquête CEN
Langue du document : F

STD Version 2.9a

Sommaire

Page

Avant-propos européen **5**

1 Domaine d'application **6**

2 Références normatives **6**

3 Termes et définitions **7**

4 Aspects géologiques et environnementaux **8**
4.1 Généralités **8**
4.2 Risques géologiques et hydrogéologiques **8**
4.2.1 Aquifères artésiens **8**
4.2.2 Aquifères empilés ayant différents potentiels des eaux souterraines **9**
4.2.3 Chimie des eaux souterraines et du sol **9**
4.2.4 Apparition de gaz **9**
4.2.5 Stabilité du sol **9**
4.2.6 Minéraux ou sols à comportement dilatant et contractant **10**
4.2.7 Séquence géologique contrastante (stratification alternée) **10**
4.2.8 Géologie karstique **10**
4.2.9 Gélévité **11**
4.2.10 Zone de protection des eaux souterraines **11**
4.3 Risques anthropiques **11**
4.4 Aspects environnementaux **12**
4.4.1 Généralités **12**
4.4.2 Influence sur les eaux souterraines **12**
4.4.3 Impact des travaux de construction sur l'environnement **12**

5 Description du système **13**
5.1 Généralités **13**
5.2 Échangeur géothermique **14**
5.3 Tube horizontal **15**
5.4 Collecteurs **16**
5.5 Installation thermique **16**

6 Matériaux **16**
6.1 Généralités **16**
6.2 Propriétés générales **16**
6.2.1 Généralités **16**
6.2.2 Matières plastiques **17**
6.2.3 Méthodes de raccordement **19**
6.2.4 Matériaux métalliques **19**
6.2.5 Fluide caloporteur **20**
6.2.6 Matériau de comblement **20**
6.3 Critères de sélection des composants **22**
6.3.1 Généralités **22**
6.3.2 Boucles de BHE **22**
6.3.3 Tubes horizontaux **22**
6.3.4 Collecteurs **23**
6.3.5 Fluide caloporteur **23**

7 Conception 23
7.1 Étapes de conception 23
7.2 Dimensionnement 24
7.2.1 Généralités 24
7.2.2 Méthode générale 26
7.2.3 Propriétés thermiques du sol 28
7.2.4 Test de réponse thermique (TRT) 29
7.2.5 Mode opératoire de calcul 36
7.2.6 Simulation 38
7.2.7 Conception hydraulique 39

8 Construction 40
8.1 Généralités 40
8.2 Préparation et planification du site 40
8.3 Forage 40
8.3.1 Généralités 40
8.3.2 Diamètre du puits de forage 41
8.3.3 Fluide de forage 41
8.3.4 Surveillance et documentation du processus de forage 41
8.3.5 Comblement 42
8.4 Boucle d'échangeur géothermique 42
8.5 Installation de la boucle d'échangeur géothermique 42
8.6 Comblement et injection de coulis 43
8.6.1 Généralités 43
8.6.2 Injection de coulis 43
8.6.3 Autre opération de comblement 44
8.7 Tube horizontal 44
8.8 Essais du BHE - Contrôle d'étanchéité, contrôle d'écoulement, contrôle du coulis, mesurages géophysiques 45
8.9 Collecteurs 46

9 Mise en marche 46
9.1 Généralités 46
9.2 Fluide caloporteur 47
9.3 Remplissage du système 47
9.4 Séchage des nouvelles constructions 47
9.5 Mise en service 48
9.6 Documentation 48

10 Exploitation, surveillance et maintenance 48
10.1 Exploitation 48
10.2 Surveillance 48
10.2.1 Généralités 48
10.2.2 Température 49
10.2.3 Pression 49
10.2.4 Débit 49
10.3 Maintenance 49

11 Réhabilitation 50

12 Déclassement 50
12.1 Généralités 50
12.2 Fluide caloporteur 51
12.3 Échangeurs géothermiques 51
12.3.1 Puits de forage comblés 51
12.3.2 Puits de forage remplis d'eau 51

12.4 Tubes horizontaux 51
12.5 Documentation 51
Annexe A (informative) Isolation du tube horizontal 53
Annexe B (informative) Exemple de durée de simulation 54
Annexe C (informative) Liste de contrôle pour la mise en service 57
Annexe D (informative) Exemples de conductivité thermique et de capacité thermique volumétrique du sous-sol 59
Bibliographie 61

Avant-propos européen

Le présent document (prEN 17522:2020) a été élaboré par le Comité Technique CEN/TC 451 « Forages d'eau et de géothermie », dont le secrétariat est tenu par AFNOR.

Ce document est actuellement soumis à l'Enquête CEN.

1 Domaine d'application

Le présent document concerne la normalisation des aspects géologiques et environnementaux de la conception, du forage, de la construction, de l'exécution, du fonctionnement, de la surveillance, de la maintenance, de la réhabilitation et du déclassement des échangeurs géothermiques utilisables en géothermie.

Les techniques de détente directe et de thermo-siphon sont exclues du présent document.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

EN 12201-1:2011, *Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression — Polyéthylène (PE) — Partie 1 : Généralités*

EN 12201-2:2011, *Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression — Polyéthylène (PE) — Partie 2 : Tubes*

EN 12201-3:2011, *Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression — Polyéthylène (PE) — Partie 3 : Raccords*

EN 12201-5:2011, *Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau et pour les branchements et les collecteurs d'assainissement avec pression — Polyéthylène (PE) — Partie 5 : Aptitude à l'emploi du système*

EN ISO 15875-1:2003, *Systèmes de canalisations en plastique pour les installations d'eau chaude et froide — Polyéthylène réticulé (PE-X) — Partie 1 : Généralités (ISO 15875-1:2003)*

EN ISO 15494, *Systèmes de canalisations en matières plastiques pour les applications industrielles — Polybutène (PB), polyéthylène (PE), polyéthylène de meilleure résistance à la température (PE-RT), polyéthylène réticulé (PEX), polypropylène (PP) — Séries métriques pour les spécifications pour les composants et le système (ISO 15494:2015)*

EN ISO 22391-1, *Systèmes de canalisations en plastique pour les installations d'eau chaude et froide — Polyéthylène de meilleure résistance à la température (PE-RT) — Partie 1 : Généralités (ISO 22391-1:2009)*

EN 1057, *Cuivre et alliages de cuivre — Tubes ronds sans soudure en cuivre pour l'eau et le gaz dans les applications sanitaires et de chauffage*

EN 12449, *Cuivre et alliages de cuivre — Tubes ronds sans soudure pour usages généraux*

EN 1965-2, *Adhésifs structuraux — Corrosion — Partie 2 : Détermination et classification de la corrosion d'un substrat en laiton*

EN 12168, *Cuivre et alliages de cuivre — Barres creuses pour décolletage*

EN ISO 1127, *Tubes en acier inoxydable — Dimensions, tolérances et masses linéiques conventionnelles (ISO 1127:1992)*

EN 10216-5, *Tubes sans soudure pour service sous pression — Conditions techniques de livraison — Partie 5 : Tubes en aciers inoxydables*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes :

— IEC Electropedia : disponible à l'adresse http://www.electropedia.org/

— ISO Online browsing platform : disponible à l'adresse http://www.iso.org/obp

3.1
aquifère
milieu souterrain qui contient de l'eau en partie mobilisable par gravité. Ce milieu, constitué de roches perméables et/ou fissurées ou fracturées est suffisamment conducteur d'eau souterraine, pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables

Note 1 à l'article Un aquifère peut être totalement ou partiellement saturé.

Note 2 à l'article Sa limite supérieure est appelée « toit de l'aquifère » et sa base est appelée « mur de l'aquifère ».

3.2
aquitard
formation rocheuse ou strate de sédiment qui retarde, sans l'empêcher, l'écoulement d'eau souterraine d'un aquifère à un autre

3.3
échangeur géothermique
BHE
comprend le puits de forage avec une boucle, pour faire circuler un fluide caloporteur, et le comblement d'un puits de forage

3.4
boucle de BHE
partie du système de tubes dans le puits de forage, qui contient le fluide caloporteur

3.5
fluide caloporteur
HTF
fluide mis en circulation à travers le BHE pour transférer la chaleur

3.6
système BHE
un ou plusieurs BHE raccordés à un système de circulation hydraulique

Note 1 à l'article Il n'inclut pas la pompe à chaleur ou la pompe de circulation

3.7
système de pompe à chaleur géothermique
GSHP
système BHE comprenant le tube horizontal, les collecteurs, la pompe à chaleur et la pompe de circulation

3.8
champ de BHE
zone dans laquelle plusieurs systèmes BHE ne sont pas raccordés dans le même système de circulation hydraulique

3.9
matériau de comblement
matériau utilisé pour combler un puits de forage ou une tranchée

3.10
coulis
matériau de comblement constitué d'un mélange de ciment et d'eau et d'autres composants supplémentaires (minéraux argileux, etc.)

3.11
fluide
gaz, vapeur, liquide ou combinaisons de ceux-ci

4 Aspects géologiques et environnementaux

4.1 Généralités

La conception doit veiller à ce que l'emplacement de l'installation planifiée se situe dans des zones définies dans les documents de planification spatiale. Il peut s'agir de zones dédiées à la protection spéciale des ressources naturelles (protection de l'eau, protection de la nature) ou de zones présentant des risques spécifiques (zones menacées, glissements de terrain, sites contaminés, etc.).

Si l'installation doit se situer dans de telles zones, il faut vérifier que la conception est conforme aux conditions géologiques spécifiques.

Il faut déterminer si les conditions hydrogéologiques (aquifères artésiens, nappe phréatique peu profonde, nappe perchée, etc.) nécessitent des mesures spéciales voire une évaluation des impacts ou des risques.

Le concepteur doit évaluer si les informations géologiques et hydrogéologiques disponibles sont suffisantes pour le projet en question.

4.2 Risques géologiques et hydrogéologiques

4.2.1 Aquifères artésiens

Lorsque le forage perfore un aquifère artésien, le niveau des eaux souterraines dépasse l'orifice du puits de forage. Une remontrée d'eau incontrôlée et une perte de pression peuvent résulter de l'utilisation de techniques de forage inappropriées ou du choix d'un matériel inadapté. Dans certains cas, la remontée d'eau (dans les aquifères moins profonds) peut ne pas être directement évidente. Ceci constitue les principaux risques dus à la perforation de l'aquifère artésien.

Le forage dans l'aquifère artésien est un risque. Des mesures spéciales concernant les méthodes de forage et la construction du BHE doivent être mises en œuvre.

4.2.2 Aquifères empilés ayant différents potentiels des eaux souterraines

Le forage dans les couches de scellement entre les aquifères peut provoquer la fuite d'un aquifère à un autre et avoir un effet sur les caractéristiques chimiques des eaux souterraines ou sur les conditions hydrauliques. Ceci peut également entraîner une réduction ou une augmentation indésirable du niveau des eaux souterraines dans un ou plusieurs aquifères. Les conséquences peuvent être une baisse de la productivité des sources d'eau ou une dégradation des conditions de formation.

Les conditions et les qualités d'écoulement de l'eau souterraine peuvent également être affectées de manière négative lorsque le forage perfore deux nappes d'eau souterraine ou plus. Dans ce cas, le risque d'échange d'eau incontrôlé entre les aquifères par le biais du puits de forage doit être pris en compte. Il convient d'éviter tout court-circuit hydraulique pour des raisons de protection des eaux souterraines, notamment lorsqu'une des nappes perforées contient des eaux souterraines hautement minéralisées ou contaminées.

Si le forage traverse plusieurs aquifères, les aquitards au moins doivent être scellés.

4.2.3 Chimie des eaux souterraines et du sol

La composition chimique des eaux souterraines (forte concentration en sulfate, salinité élevée, etc.) peut affecter de manière négative les propriétés de scellement et la stabilité du comblement.

Le forage ou l'excavation à proximité de sources d'eau minérale ou de puits peut affecter de manière négative la composition minéralogique des eaux souterraines.

4.2.4 Apparition de gaz

Dans certaines conditions géologiques, du gaz d'origine géogénique peut s'accumuler dans les cavités et les fosses du sous-sol. En cas de forage dans ces zones, le gaz peut fuir de manière incontrôlée par le puits de forage et poser un risque pour la sécurité (gaz toxiques ou explosifs) ou pour l'environnement (gaz à effet de serre). Des gisements de gaz peuvent apparaître dans les zones présentant une activité volcanique ou au-dessus de couches géologiques contenant du charbon, de la tourbe, des hydrocarbures, des sulfures, etc. Si le risque de forage du gaz sur le site étudié est connu ou peut être prédit à partir d'études géologiques, certaines mesures de sécurité (par exemple, concept de protection contre les explosions, matériau de comblement spécial) sont requises ou la profondeur de forage doit être limitée ou le forage doit être interrompu.

4.2.5 Stabilité du sol

Un sol instable peut être observé, notamment dans les situations géologiques suivantes :

— zones hautement fissurées, faillées et bréchiques, provoquant la formation de cavités naturelles ou anthropiques ;

— roches fragiles tendres représentant un sol instable (par exemple, roches volcaniques ou sédimentaires).

4.2.6 Minéraux ou sols à comportement dilatant et contractant

La présence de produits d'évaporation ou d'argiles à comportement dilatant pose un risque de subsidence ou de dilatation en cas de raccordement d'aquifères peu profonds ou profonds avec des couches évaporitiques ou argileuses en raison d'opérations souterraines inappropriées ou difficiles à mettre en œuvre.

4.2.7 Séquence géologique contrastante (stratification alternée)

La géologie est très variée, allant des structures représentées par le sable, l'argile et le gravier non consolidés aux situations très complexes telles que les roches sédimentaires consolidées ou non (grès, calcaire - fissuré et souvent karstifié) ou cristallines (métamorphiques et magmatiques). Pour mener à bien un projet de forage BHE, il est essentiel de connaître les conditions géologiques et les propriétés hydrodynamiques associées du site sélectionné. Une analyse préalable adéquate des conditions du site augmente les chances d'obtenir un produit efficace et durable ; ceci contribue également à la gestion et à la protection des ressources souterraines (quantité et qualité) à exploiter lors des futurs projets (par exemple, puits ayant différentes fonctions et configurations).

La description lithologique de la séquence géologique forée et la caractérisation structurale du site sont toutes deux obligatoires pour fournir suffisamment d'informations en vue de l'élaboration d'un projet BHE et de la fourniture de foreuses et d'équipements auxiliaires adéquats pour des travaux de construction efficaces. Elles permettent également de réduire au minimum et/ou de contrôler les risques géologiques potentiels pendant le forage.

Selon la complexité du projet et des conditions géologiques, il convient que la série de thèmes à décrire concerne les aspects suivants (le cas échéant) :

— survenue et description de la/des structure(s) géologique(s) régionale(s) - bassin sédimentaire, plis et/ou failles ;

— description lithologique (spécifique) (de bas en haut ou inversement) des unités litho-stratigraphiques (formations, lits, couches ou horizons) à forer ;

— survenue et caractérisation des discontinuités tectoniques (structurales) locales - failles, fissures, fractures (en particulier en cas de roches dures) ;

— survenue et caractérisation des vides et canaux de dissolution (en cas de roches carbonatées et évaporitiques) ;

— aspects hydrologiques (chimie des eaux souterraines, potentiel redox, niveau de salinité, niveau de la nappe phréatique, écoulement souterrain régional pour chaque aquifère, conductivité hydraulique, porosité/paramètres thermiques) ;

— inventaire d'autres utilisateurs à proximité (puits d'extraction des eaux souterraines, puits d'énergie des eaux souterraines, échangeurs géothermiques).

4.2.8 Géologie karstique

Les zones karstifiées peuvent causer une forte hétérogénéité du sol et un risque de cavernes. Une haute probabilité de survenue de cavernes entraîne plusieurs risques : effondrement du puits de forage, subsidence du sol, pertes des fluides de forage, problèmes de comblement, turbidité et matières solides dans les eaux souterraines, température instable des eaux souterraines (trop basse en hiver, trop élevée en été), modélisation non fiable et difficilement prévisible.

Les conditions géologiques et hydrogéologiques dans la zone karstique sont souvent insuffisamment connues pour faire des prévisions fiables sans mener d'études supplémentaires.

4.2.9 Gélévité

Étant donné que la température du fluide dans le BHE peut être inférieure à 0 °C, le sol peut geler, provoquant un soulèvement de la partie horizontale et une détérioration des propriétés de scellement du matériau de comblement du puits de forage et des couches de scellement naturelles autour du puits de forage.

Il convient que le coulis de scellement de l'échangeur géothermique soit adapté aux conditions physicochimiques réelles qui se produisent naturellement ou en raison du fonctionnement du système. Il convient qu'il ne soit pas affecté de manière négative par le gel et qu'il résiste à une température négative du fluide caloporteur qui retourne dans les échangeurs de chaleur géothermiques allant jusqu'à −3 °C, ce qui permet de préserver ses propriétés physicochimiques et mécaniques.

4.2.10 Zone de protection des eaux souterraines

Le risque posé par les BHE dans les zones de protection des eaux souterraines est la dégradation de la qualité des eaux souterraines pour plusieurs raisons :

— introduction de polluants depuis la surface ;

— fuites du fluide caloporteur ;

— mélange d'eaux souterraines de qualité différente ;

— changement de composition chimique des eaux souterraines.

Les zones pertinentes pour l'approvisionnement en eau potable peuvent être les zones protégées. Dans ces zones, les installations peuvent nécessiter des autorisations spéciales.

4.3 Risques anthropiques

Les interactions entre l'environnement construit et le sous-sol peuvent impliquer des contraintes de réalisation des échangeurs géothermiques. De plus, les structures souterraines peuvent avoir un effet sur l'écoulement souterrain.

Lors de la planification d'un échangeur géothermique, il convient d'évaluer les risques potentiels et les impacts des sites, notamment la présence de :

— zones présentant un intérêt archéologique ;

— zones de protection naturelle ;

— munitions non explosées ;

— sol contaminé ;

— zones minières.

Il convient d'évaluer les impacts du forage sur le niveau piézométrique des eaux souterraines. La présence d'anomalies thermiques (gradient géothermique, point chaud) doit être évaluée afin d'adapter le dimensionnement du BHE et des matériaux utilisés pour le forage et la construction du BHE.

4.4 Aspects environnementaux

4.4.1 Généralités

Les aspects environnementaux doivent être pris en compte tout au long du processus de construction.

4.4.2 Influence sur les eaux souterraines

Les réglementations et les objectifs de planification régionale doivent être respectés pendant la planification, la construction et le fonctionnement des systèmes de pompe à chaleur géothermique.

Dans le cadre de la loi sur l'eau en vigueur et, dans la mesure requise, du droit minier, il convient d'harmoniser les usages souhaités avec les objectifs de gestion de l'eau en fonction de la situation locale en imposant des conditions d'utilisation.

Il convient de gérer les eaux souterraines de façon à éviter toute modification nuisible de leur quantité et de leur composition chimique. Il s'ensuit donc que :

— il convient de traiter soigneusement les eaux souterraines ;

— il convient de ne pas autoriser l'infiltration de substances dangereuses dans le sol ou dans la zone des eaux souterraines ;

— il est généralement interdit d'avoir recours à l'utilisation thermique du sous-sol dans les zones de protection de l'eau potable, dans les zones de captage des aquifères d'eau potable et dans les zones de protection de sources minérales. Les exceptions doivent être étudiées en fonction des circonstances pertinentes ;

— dans les zones de protection des eaux souterraines ou d'autres zones désignées, l'approvisionnement en eau potable prime sur l'utilisation thermique des nappes d'eau souterraine. Ce principe s'applique également pour les puits domestiques déclarés non concernés par une zone de protection officielle. Les exceptions doivent être étudiées en fonction des réglementations locales ;

— le comblement du puits de forage doit utiliser des matériaux appropriés (conformément aux réglementations locales). Il peut s'agir d'argiles et/ou de coulis de scellement, selon le risque pour l'aquifère. Des matériaux appropriés sont décrits à l'Article 6.

4.4.3 Impact des travaux de construction sur l'environnement

4.4.3.1 Généralités

Les aspects environnementaux doivent être pris en compte tout au long du processus de construction. Il convient de construire et d'exploiter les systèmes applicables à l'utilisation thermique du sous-sol sans effet nuisible sur l'environnement. Les effets délétères doivent être évités. Cette conséquence peut être causée par des matériaux/fluides inappropriés du processus de forage ou par l'impact thermique sur le sol/les eaux souterraines en raison du fonctionnement de l'échangeur thermique.

4.4.3.2 Matériaux

Les matériaux installés dans le sous-sol doivent être classés non dangereux pour les eaux souterraines et l'environnement, et non corrosifs. Il convient que les tubes, les matériaux de comblement, etc. soient appropriés pour une utilisation dans les eaux souterraines.

En cas d'utilisation de tubes en métal dans les échangeurs géothermiques dans des cas exceptionnels, il convient de prêter une attention particulière à l'épaisseur suffisante de la paroi, la qualité du métal et la prévention de la corrosion, et de tenir compte de la composition chimique des eaux souterraines. Il convient de tenir compte des risques de fuite dans l'air, le sol ou les eaux souterraines des systèmes de transfert de chaleur ou des fluides de travail.

Si un mélange eau/antigel est utilisé comme fluide caloporteur, il faut tenir compte du fait que, en cas de fuite, les inhibiteurs de corrosion ou d'autres additifs peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement.

4.4.3.3 Processus de forage

Les sociétés de forage impliquées dans les projets BHE doivent s'assurer qu'un personnel qualifié effectue les activités de forage et que les équipements sont conformes aux normes applicables en matière de santé et de sécurité et qu'ils sont régulièrement entretenus et contrôlés. Ceci peut être garanti par un certificat de maintenance récent. Il convient que les appareils de forage, tiges de forage, accessoires et matériaux ne fassent pas passer de contaminants dans le sous-sol/sol. Il convient de prendre des mesures appropriées pour prévenir la contamination et d'autres phénomènes similaires. La pollution des eaux de surface due au déversement des boues de forage ou des eaux souterraines hautement minéralisées doit être évitée. L'utilisation d'additifs pour boues de forage accompagnés de certificats de décharge est autorisée conformément aux conditions imposées par les autorités. Seuls les additifs pour boues de forage [5] n'entraînant aucune modification chimique/biologique du sous-sol peuvent être utilisés. Les lignes directrices nationales doivent être appliquées. La qualité de l'eau rejetée doit être conforme à la qualité exigée par la société chargée du traitement des eaux usées.

La pollution des prairies naturelles, des routes, des constructions ou d'autres infrastructures par la saleté, les fluides, le déversement d'hydrocarbures ou les bruits et les vibrations inutiles du processus de forage, doit être évitée.

5 Description du système

5.1 Généralités

Le système BHE peut être divisé en quatre sous-systèmes (Figure 1) :

1) échangeur géothermique ;

2) tube horizontal ;

3) collecteur ;

4) installation thermique (local technique) avec montage d'une pompe à chaleur.

NOTE Le système de chauffage domestique, pompe à chaleur comprise, n'est pas décrit dans le texte.

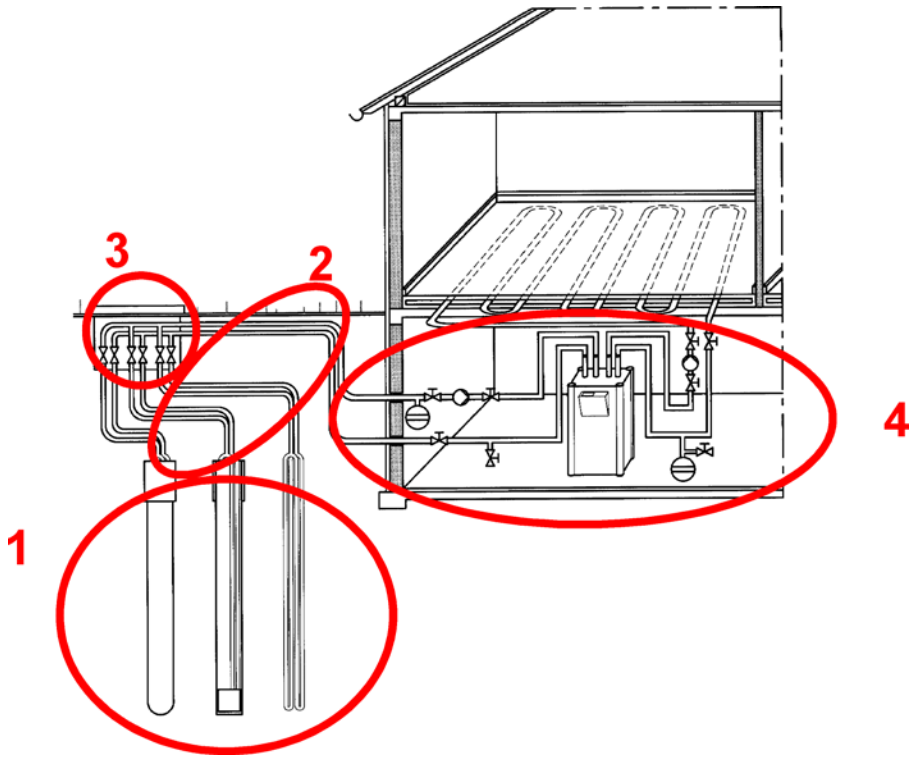


Figure 1 — Exemple de GSHP avec BHE

Le BHE représente la source de chaleur (mode chauffage) ou le dissipateur thermique (mode refroidissement) du système. Le BHE existe en plusieurs versions (voir Figure 2) ayant chacune des propriétés différentes.

5.2 Échangeur géothermique

Il existe plusieurs possibilités de configurer les boucles du BHE. Les trois principaux types de BHE sont :

— simple boucle en U (Figure 2a) ;

— double boucle en U ou boucle en U multiple (la Figure 2b illustre une double boucle en U) ;

— boucle coaxiale (Figure 2c).

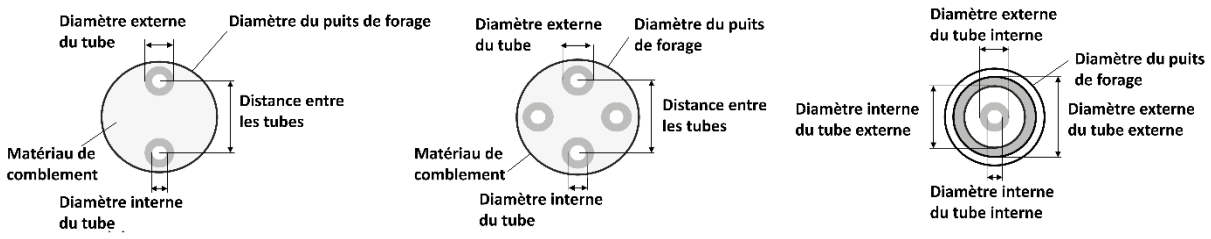


Figure 2 — Principaux types de BHE : simple boucle en U (a), double boucle en U (b), boucle coaxiale (c)

Le BHE est caractérisé par le diamètre moyen et la profondeur moyenne du puits de forage.

Les boucles de BHE sont caractérisées par le matériau de leur tube et par leurs diamètres internes et externes. Pour les échangeurs de chaleur à boucle en U, la distance moyenne entre les centres des tubes est le résultat des géométries des tubes, de leur agencement d'installation et du puits de forage. Cela s'appelle l'espacement des tiges. L'espace entre le tube et la paroi du puits de forage est comblé à l'aide d'un matériau de comblement (6.2).

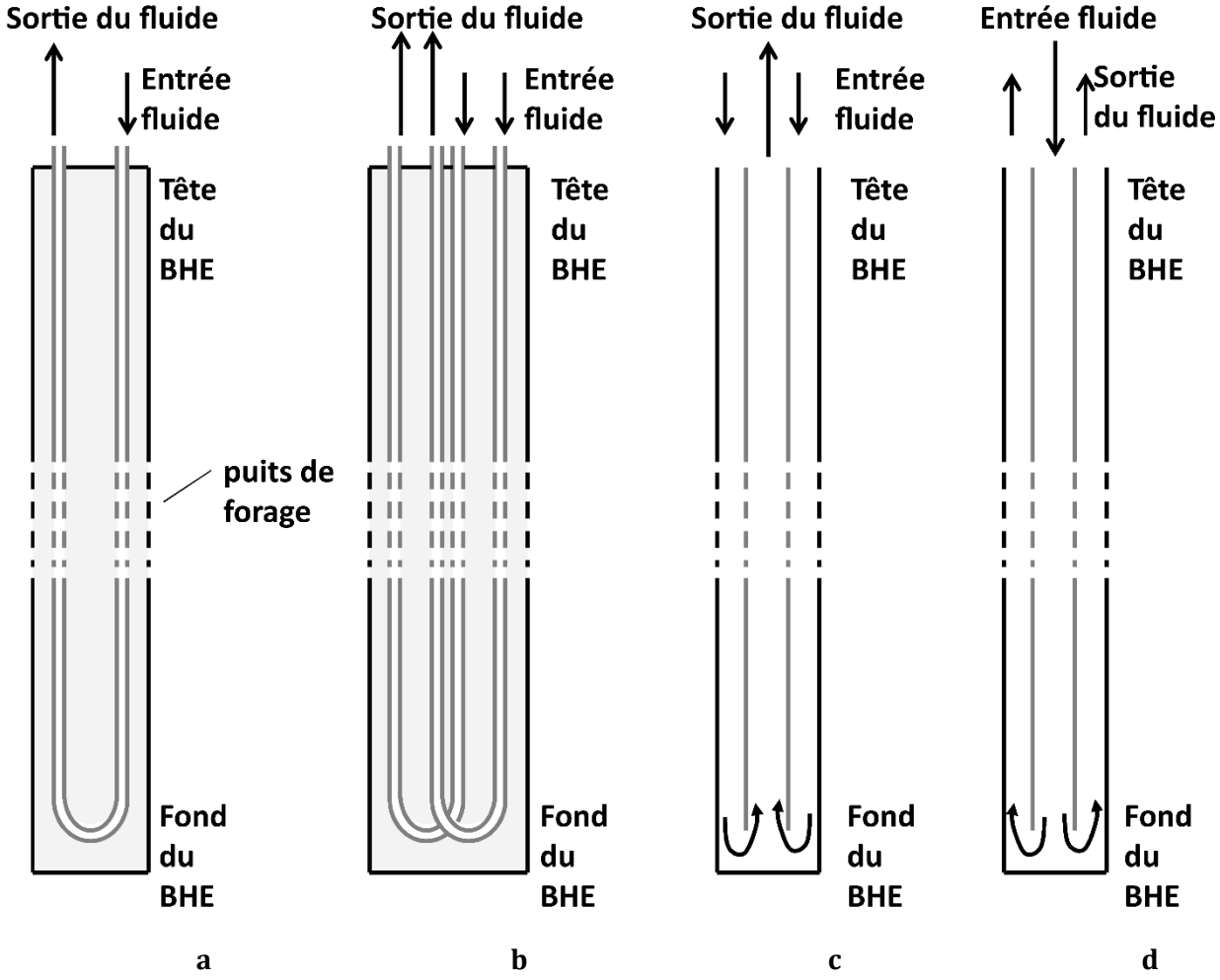


Figure 3 — Principaux types de BHE verticaux : simple tube en U (a), double tube en U (b), coaxial avec arrivée d'eau dans la section annulaire (c), coaxial avec arrivée d'eau dans le tube central (d)

La conception doit être conforme aux aspects environnementaux (voir Article 4) et aux aspects liés à la construction (voir Article 8) du présent document.

La qualité et la durée de vie utile de la boucle de l'échangeur de chaleur dépendent de la classe de pression, de l'épaisseur de la paroi et de la température de fonctionnement. La pression hydraulique interne et/ou externe dans tout le BHE doit être prise en compte pendant toutes les phases de construction et de fonctionnement.

5.3 Tube horizontal

Le tube horizontal est le circuit raccordant les BHE aux collecteurs et à l'installation thermique. L'Annexe A donne des informations sur l'isolation du tube horizontal.

5.4 Collecteurs

Les collecteurs servent à raccorder tous les tubes horizontaux individuels dans un seul et même circuit hydraulique et à assurer et contrôler le débit volumique du fluide dans les BHE individuels.

Il peut comprendre : des robinets d'isolement pour chaque circuit, un régulateur de débit pour chaque circuit, un manomètre et un dispositif de désaération.

5.5 Installation thermique

La conception de l'installation thermique est déterminée par les applications telles que le chauffage, le refroidissement ou la combinaison chauffage/refroidissement. Ceci peut être effectué de manière directe ou indirecte ; la manière indirecte implique l'association d'une pompe à chaleur pour ajuster le niveau de la température.

Pour la conception de la partie de l'installation thermique en lien avec le circuit de l'échangeur géothermique (source/dissipateur), il convient de tenir compte des points suivants :

— pour les systèmes d'échantillonnage ou de chauffage passif, un échangeur de chaleur supplémentaire peut être nécessaire pour séparer le circuit du BHE du circuit de l'utilisateur (système d'émission) ;

— pour les systèmes de refroidissement passif, il convient de tenir compte du potentiel de condensation pour le réglage de la température côté utilisateur (émission) ;

— pour les systèmes avec rejet de la chaleur pendant le refroidissement mécanique, il peut être nécessaire de régler la température de condensation ;

— il peut être nécessaire d'utiliser un système de désaération et de dosage.

6 Matériaux

6.1 Généralités

Un système BHE comprend plusieurs éléments constitués de différents matériaux, qui doivent satisfaire aux exigences spécifiques en matière de durabilité, de pérennité et d'impact environnemental.

6.2 Propriétés générales

6.2.1 Généralités

En raison de la nature d'une installation de forage verticale, par exemple, absence d'accès, risques environnementaux pour le sous-sol et durée de conception longue, il est nécessaire d'avoir un très haut niveau de qualité et de durabilité des matériaux et des connaissances pour construire les boucles de BHE. Il convient que le fabricant et l'installateur des tubes de BHE connaissent cette technologie et les bonnes pratiques actuelles.

Tous les matériaux utilisés dans le sous-sol ne doivent présenter aucune réactivité chimique avec les minéraux et les fluides souterrains. Les matériaux eux-mêmes et leurs produits de décomposition doivent être sans danger pour les eaux souterraines et l'environnement, même après la fin du fonctionnement. Ils doivent résister à la corrosion et avoir une protection contre la corrosion fiable à long terme. Il convient que les tubes, les matériaux de comblement, etc. soient appropriés pour une utilisation dans le sol.

La durée de vie d'une boucle de BHE est influencée par le choix du matériau, la charge de pression (pression interne et externe, classe de pression des tubes) et la gamme de température pendant le fonctionnement. Il convient de choisir les matériaux d'une boucle qui sont présents dans un puits de forage remblayé conformément à une durée de vie de conception prévue du BHE d'au moins 50 ans pour assurer un niveau de qualité.

Pour certains matériaux, il existe des normes donnant la classe et le coefficient de réduction de pression pour différentes températures. Un certificat de matériau délivré par un laboratoire d'essai accrédité peut également être obtenu pour l'application prévue. Pour les températures élevées, les matériaux doivent être choisis en fonction des limitations et des prescriptions du fabricant.

6.2.2 Matières plastiques

Les matériaux polymères sont principalement utilisés dans la boucle de BHE et dans les tubes de raccordement horizontaux mais également pour la protection contre la corrosion des tubes de BHE en métal. Le principal polymère pour les boucles de BHE est le polyéthylène haute densité désigné PE 100. Les caractéristiques de la matière première et les caractéristiques mécaniques des tubes doivent être conformes à l'EN 12201-1 et à l'EN 12201-2. Les raccords et les joints doivent être conformes aux exigences de l'EN 12201-3 et de l'EN 12201-5. Les propriétés dimensionnelles (par exemple, diamètre nominal, ovalité, rugosité interne des sondes, etc. peuvent être différentes de la série EN 12201. Le fabricant doit s'assurer que les boucles et les raccords sont fabriqués avec des matières premières vérifiables provenant d'un producteur de matériaux pour tubes en PE et conformes aux exigences de l'EN 12201-1.

Les autres matériaux utilisables dans la boucle de BHE et dans les tubes de raccordement horizontaux sont (entre autres) : PE 100-RC, PE-RT, PE-X. Le Tableau 1 donne les matériaux utilisés pour les tubes et les raccords soumis à des normes pertinentes.

Tableau 1 — Normes pertinentes pour les tubes et les raccords en polyéthylène

Désignation	Normes pertinentes pour le matériau
PE 100	EN 12201-1:2011, EN 12201-2:2011, EN 12201-3:2011, EN 12201–5:2011
PE 100-RC	EN 12201-1:2011, EN ISO 15875-1:2003
PE-RT (Type I/Type II)	EN ISO 15494, EN ISO 22391-1
PE-X	EN ISO 15494

Les matériaux polymères utilisés pour l'installation souterraine doivent satisfaire aux exigences concernant la résistance à la pression, résistance à la température, durabilité et soudabilité conformément aux normes pertinentes données dans le Tableau 1. Les boucles de BHE fournies doivent être raccordables à l'unité de production, au lot voire même aux propriétés des matières premières.

Pour chaque projet basé sur la profondeur du puits de forage et d'autres paramètres tels que le fluide caloporteur, le matériau de comblement, etc., la classe de pression et la taille de boucle appropriées doivent être sélectionnées. Les tubes et les raccords du BHE doivent être conformes au moins aux mêmes exigences de pression. Le Tableau 2 donne les propriétés mécaniques et dimensionnelles de différentes tailles de boucles en PE 100 pour une installation de tube en U courante.

Tableau 2 — Caractéristiques d'une boucle de tube en U courante en PE 100

Taille nominale du tube (OD mm)	Rapport de dimension standard	Pression maximale de fonctionnement (bar) à 20 °C	Épaisseur de paroi (mm)	Rigidité en anneau (kN/m²)	Conductivité thermique W/(m·K) à 20 °C
32	11/13,6/17	16/12,5/10	3,0/2,4/2,0	83,3/41,7/20,4	0,42
40	11/13,6/17	16/12,5/10	3,7/3,0/2,4	83,3/41,7/20,4	0,42
45	11/13,6/17	16/12,5/10	4,1/3,3/2,6	83,3/41,7/20,4	0,42
50	11/13,6/17	16/12,5/10	4,6/3,7/3,0	83,3/41,7/20,4	0,42

Si la température de conception du fluide caloporteur dépasse 20 °C, les coefficients de réduction de pression doivent être considérés conformes à l'EN 12201-1:2011 (Tableau 3).

Tableau 3 —Coefficients de réduction de pression pour le PE 100 (EN 12201-1:2011)

Température (°C)	Coefficient de réduction de pression
20	1,00
30	0,87
40	0,74

NOTE La pression de fonctionnement admissible (PFA) est calculée d'après l'équation suivante :

$$PFA = fT \times fA \times PN$$

où

fT est le coefficient dans le Tableau 3 ;

fA est le facteur de déclassement (ou facteur de surclassement) lié à l'application (pour le transport d'eau fA = 1) ;

PN est la valeur de la pression nominale.

Il convient que la baisse de pression de tous les composants du système BHE ou GSHP soit fournie par le concepteur.

6.2.3 Méthodes de raccordement

Les matériaux utilisés pour les tubes et les raccords doivent être conformes aux exigences des normes répertoriées dans le Tableau 1, quelle que soit l'application. En raison des différentes propriétés des matériaux, diverses méthodes de raccordement et techniques d'installation peuvent être appliquées conformément au Tableau 4. Les méthodes de raccordement acceptables dans la boucle sont l'assemblage par électrofusion, l'assemblage par fusion bout à bout et l'assemblage par fusion à emboîtement. Les processus de fusion doivent être strictement effectués conformément aux instructions du fabricant et les modes opératoires doivent être exécutés par un personnel adéquatement formé.

Tableau 4 —Techniques de raccordement

Matériau	Installation sans couche de sable	Méthode de raccordement [a]
PE 100	Non	EF, BW, SW, CF
PE 100-RC	Oui	
PE-RT (Type I/Type II)	Non	
PE-X	Oui	EF, CF, SS

a BW soudage bout à bout
SW soudage par manchonnage
EF assemblage par électrofusion
CF assemblage par clampage
SS douille coulissante

Les seules méthodes acceptables pour raccorder les systèmes de tubes souterrains en polyéthylène doivent être le processus de fusion thermique par EF. Le soudage ne doit être effectué que par un soudeur compétent et agréé.

Le soudage doit être réalisé conformément aux réglementations nationales. Il convient que le matériel de soudage soit automatisé et régulièrement étalonné. Le soudage ne doit être effectué que par un soudeur compétent et agréé.

6.2.4 Matériaux métalliques

En cas d'utilisation de tubes et d'autres composants métalliques dans les échangeurs géothermiques dans des cas exceptionnels (notamment les caloducs), il convient de veiller à l'épaisseur suffisante de paroi, à la qualité du métal et à la prévention de la corrosion. De plus, la composition chimique des eaux souterraines doit être prise en compte. La durabilité doit être assurée par l'utilisation de systèmes de protection. Dans tous les cas, ces analyses doivent être effectuées dans le cadre d'analyses de l'environnement et des risques (norme sur la protection de l'environnement et la prévention des risques).

Les principaux matériaux métalliques utilisés sont le cuivre, le laiton et l'acier inoxydable. Outre les exigences indiquées dans les normes répertoriées dans le Tableau 5, des exigences supplémentaires, notamment pour l'installation souterraine, doivent également être satisfaites.

Tableau 5 — Normes pertinentes pour les tubes et les raccords en matériaux métalliques

Matériau	Normes pertinentes pour les tubes et les raccords
Cuivre	EN 1057
Laiton	EN 12449, EN 1965-2, EN 12168
Acier inoxydable	EN ISO 1127, EN 10216-5

Si possible, il convient d'éviter d'utiliser des composants métalliques.

6.2.5 Fluide caloporteur

Pour les températures dans le circuit qui sont en permanence supérieures à 0 °C, de l'eau peut être utilisé comme fluide caloporteur. Si de l'eau pure est utilisée dans le milieu de circulation, la qualité de l'eau est cruciale pour la corrosion et l'activité bactériologique (qui peut entraîner une corrosion, un encrassement biologique) et peut varier significativement d'un emplacement à un autre. Concernant la corrosion, les paramètres importants sont la valeur du pH (pH : 8,5 à 9,5), la teneur en oxygène (< 0,05 mg O_2/l) et la teneur en minéraux (conductivité électrique < 100 µS/cm).

Pour les températures inférieures à 0 °C à n'importe quel stade ou moment du fonctionnement, un antigel doit être ajouté pour éviter toute détérioration du système par le gel. Il convient que la concentration en antigel soit la plus faible possible, conformément à la conception du système et à la protection contre le gel requises pour chaque composant.

Le fluide caloporteur :

— doit être compatible avec tous les matériaux avec lesquels le fluide peut être en contact. Il convient de prêter une attention toute particulière aux risques de corrosion ;

— ne doit présenter aucune corrosivité vis-à-vis des matériaux utilisés dans toute l'installation ;

— doit être non dangereux ;

— doit être non inflammable (au moins aux concentrations types utilisées pour les besoins du document).

Les fluides antigel courants sont l'éthylène glycol, le propylène glycol, l'éthanol et parfois les solutions salines. Il convient de noter que certaines marques commercialisent des additifs contre la biodégradation et la corrosion qui peuvent être toxiques et persistantes dans les eaux souterraines.

Ils sont très différents en termes de masse volumique et de viscosité, ce qui est important pour la baisse de pression.

Lors de la conception, les valeurs réelles au niveau du rapport de mélange et de la température de fonctionnement doivent être utilisées.

6.2.6 Matériau de comblement

6.2.6.1 Généralités

Le matériau de comblement du puits de forage doit combler entièrement le puits de forage sans laisser de vides. Il doit sceller le puits de forage sur toute la longueur, notamment pour sceller les aquitards perforés et éviter le raccordement des aquifères. Il doit également conférer une stabilité mécanique et un bon contact thermique entre la boucle et la paroi du puits de forage.

6.2.6.2 Coulis

Le coulis doit au minimum satisfaire aux exigences concernant la masse volumique du coulis représentée par la valeur eau/solide (donnée par le fabricant/fournisseur), la stabilité et la rhéologie du coulis, la résistance à la compression et la chaleur d'hydratation.

Les exigences générales relatives au coulis sont :

— le choix du matériau de comblement ou du coulis doit être adapté aux paramètres géologiques et hydrogéologiques spéciaux sur un site donné ;

— stabilité permanente après durcissement ;

— résistance aux attaques chimiques (sulfate, etc.) par les eaux souterraines, les souillures et le gaz ;

— résistance aux influences de la température dans la gamme de température de fonctionnement du BHE Si le coulis résistant au gel est utilisé, le comportement de résistance au gel du sous-sol environnant doit être pris en compte ;

— le taux de sédimentation du coulis ne doit pas dépasser 2 % après 24 h ;

— il convient que la perméabilité du coulis soit inférieure ou égale à $1\ 10^{-10}$ m/s ;

— il convient que la masse volumique de la suspension soit supérieure à 1 300 kg/m^3 et qu'elle dépasse la masse volumique du fluide de forage de 250 kg/m^3 ;

— il convient que la viscosité de la suspension (durée de Marsh) permette de pomper le puits de forage ;

— il est recommandé d'améliorer la conductivité thermique.

Il convient que les paramètres (la liste ci-dessus et la formule de mélange) d'un coulis spécifique à prendre en compte soient fournis par une fiche de données spéciale par le fabricant du matériau. Il convient que l'emballage mentionne la date de fabrication.

Il convient que l'utilisateur du coulis s'assurer que les paramètres du producteur de coulis ont été atteints sur le site avec le mode opératoire de mélange utilisé et l'eau fournie.

Il est recommandé d'utiliser des coulis prémélangés industriellement et ayant fait l'objet de contrôle qualité pour maintenir le niveau de qualité requis.

Dans certains cas, des billes d'argile gonflante peuvent être utilisées à la place du coulis.

6.2.6.3 Autres matériaux de comblement

Les exigences applicables aux autres matériaux de comblement sont :

— résistance aux attaques chimiques par les eaux souterraines, les souillures et le gaz ;

— en général, des matériaux de scellement résistant au sulfate sont recommandés ;

— résistance aux influences de la température dans la gamme de température de fonctionnement du BHE. Si le scellement résistant au gel est utilisé, le comportement de résistance au gel du sous-sol environnant doit être pris en compte ;

— il est recommandé d'améliorer la conductivité thermique jusqu'à la valeur du sous-sol environnant ;

— si un scellement est requis, il convient que la perméabilité du matériau de scellement soit inférieure à 1 10^{-10} m/s. Il convient que le scellement soit supérieur ou égal à la géologie environnante ;

— le matériau doit être correctement trié (homogène).

Il convient que les paramètres d'un coulis spécifique à prendre en compte soient fournis par une fiche de données spéciale par le fabricant du matériau.

Le choix du matériau de comblement ou du coulis doit être adapté aux paramètres géologiques et hydrogéologiques spéciaux sur un site donné.

6.3 Critères de sélection des composants

6.3.1 Généralités

La sélection des matériaux et des composants doit reposer sur les propriétés des matériaux indiquées en 6.2, l'impact environnemental et les critères de conception spécifiques du projet.

6.3.2 Boucles de BHE

Dans la majorité des systèmes, la température de fonctionnement est nettement inférieure à 40 °C. Des températures plus élevées peuvent survenir dans certains cas particuliers. En général, un système hydraulique est pressurisé pour éviter la cavitation dans la pompe de circulation. La classe de pression est déterminée par la somme de la pression hydrostatique et de la pression de fonctionnement.

Les critères de sélection des matériaux de la boucle de BHE sont :

— la température de fonctionnement ;

— la pression de fonctionnement ;

— la profondeur de la nappe phréatique en fonction de la profondeur du puits de forage détermine la pression hydrostatique supplémentaire ;

— la qualité générale du sol ;

— la protection du pied de la boucle, en cas de roches pointues dans le puits de forage pour éviter tout endommagement ;

— le niveau des eaux souterraines ;

— la baisse de pression au débit requis ;

— les caractéristiques thermiques de la boucle.

6.3.3 Tubes horizontaux

Le choix du matériau des tubes horizontaux doit satisfaire aux mêmes exigences de température que celles des tubes de la boucle de BHE. En 6.2.2, les propriétés applicables aux raccords sont également données.

6.3.4 Collecteurs

Les collecteurs, notamment tous les raccords, doivent satisfaire aux mêmes exigences de résistance à la température et de classe de pression que les tubes horizontaux et/ou de raccordement. Ceci s'applique également à la durée de vie de conception.

La sélection des collecteurs doit tenir compte du placement à l'extérieur ou à l'intérieur de la construction.

Les collecteurs doivent être facilement accessibles pour réaliser les inspections et la maintenance. Il est nécessaire d'avoir un dispositif d'aération dans les collecteurs pour purger l'air. Si le collecteur est situé dans un compartiment de collecteurs souterrain, il convient de tenir compte du volume du trafic.

6.3.5 Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur doit être conforme aux critères indiqués en 6.2.5.

Il convient que les critères de sélection soient :

— la température de fonctionnement prévue ;

— la marge de sécurité des températures requise ;

— la compatibilité des matériaux ;

— les aspects environnementaux (par exemple, eau dans la zone de protection des eaux souterraines).

7 Conception

7.1 Étapes de conception

La conception comprend l'ensemble des étapes suivantes :

— collecte d'informations : toutes les informations requises pour l'étude de cas doivent être collectées ;

— définition des caractéristiques géologiques du sol (propriétés thermiques, forabilité, facilité d'installation des tubes, écoulement souterrain, etc.) ;

— sélection de la configuration possible du système BHE, en fonction de l'espace disponible ;

— sélection de la température : détermination des limites de température qui doivent être fixées en hiver et en été ;

— dimensionnement, nombre de BHE individuels, profondeur du BHE, espacement entre les BHE ;

— conception hydraulique ;

— capacité thermique de chauffage et de refroidissement et durée de la charge de pointe ;

— demande en énergie de chauffage et de refroidissement (charge de base) ;

— performance du système pour différentes conditions de fonctionnement.

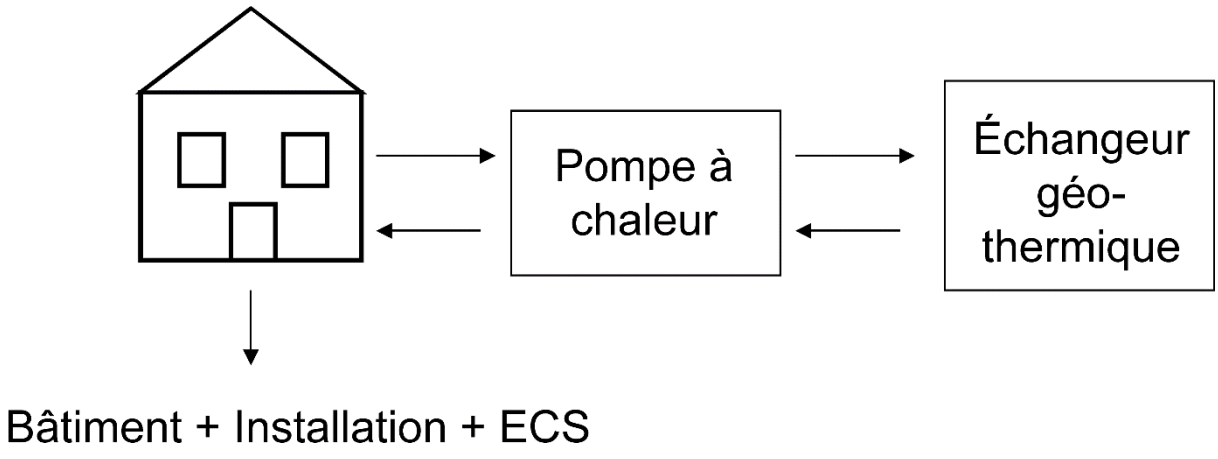
Le dimensionnement est la principale partie de la conception et doit être interconnecté aux décisions de conception de manière itérative.

À la fin du dimensionnement, et une fois que les conditions de conception sont satisfaites, la conception hydraulique a lieu.

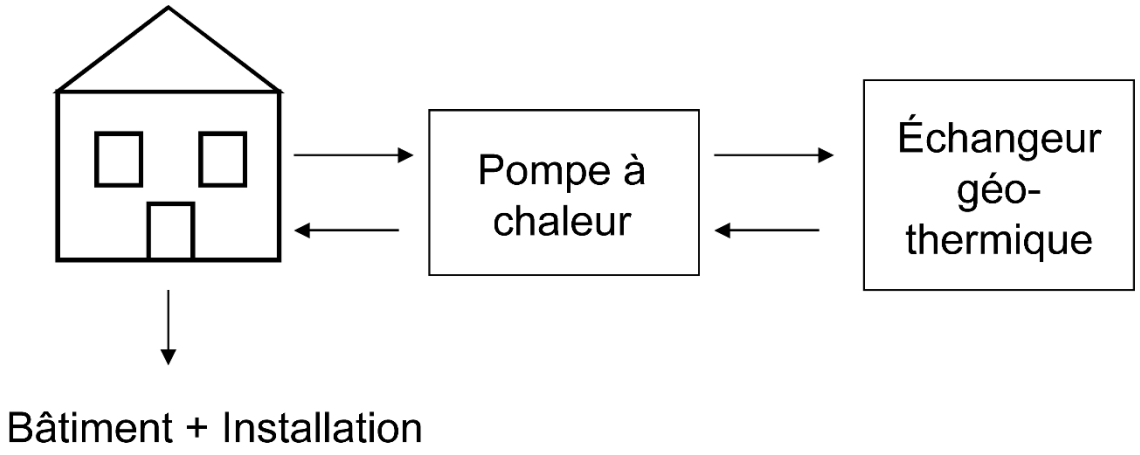
7.2 Dimensionnement

7.2.1 Généralités

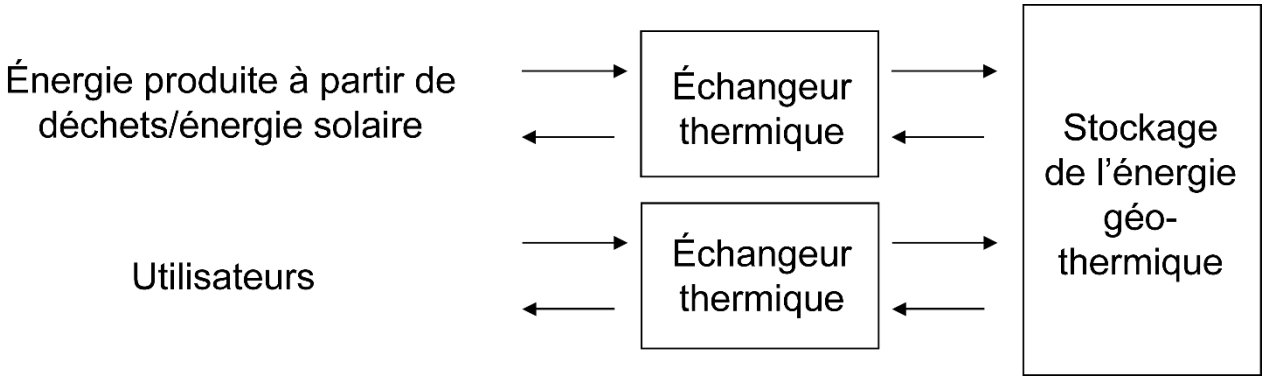
Le présent document définit le mode opératoire de détermination de la conception du système échangeur de chaleur. Le BHE peut être utilisé pour le couplage avec des pompes à chaleur en vue du chauffage et/ou refroidissement. Dans ce cas, les BHE font partie d'un système de pompe à chaleur géothermique (GSHP). Les BHE peuvent également être utilisés pour le transfert direct d'énergie géothermique sans pompe à chaleur (chauffage/refroidissement direct). Les BHE peuvent également être utilisés pour stocker l'énergie dans le sol (généralement la chaleur résiduelle ou l'énergie thermique solaire). Le présent document concerne toutes ces technologies qui sont décrites à la Figure 4.



a)



b)



c)

Figure 4 — Système BHE (ECS : eau chaude sanitaire)

La production d'eau de chauffage, d'eau de refroidissement et d'eau chaude sanitaire peut être entièrement assurée par le système géothermique ou peut être éventuellement associée à un autre système de chauffage/refroidissement et/ou d'autres sources d'énergie renouvelable.

7.2.2 Méthode générale

7.2.2.1 Généralités

La méthode générale permettant le dimensionnement approprié d'un champ de BHE est décrite à la Figure 5.

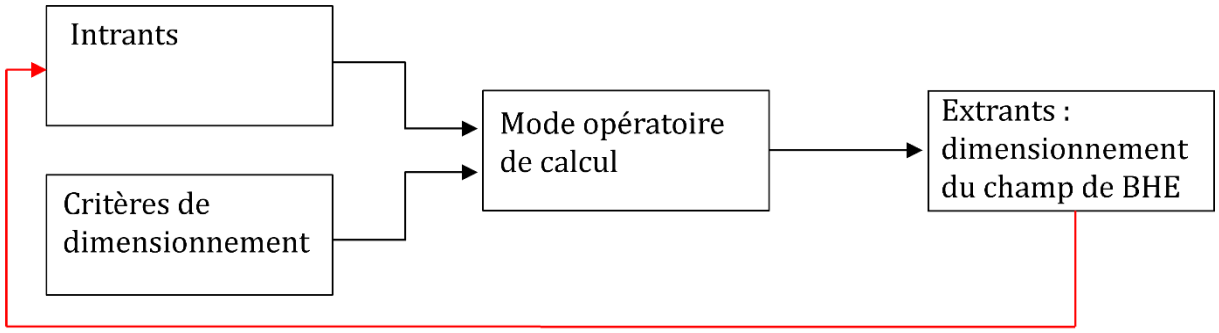


Figure 5 — Méthode générale de dimensionnement

7.2.2.2 Intrants

Les intrants ci-dessous doivent être pris en compte pour la phase de conception :

— propriétés thermiques du puits de forage et du sol (capacité thermique spécifique, conductivité thermique, profil de température du sol non remanié). La conductivité thermique et les températures du sol non remanié peuvent être déterminées *in situ* par le mode opératoire de test de réponse thermique décrit en détail en 7.2.4. La résistance thermique du puits de forage peut être calculée à partir des résultats d'essai et de la géométrie de construction du BHE ;

— intrant de charge : demande d'énergie (kWh) et puissance de pointe (kW et durée en heures). Pour les systèmes de transfert direct et les systèmes de chauffage/refroidissement direct, ces intrants sont associés aux charges des BHE. Pour les systèmes GSHP, ces intrants sont associés aux charges de la pompe à chaleur, c'est-à-dire côté utilisateur/construction ;

— performance énergétique du système de pompe à chaleur géothermique pour les différentes modes de fonctionnement du projet ;

— géométrie prévue du BHE (diamètre du puits de forage, espacement des tiges) et propriétés du matériau de comblement (par exemple, conductivité thermique, capacité thermique spécifique, masse volumique) ;

— propriétés du fluide caloporteur aux températures de fonctionnement (viscosité, masse volumique, capacité thermique spécifique, conductivité thermique) ;

— débit massique du fluide caloporteur ;

— surface disponible ;

— durée d'exploitation du projet.

7.2.2.3 Critères de dimensionnement

Le concepteur doit également définir les critères de dimensionnement, conformément à l'état de l'art, à sa propre expérience et aux exigences spécifiques du propriétaire/constructeur de la construction. Les critères de dimensionnement doivent comprendre au minimum :

— les contraintes de température de fonctionnement applicables au fluide caloporteur dans la boucle de BHE. Deux contraintes différentes peuvent être définies :

  — une limite inférieure de température à l'entrée du BHE doit être définie pour le mode chauffage, c'est-à-dire le mode d'extraction de chaleur géothermique. Cette limite inférieure doit être adéquatement définie pour empêcher tout dysfonctionnement dû au gel du sol entourant le BHE, pour empêcher le fluide caloporteur de geler ou pour satisfaire aux conditions de fonctionnement de la pompe à chaleur. Cette limite inférieure peut être inférieure à zéro, par exemple lorsque les boucles de BHE sont remplies d'eau pure ;

  — une limite supérieure de température à l'entrée du BHE doit être définie pour le mode refroidissement, c'est-à-dire le mode d'injection de chaleur géothermique. Cette limite supérieure doit être définie pour s'assurer que le système satisfait aux exigences applicables à la durée de vie du matériau de la boucle de BHE et aux contraintes environnementales.

D'autres critères de dimensionnement supplémentaires peuvent être choisis par le concepteur, notamment le niveau de rendement global du système géothermique, les contraintes de température applicables au sol environnant, la baisse de pression du circuit hydraulique.

Une conception de BHE appropriée doit être conforme aux critères de dimensionnement qui ont été définis pour toute la durée d'exploitation du projet.

La profondeur du tube horizontal doit être suffisante pour limiter l'influence thermique de la surface et réduire le risque de dommages mécaniques. Une isolation peut être installée si nécessaire ou si le concepteur indique les avantages. Le diamètre du tube horizontal doit être choisi de façon à limiter les pertes de pression, en tenant compte de la température de fonctionnement, de la rugosité du tube, de l'augmentation de la viscosité en cas de fluides antigel. Dans le tube horizontal, il peut être généralement recommandé de travailler dans des conditions laminaires. De plus, les pertes de pression contribuent dans ce cas à la puissance auxiliaire de la pompe.

7.2.2.4 Mode opératoire de calcul

Il convient que la conception établisse le dimensionnement correct du BHE en fonction des intrants conformes aux critères de dimensionnement définis par le concepteur. Selon les conditions hydrogéologiques locales, le mécanisme de transfert de chaleur dans le sol peut être principalement conducteur, principalement convecteur ou mixte.

NOTE La plupart des méthodes de conception ne tiennent pas compte de l'écoulement souterrain.

Selon le type de système BHE et selon le niveau d'exactitude requis, différents modes opératoires de calcul peuvent être mis en œuvre. Ces modes opératoires sont décrits en 7.2.5.

7.2.2.5 Extrants

Tous les paramètres définissant la géométrie du champ de BHE constituent les extrants du mode opératoire de dimensionnement :

— nombre et profondeur des BHE ;

— type de BHE sélectionné et dimensions des tubes ;

— espacement entre les puits de forage et configuration (géométrie) de l'ensemble du champ de BHE ;

— résistance thermique du puits de forage ;

— températures de fonctionnement pendant la durée d'exploitation ;

— baisse de pression maximale.

Il convient que la conception mentionne les intrants utilisés, les résultats de calcul, un diagramme de configuration du système BHE et du tube horizontal, le calendrier d'exécution et les spécifications dans un rapport.

7.2.3 Propriétés thermiques du sol

Du point de vue thermique, le sol peut être subdivisé en deux couches différentes :

a) une couche moins profonde où le sol est affecté par les conditions atmosphériques externes, c'est-à-dire la température sèche, l'échange de chaleur infrarouge du rayonnement solaire avec le ciel. Cette partie peut être utilisée pour évaluer le tube horizontal et pour la première partie du BHE, mais elle n'est généralement pas intégrée dans les calculs ;

b) une couche plus profonde où le sol n'est pas affecté par les conditions atmosphériques externes variant selon les saisons. Les propriétés du sol non remanié sont celles utilisées comme intrants dans le mode opératoire de dimensionnement.

Dans les deux cas, les conditions géothermiques peuvent être influencées par la présence d'eau qui, selon sa vitesse, peut affecter le transfert de chaleur de l'échangeur géothermique et l'éventuel stockage thermique saisonnier.

Les propriétés géothermiques qui sont prises en compte comme intrants dans le mode opératoire de dimensionnement du BHE sont les suivantes :

— capacité thermique volumétrique du sol ;

— conductivité géothermique ;

— température du sol non remanié.

D'autres propriétés thermiques peuvent également être prises en compte :

— gradient géothermique ;

— flux de chaleur géothermique.

Les caractéristiques thermophysiques du sol peuvent être évaluées par une étude géologique du site. À titre d'analyse préliminaire, les études géologiques antérieures menées sur des emplacements voisins ou des cartes géologiques de la zone peuvent être examinées, conjointement avec les données climatiques disponibles.

Ces évaluations peuvent être confirmées ultérieurement lors de la phase de réalisation et peuvent être validées par un TRT.

À titre de référence pour les calculs, les principaux types de sol et les valeurs types correspondantes des propriétés thermiques sont indiqués à l'Annexe D.

Une fois que les propriétés thermiques des couches de sol (λh) et leurs épaisseurs (Dh) sont connues, l'équation suivante peut être utilisée pour calculer la conductivité thermique moyenne du sol (λ) :

$$\lambda = \frac{\sum_{h=1}^{n} \lambda_h \cdot D_h}{\sum_{h=1}^{n} D_h}$$

La capacité thermique volumétrique peut être calculée sous forme de moyenne pour les différentes couches :

$$\rho \cdot c_p = \frac{\sum_{h=1}^{n} \rho_h \cdot c_h \cdot D_h}{\sum_{h=1}^{n} D_h}$$

En ce qui concerne la capacité thermique volumétrique dans les sols non remaniés, l'équation suivante peut être utilisée pour chaque couche :

ch = (2,7 φh + 1,9 φm + 4,2 ϕ) MJ/(m^3 K)

où

ch est capacité thermique volumétrique de la couche de sol h (MJ m^{-3} K^{-1}) ;

φh est la fraction de matière organique ;

φm est la fraction de matière minérale ;

ϕ est la fraction d'eau (généralement espace lacunaire).

7.2.4 Test de réponse thermique (TRT)

7.2.4.1 Généralités

Le mode opératoire de TRT présenté ci-dessous est le TRT de type 1 classique qui repose sur l'injection d'un flux de chaleur constant. Il existe d'autres types d'essai permettant d'obtenir des informations supplémentaires selon les conditions locales.

Le mesurage de la réponse d'un système au changement progressif d'un paramètre d'entrée est un principe physique courant pour déterminer certaines propriétés physiques. En cas d'utilisation thermique du sous-sol avec des échangeurs géothermiques, ce mode opératoire est utilisé lors d'un test de réponse thermique (TRT). Lors d'un TRT, une puissance thermique spécifiée et constante est injectée dans (ou extraite de) le sous-sol et la variation de température à l'entrée et à la sortie du puits de forage est mesurée. Associée à un modèle mathématique, la variation de température permet de déterminer des paramètres thermiques tels que la conductivité thermique du sous-sol et la résistance thermique du puits de forage du BHE, des paramètres qui sont généralement utilisés lors des calculs de conception. Un TRT est effectué avec un appareil d'essai mobile qui est directement installé dans le puits de forage pendant l'essai.

7.2.4.2 Contexte théorique

Un modèle théorique de transfert de chaleur entre la source de chaleur (dissipateur) du BHE et le sous-sol environnant est la base de l'évaluation. Les paramètres du modèle sont déterminés pour ajuster les températures calculées du fluide en fonction des températures mesurées. Généralement, la conductivité thermique du sous-sol et la résistance thermique du puits de forage du BHE sont les paramètres déterminés du modèle.

Les modes opératoires d'évaluation varient principalement en fonction du niveau de détail du modèle utilisé, qui a évidemment un impact sur la conception de l'appareil d'essai et la performance de l'essai. Le modèle le plus courant est l'approximation de source linéaire.

7.2.4.3 Approximation de source linéaire

La température moyenne du fluide en fonction du temps pour le transfert de chaleur unidimensionnel par conduction de la source linéaire dans le sous-sol peut être décrite par la Formule 1 si les limitations (simplifications) suivantes sont respectées :

— le transfert de chaleur dans le sous-sol entraîne uniquement une conduction ;

— le sous-sol est censé être homogène, avec des propriétés thermiques uniformes (en pratique, cela signifie que la conductivité thermique équivalente moyenne du profil de sol est obtenue) ;

— les propriétés thermiques des composants du puits de forage (par exemple, tubes, matériau de comblement du puits de forage, fluide caloporteur, etc.) sont censées être équivalentes à celles du sous-sol ;

— le sous-sol a une température uniforme avant de commencer l'essai ;

— la chaleur est injectée (ou extraite) par une source linéaire infinie au centre du puits de forage avec une puissance constante.

$$T_f\left(t\right)=\frac{\dot{Q}}{H\cdot 4\cdot\pi\cdot\lambda}\cdot\ln\left(t\right)+\frac{\dot{Q}}{H}\cdot\left[\frac{1}{4\cdot\pi\cdot\lambda}\cdot\left(\ln\left(\frac{4\cdot a}{r_b^2}\right)-\gamma\right)+R_b\right]+T_b \quad (1)$$

où

Tf (*t*) est la température moyenne du fluide (moyenne arithmétique de la température du fluide à l'entrée et à la sortie) au temps t en °C ;

t est le temps en s ;

$\dot{Q}$ est la puissance de chauffage totale injectée dans le sous-sol via le BHE en W ;

H est la longueur du BHE en m ;

λ est la conductivité thermique du sous-sol en W/(m·K) ;

a est la diffusivité thermique ; $a=\lambda / c_v$ en m²/s ;

c_v est la capacité thermique volumétrique du sous-sol en J/(m³·K) ;

rb est le rayon du puits de forage en m ;

γ est la constante d'Euler-Mascheroni ≅ 0,5722 ;

Rb est la résistance thermique du puits de forage en K/(W/m) ;

Tb est la température du sol non remanié en °C.

En fusionnant les paramètres constants dans le temps, la Formule 1 peut être simplifiée en une fonction linéaire du logarithme du temps avec la pente k et l'ordonnée à l'origine m (Formule 2) :

$$T_f\left(t\right)=k\cdot\ln\left(t\right)+m \quad (2)$$

À partir de là, on obtient :

$$\lambda=\frac{\dot{Q}}{H\cdot 4\cdot\pi\cdot k} \quad (3)$$

et

$$R_b=\frac{H}{\dot{Q}}\cdot\left(m-T_b\right)-\frac{1}{4\cdot\pi\cdot\lambda}\cdot\left(\ln\left(\frac{4\cdot a}{r_b^2}\right)-\gamma\right) \quad (4)$$

Cependant, cette solution d'approximation n'est valide que pour un temps qui n'est pas proche du départ du chauffage à t = 0 s. Ainsi, pour un temps plus long que le temps minimal théorique :

$$\frac{a\, t_s}{r_b^2} \geq 5$$

où

a est la diffusivité thermique ; $a = \lambda / c_v$ en m²/s ;

t_s est la période de départ de l'évaluation en s ;

rb est le rayon du puits de forage en m.

De plus, il existe un critère physique de temps minimal qui définit la validité du modèle d'évaluation utilisé, qui est associé aux écarts de transfert de chaleur réel par rapport aux hypothèses idéales du modèle. Pour l'estimation du critère physique de temps minimal, la convergence de la rétro-évaluation séquentielle peut être utilisée. L'évaluation est effectuée par étapes pour un intervalle de temps *ts* à *ts* + *n* Δ*t* (*n* = 1, 2 …). Ainsi, le résultat pour λ devient fonction de la longueur de l'intervalle de temps d'évaluation. Cette augmentation successive de l'intervalle de temps d'évaluation donne une courbe de λ, qui converge uniquement en fonction d'une valeur constante (résultat), si :

1) les hypothèses du modèle sont correctes ;

2) la période de départ de l'évaluation *ts* n'est pas trop courte ;

3) la période de mesure/d'évaluation est suffisamment longue.

Un intervalle de mesure trop court donne une variabilité statistique élevée. Pour une évaluation d'essai valide, il convient que la courbe converge dans un intervalle par défaut ± Δλ (Δλ/λ = ± 5 %) pendant au moins 20 h.

7.2.4.4 Appareillage d'essai pour TRT

Les exigences applicables à un appareillage d'essai pour TRT - circuit hydraulique, capteurs et système d'acquisition des données - ainsi que la performance d'essai prévue sont étroitement liées à la méthode d'évaluation.

En général, une puissance de chauffage constante présélectionnée est injectée dans le BHE. Il est recommandé de concevoir le concept hydraulique pour soumettre à essai différents types de BHE (simple U, double U, etc.). De plus, les questions de sécurité telles que la dilatation thermique du fluide, la prévention de la surchauffe et les problèmes d'écoulement, doivent être prises en compte. La puissance thermique doit être constante pour utiliser l'approximation de source linéaire pour l'évaluation d'essai. La puissance d'injection doit être ajustée en fonction de la longueur du BHE afin d'atteindre une Δ*T* raisonnable (entrée, sortie), ce qui est important pour obtenir une mesure précise de la température. La capacité thermique du fluide sélectionné pour l'essai doit être bien connue. La qualité de l'appareillage d'essai a un impact significatif sur la qualité de l'essai.

Une configuration d'essai type est illustrée à la Figure 6 — Appareillage d'essai type.

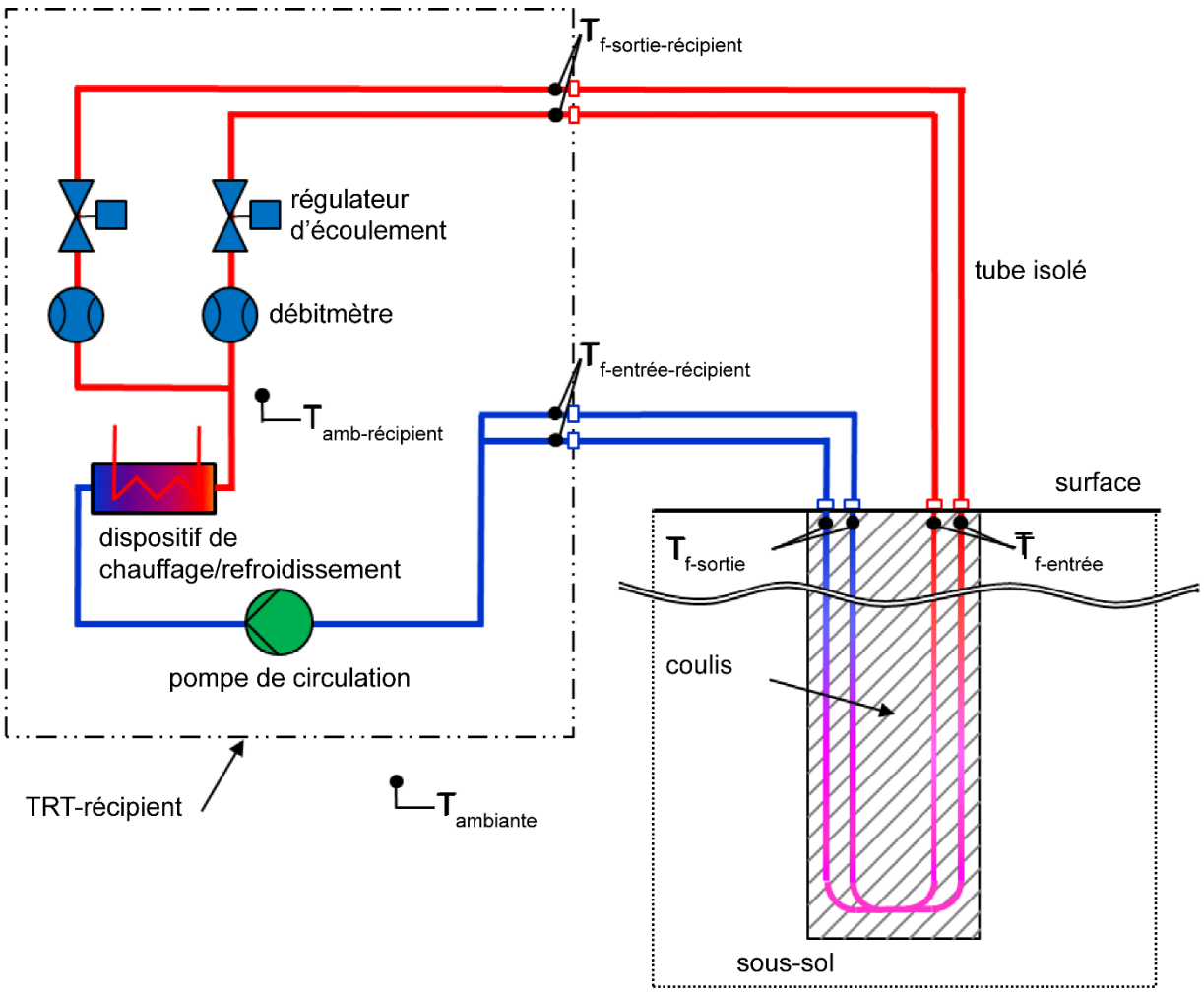


Figure 6 — Appareillage d'essai type

7.2.4.5 Mode opératoire de TRT

Les paramètres d'essai choisis doivent être proches des paramètres de fonctionnement de la dernière exploitation du système et il convient que le BHE d'essai soit représentatif de l'emplacement et du système BHE planifié.

Des informations fiables sur la géologie du site, le puits de forage, le matériau de comblement du puits de forage et le BHE sont requises pour garantir la fiabilité de l'essai. Il est important que la construction du BHE soit achevée et que le puits de forage soit comblé jusqu'au sommet. Il convient de combler la boucle de BHE avec le fluide qui est à l'état d'équilibre thermique avec le sous-sol environnant. Il convient d'éviter les activités dans les environs du BHE d'essai qui peuvent avoir un effet sur le mesurage.

L'appareillage est comblé avec le fluide, purgé et raccordé hydrauliquement à la boucle de BHE. Il est recommandé d'isoler les tubes de raccordement pour éviter les influences extérieures sur les résultats de mesure.

La température du sol non remanié est directement mesurée avant de commencer l'essai. Il est important que le fluide soit à l'état d'équilibre thermique avec le sous-sol environnant. Ce mesurage peut être effectué soit en descendant délicatement un capteur de température fin dans la boucle de BHE soit en faisant circuler le fluide dans la boucle et en mesurant la température à la sortie pour la première circulation d'un élément fluide dans la boucle. Il est recommandé d'utiliser l'écoulement turbulent. Il convient de ne pas commencer l'essai tant que l'impact thermique du forage et du comblement n'a pas disparu.

Après avoir mesuré la température du sol non remanié, le TRT peut être démarré. Une puissance thermique constante à débit constant peut être obtenue facilement en contrôlant la puissance électrique des éléments chauffants en utilisant la différence de température à l'entrée du BHE comme paramètre de mesure. Ainsi, les influences extérieures pertubatrices peuvent être facilement compensées.

7.2.4.6 Évaluation d'essai

L'approximation de source linéaire décrite en 7.2.4.3 pour l'évaluation d'essai requiert un minimum d'effort et les erreurs d'approximation sont négligeables si toutes les conditions limites sont conformes aux exigences du modèle.

Les résultats de la température moyenne du fluide en fonction linéaire de ln(t) (Formule 2 et Figure 7 — Régression linéaire de la température moyenne du fluide en fonction de ln(t)) et de la conductivité thermique peuvent être calculés à partir de ces mesures en utilisant la Formule (3).

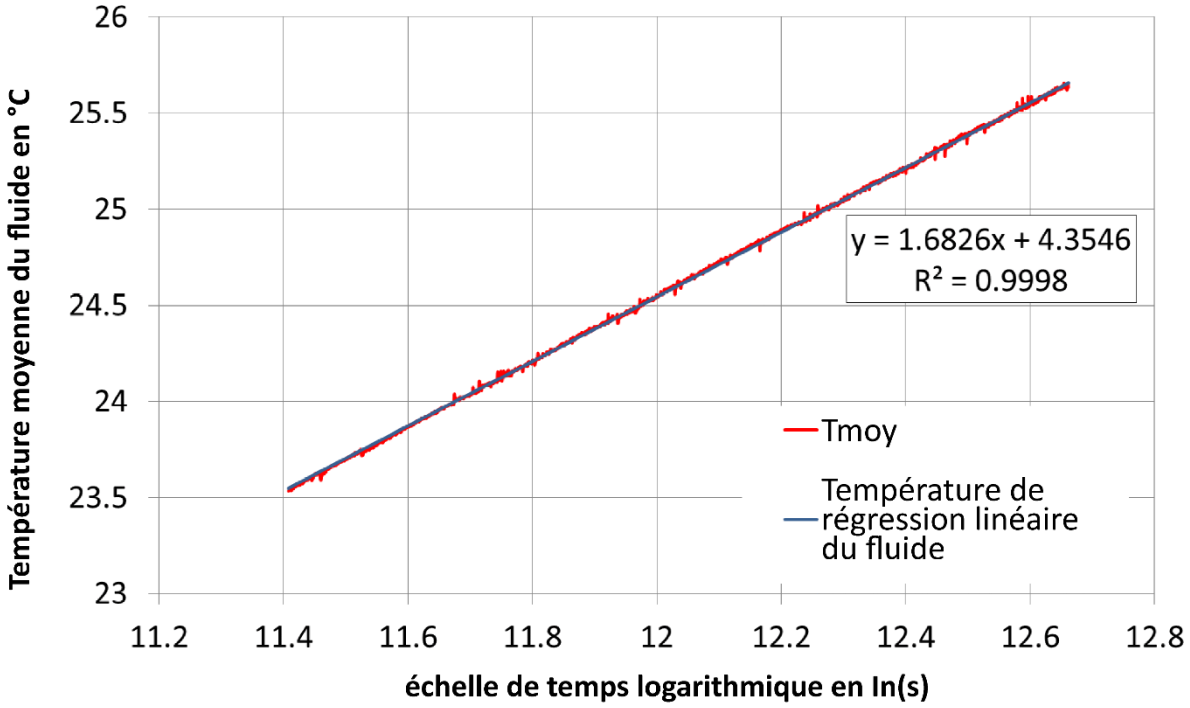
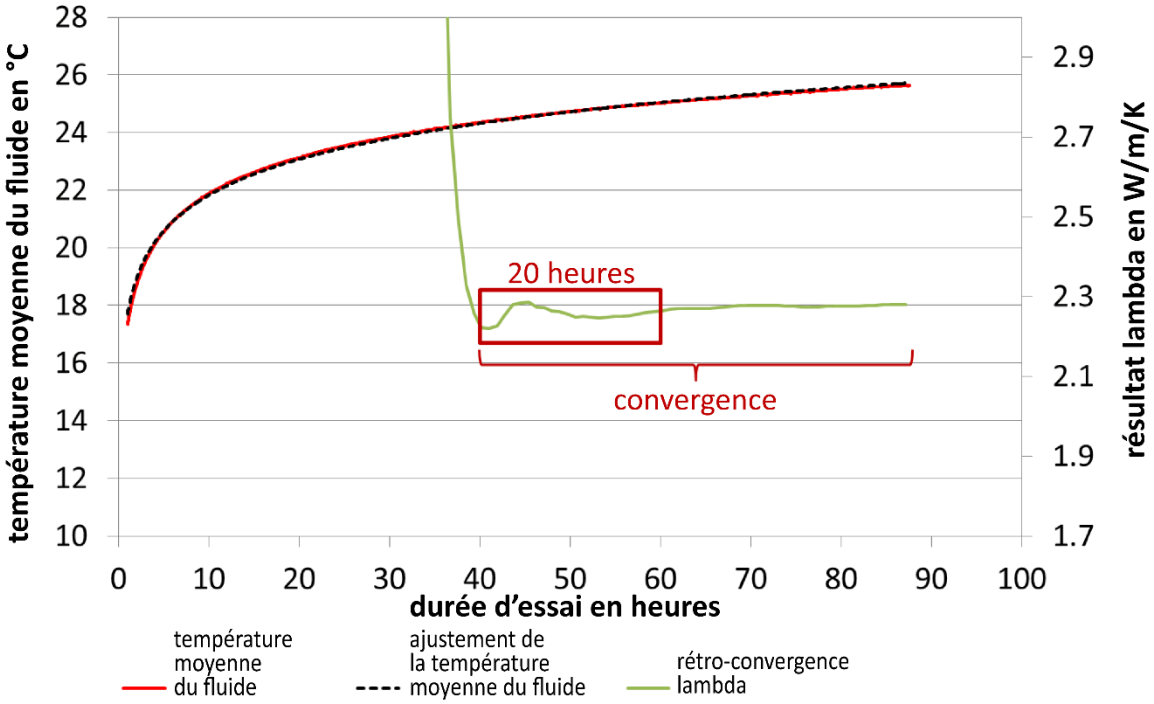


Figure 7 — Régression linéaire de la température moyenne du fluide en fonction de ln(t)

La résistance au puits de forage et la capacité thermique volumétrique restent des paramètres indéterminés. Il faut tenir compte du fait que seuls ces deux paramètres peuvent être déterminés si l'autre est estimé. Comme la capacité thermique volumétrique a une influence mineure sur la réponse thermique et qu'une estimation est relativement facile, cette valeur est fixée comme limite et il convient de l'indiquer dans l'évaluation, conjointement avec les résultats. La résistance thermique du puits de forage peut être déterminée à partir de la Formule 4. Une courbe type de la température moyenne du fluide et la courbe de rétro-convergence d'un TRT sont illustrées à la Figure 8.



Légende

température moyenne du fluide

ajustement de la température moyenne du fluide

rétro-convergence lambda

Figure 8 — Convergence de la conductivité thermique en fonction du temps par rétro-évaluation séquentielle

7.2.4.7 Utilisation correcte des résultats

Étant donné que le modèle utilisé pour l'évaluation du TRT est une approximation qui nécessite plusieurs hypothèses, les paramètres évalués doivent être directement utilisés uniquement si le modèle de conception est conforme ou compatible avec celui de l'évaluation du TRT. L'utilisation d'un modèle de conception différent nécessite un nouveau contrôle des paramètres déterminés au moyen des données mesurées.

De plus, la conformité ou la cohérence d'autres limites et paramètres de fonctionnement du TRT et de conception du système doit être prise en compte. En général, il convient que les paramètres de fonctionnement du TRT et du système planifié soient proches ; parfois les écarts ne peuvent être évités, notamment :

— type de fluide caloporteur : eau pour le TRT et eau/antigel pour le système ;

— régime de température : chauffage pour le TRT et refroidissement pour le système ;

— débit : différentes valeurs pour le TRT et le système planifié ;

— construction du BHE : le BHE d'essai peut être différent de celui du système (par exemple, longueur, diamètre du puits de forage, matériau de comblement).

Dans ce cas, la résistance thermique du puits de forage doit être surveillée et, si nécessaire, convertie avec un modèle de résistance appropriée du puits de forage.

7.2.4.8 Documentation des résultats

Toutes les informations utilisées pour l'évaluation de la performance et des données du TRT et tous les résultats doivent être documentés dans le rapport mis à disposition pour la conception ultérieure. Les données de surveillance doivent être archivées et doivent être mises à disposition en vue d'un contrôle ultérieur avec le modèle de conception.

7.2.5 Mode opératoire de calcul

7.2.5.1 Introduction

L'objectif du mode opératoire de calcul est de s'assurer que le BHE conçu est conforme aux critères de dimensionnement. Les principaux critères sont les températures de fonctionnement minimale et maximale du fluide caloporteur dans la boucle de BHE sur toute la période étudiée.

Les températures de fonctionnement du fluide caloporteur, à l'entrée et à la sortie de la boucle de BHE, sont étroitement liées à la distribution thermique actuelle dans le BHE et le sol environnant, ainsi qu'au niveau actuel de puissance thermique échangée avec le sol, c'est-à-dire la charge sur le sol.

L'un des problèmes associés au calcul de la réponse thermique du BHE est que la température dans le volume de sol change en fonction de l'énergie échangée avec le sol pendant la durée d'exploitation du système. Par conséquent, l'énergie totale échangée (charge de base) avec le sol ainsi que la capacité thermique maximale (charge de pointe) doivent être connues.

À partir du profil de demande d'énergie de l'utilisateur (« construction »), la charge énergétique nette sur le sol est calculée comme suit :

— soit une valeur de performance constante est utilisée pour les différents modes de fonctionnement ;

soit

— une corrélation entre les températures du fluide et le rendement (généralement, une courbe de rendement de la pompe à chaleur) est spécifiée à propos du rendement du système en fonction des températures réelles dans les circuits de la source et de l'utilisateur.

En principe, la charge nette du système BHE est calculée ainsi :

— circuit de chauffage de la source de charge nette = charge sur l'utilisateur * ((COP-1)/COP) ;

— circuit de refroidissement de la source de charge nette = charge sur l'utilisateur * ((EER+1)/EER).

Dans de nombreux logiciels de conception, le processus local et le processus global sont dissociés. Le processus global calcule la réponse thermique du volume de sol en fonction de la charge énergétique (kWh) tandis que le processus local calcule la température du fluide en fonction de la résistance thermique du puits de forage et le flux de chaleur spécifique (W/m) ainsi que la durée de la charge de pointe.

Selon la méthode de calcul utilisée, le concepteur peut avoir besoin de spécifier :

— la charge (kWh) par heure ou par intervalle de temps plus court pour une année d'exploitation complète ;

— la charge (kWh) pour chaque mode de fonctionnement par mois ou saison ainsi que la capacité thermique et la durée de charge de pointe (heures) ;

— la charge énergétique annuelle totale ainsi que la capacité thermique et la durée de charge de pointe.

Des systèmes auxiliaires supplémentaires doivent être envisagés pour spécifier la charge spécifique de la pompe à chaleur.

Le concepteur peut également avoir besoin de spécifier le rendement soit :

— par des corrélations du rendement en fonction de la température pour la pompe à chaleur (y compris les pompes de circulation) ;

soit

— par des facteurs de rendement constants pour les différents modes de fonctionnement, les facteurs étant choisis de manière « conservatrice » (COP de chauffage relativement élevé et EER de refroidissement relativement faible).

7.2.5.2 Modèles de BHE

Le processus local de transfert de chaleur dans et autour du puits de forage a une petite échelle spatiale et une courte échelle temporelle. Le flux de chaleur global dans le sol et les interactions thermiques entre les puits de forage adjacents dans un champ de BHE ont une très grande échelle spatio-temporelle. Ceci est problématique pour les calculs. Par conséquent, divers méthodes et logiciels ont été développés pour la modélisation du flux de chaleur entre le système de BHE et le sol, allant de solutions analytiques à des solutions numériques.

Dans le domaine de la conception de systèmes de BHE, le processus local et le processus global sont généralement dissociés, le processus local (échangeur de chaleur entre le fluide caloporteur et le sol environnant) est traité par la résistance thermique du puits de forage tandis que le transfert global de chaleur dans le volume de sol et entre les BHE individuels est généralement calculé à l'aide de fonctions G. Les fonctions G sont des fonctions sans dimension décrivant la relation entre la variation de température, la charge et le temps pour une configuration de BHE spécifique, provenant de solutions numériques ou analytiques plus complexes.

Le concepteur doit indiquer et justifier la méthode utilisée pour dimensionner les échangeurs géothermiques. Les critères de sélection d'une méthode spécifique peuvent être :

— la survenue de l'advection des eaux souterraines ;

— l'importance relative du gradient de température proche de la surface (notamment pour un BHE d'une profondeur inférieure à 40 m) ;

— le couplage dynamique entre le système BHE et la charge de construction, par exemple dans les systèmes hybrides ;

— les configurations spéciales pour lesquelles aucune fonction G n'est disponible.

7.2.6 Simulation

7.2.6.1 Période de départ

Si le système est principalement utilisé en mode chauffage ou en mode refroidissement, la période de départ peut avoir un effet sur le résultat de la conception.

Si le calcul de conception commence en période de chauffage, le sol est d'abord refroidi et tous les cycles ultérieurs sont affectés par ce point de départ. Ceci vaut également pour commencer le calcul de conception en saison de refroidissement. Lorsqu'un système est utilisé principalement pour le chauffage, commencer par la saison de chauffage est en ce sens une conception conservatrice. Cependant, si l'on sait que le système réel est mis en service avant la saison de refroidissement, une réduction significative de la taille de l'échangeur géothermique peut être possible. Ceci vaut également pour un système principalement utilisé pour le refroidissement : commencer par une saison de chauffage sera avantageux.

Le concepteur évalue l'effet de la période de départ (saison de chauffage ou saison de refroidissement) sur le résultat de la conception et explique pourquoi une période de départ spécifique a été choisie pour le calcul. Si une conception conservatrice est requise dans un système à dominance chauffage, la période de départ est la saison de chauffage et, dans un système à dominance refroidissement, la période de départ est la saison de refroidissement.

7.2.6.2 Durée de simulation/calcul

La durée totale de simulation, en années, peut être un paramètre important dans les calculs de conception (voir Annexe B). Étant donné que la durée d'exploitation d'un échangeur géothermique est très longue (au moins 50 ans), la durée de simulation utilisée lors des calculs de conception doit être conforme à cette durée d'exploitation pour assurer le fonctionnement correct et le rendement du système.

Souvent, la durée de calcul par défaut est utilisée, par exemple 25 ans. La durée de calcul requise dépend de plusieurs facteurs, par exemple la taille totale du champ, l'espacement entre les puits de forage et le bilan énergétique.

Les critères de dimensionnement concernent les seuils applicables à la température du fluide caloporteur (une limite basse et/ou une limite haute). Le concepteur doit représenter la température du fluide calculée en fonction du temps. Cette température ou au minimum la température maximale et/ou minimale annuelle sur toute la période de calcul peut être utilisée pour vérifier la conformité de la conception simulée aux critères de dimensionnement. Étant donné que la température maximale ou minimale est atteinte sur le long terme, au cours des dernières années de la période de simulation, le nombre total d'années de simulation est un paramètre pertinent et doit être déterminé pour chaque conception étudiée.

Pour les petits systèmes, le taux de variation de la température a tendance à diminuer rapidement, et une période de simulation de 25 ans à 30 ans est suffisante.

Dans un système où la chaleur extraite en hiver et pour la production d'eau courante est équilibrée avec la chaleur rejetée en été, la durée de simulation n'a aucune conséquence car les cycles se répètent chaque année, tandis que pour une conception non équilibrée, la durée de simulation requise dépend de la taille totale du champ.

Pour évaluer la durée de simulation requise pour des sites de forage plus grands (constitués de systèmes individuels ou de systèmes collectifs), il convient d'établir une courbe de saturation. Cette courbe est basée sur les paramètres normaux de conception du système, seul le nombre d'intervalles de temps (généralement des années) étant modifié progressivement en ajoutant cinq années à la période totale de calcul. La variation de température, en fonction de l'allongement de la période de calcul, est représentée. La durée de simulation est jugée suffisante si la variation de température sur la période de simulation précédente est inférieure à 0,5 K (en ajoutant plusieurs fois 5 années à la période de calcul).

7.2.6.3 Bruit de fond

Pour une conception non équilibrée, le déséquilibre énergétique annuel cumulé sur le sol entourant les BHE entraîne une variation de température du sol d'une année à l'autre, ce qui affecte également la variation de la réponse thermique, par exemple la température du fluide caloporteur. En raison des effets de diffusivité thermique du sol entourant les BHE dans le volume de sol environnant, le taux de variation de la température a tendance à diminuer à long terme à mesure que le volume de sol total thermiquement activé augmente.

Pour les systèmes plus grands, en raison de l'effet de diffusivité moins important du sol entourant les BHE dans le sol environnant, le taux de variation de la température diminue généralement plus lentement que pour les petits systèmes. De plus, la réduction de l'espacement entre les BHE entraîne également un taux de variation plus élevé de la réponse thermique d'une année à l'autre.

7.2.7 Conception hydraulique

La conception hydraulique consiste à définir les débits massiques, les baisses de pression des circuits, la sélection des collecteurs et des vannes, le choix de la pompe et le kit hydraulique possible pour le circuit du fluide caloporteur.

La conception hydraulique comprend le compte-rendu des calculs ainsi que les diagrammes des circuits (verticaux et horizontaux) avec toutes les données requises telles que les diamètres des tubes.

La conception hydraulique comprend :

a) le dimensionnement des tubes de façon à obtenir un nombre de Reynolds spécifié ;

b) le calcul de la baisse de pression dans un système de tubes.

Le débit est fonction d'un nombre de Reynolds (sélectionné) :

$$\nu = \frac{\mu \, \mathrm{Re} / \, \rho}{D}$$

Dans le tube vertical, un écoulement turbulent est favorable au transfert de chaleur mais il convient de surveiller toute baisse de pression. Dans le tube de raccordement horizontal, un écoulement laminaire réduit la baisse de pression.

— Expansion

Le vase d'expansion doit être correctement conçu en tenant compte du volume total de fluide (dans les BHE, dans le tube horizontal, dans le local thermique) et des températures de fonctionnement du fluide caloporteur.

8 Construction

8.1 Généralités

La construction d'échangeurs géothermiques est, dans plusieurs pays, soumise à des réglementations nationales telles que la loi sur l'eau et/ou le droit minier, etc. Le niveau de réglementation applicable à la construction d'échangeurs géothermiques varie significativement selon les pays et il convient d'en tenir compte. Dans certains pays, il varie au niveau régional (états fédéraux).

8.2 Préparation et planification du site

Les exigences concernant l'accessibilité, la capacité de charge et l'espace (équipement du site en général, libre accès au point de forage, voies de transport, etc.) doivent être satisfaites. Il convient de ne pas menacer la stabilité des constructions et/ou fondations. Il convient de maintenir des distances suffisantes entre les puits de forage et les constructions existantes. La couche arable doit être enlevée et/ou le site doit être nivelé si nécessaire. Il peut être nécessaire de clôturer la zone de forage.

Il convient de vérifier que l'emplacement est doté d'une infrastructure souterraines telle que des conduites d'alimentation et d'évacuation (gaz, électricité, eau, eaux usées, câbles de transmission des données, etc.). Il convient d'obtenir et de mettre à disposition les documents et les plans correspondants pendant tout le travail de construction.

Le site doit être soumis à un contrôle des munitions non explosées et de la pollution. Vérifier si des autorisations spéciales sont nécessaires ou si des contraintes réglementaires existent.

Il convient d'assurer l'alimentation adéquate en électricité (tension, puissance) et en eau (pression, débit volumique) ainsi que l'élimination des eaux usées, des souillures, des déblais de forage, des eaux de rinçage et des déchets.

Préparer tous les documents pertinents, par exemple les permis de forage, les certificats de forage, la cartographie de l'infrastructure souterraine, les informations sur le forage (par exemple, nappes artésiennes).

Les autres limitations applicables aux possibilités d'exploitation doivent être respectées.

8.3 Forage

8.3.1 Généralités

Les sociétés de forage impliquées dans les projets BHE doivent s'assurer qu'un personnel qualifié effectue les activités de forage et que les équipements sont conformes aux normes applicables en matière de santé et de sécurité et qu'ils sont régulièrement entretenus et contrôlés. Ceci peut être garanti par un certificat de maintenance récent.

La méthode et la technologie de forage doivent être choisies en fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques locales. Le foreur est responsable du choix final et de la mise en œuvre de la méthode de forage. Il convient de préparer les matériaux, les équipements et les outils appropriés sur le site de forage en vue d'une action immédiate en cas d'accidents. Il convient d'utiliser un équipement de protection individuelle adapté. Il convient que l'évaluation des risques comprenne, entre autres, les zones de rassemblement, les issues de secours et l'emplacement de l'hôpital le plus proche. Il convient d'identifier les secouristes sur les sites, etc.

Si un risque est identifié, il convient de stocker les matériaux permettant le traitement, par exemple, du gaz et des nappes artésiennes, de manière à pouvoir les utiliser immédiatement à tout moment. Pendant le forage, veiller à ce que la manipulation des matériaux ne provoque pas une contamination des eaux souterraines. Il convient de choisir le diamètre du puits de forage de manière à pouvoir introduire les tubes de BHE sans dommage et le matériau de comblement sans espace lacunaire. Un diamètre plus petit est généralement favorable à une faible résistance thermique du puits de forage, mais le diamètre doit être suffisamment grand pour pouvoir installer en toute sécurité le BHE et le matériau de comblement approprié.

8.3.2 Diamètre du puits de forage

Le choix du diamètre du puits de forage doit être adapté au type de sol à forer afin de ne pas bloquer la boucle de BHE pendant son installation. Le diamètre du puits de forage sera défini en fonction de la géologie, de la profondeur et de la géométrie de la boucle de BHE installée.

8.3.3 Fluide de forage

Il convient que les additifs pour fluides de forage soient sans danger pour les eaux souterraines. Il convient que l'eau utilisée pour mélanger la boue de forage soit de l'eau potable. Les eaux souterraines peuvent être utilisées, si leur qualité est correcte. Il convient d'éviter au maximum l'utilisation d'additifs pour fluides de forage.

Si nécessaire, seuls les additifs pour boues de forage [1] n'entraînant aucune modification chimique/biologique du sous-sol peuvent être utilisés pour le forage. Il convient d'enlever la boue de forage du puits de forage et de la mettre au rebut correctement dès que le forage est terminé.

En cas de pertes imprévues de la boue de forage, des mesures de sécurité doivent être prises immédiatement.

8.3.4 Surveillance et documentation du processus de forage

Pendant le forage, un niveau minimal de surveillance est requis. Les observations sur la géologie et l'hydrogéologie doivent être documentées dans un log de forage, par exemple pour vérifier les hypothèses géologiques de la conception.

Le faciès pétrographique des couches rencontrées pendant le forage doit être documenté par un échantillonnage. De plus, les niveaux des eaux souterraines doivent être indiqués dans la description du faciès pétrographique si la méthode de forage permet de déterminer les niveaux des eaux souterraines.

Il convient que le log de forage comprenne une étiquette d'identification incluant les informations suivantes : nom du site, date, position et identification du puits de forage, nom de la société et du foreur, nom de la personne étudiant l'échantillon, etc.

Il convient de stocker les déblais dans des récipients étanches appropriés qu'il convient d'étiqueter de façon permanente avec les informations suivantes : nom du site, date, position et identification du puits de forage, nom de la société et du foreur, nom de la personne étudiant l'échantillon, conception du puits de forage, profondeur de l'échantillonnage, etc.

Les conditions géologiques et hydrogéologiques peuvent nécessiter un mesurage géophysique des forages BHE. Les logs géophysiques peuvent, par exemple, aider à vérifier le profil géologique et les conditions hydrogéologiques. Le choix de la méthode dépend de chaque situation.

En cas de grandes installations et de conditions géologiques et hydrogéologiques imprécises, un forage exploratoire peut être recommandé. Il peut également être recommandé d'effectuer des mesurages géophysiques et un test de réponse thermique. Normalement, le forage exploratoire peut être utilisé ultérieurement en tant que BHE.

8.3.5 Comblement

Le comblement d'un échangeur géothermique a plusieurs objectifs :

— conférer une stabilité mécanique au puits de forage en évitant l'écrasement et l'endommagement de la boucle de BHE installée ;

— assurer un contact thermique entre la boucle de BHE et la paroi du puits de forage ;

— assurer la protection environnementale du sous-sol par le scellement des couches arables ;

— empêcher le mélange des qualités d'eau par le scellement des aquitards ;

— empêcher l'eau artésienne de remonter dans les aquifères confinés.

8.4 Boucle d'échangeur géothermique

Une boucle d'échangeur thermique standard comprend généralement un fond profilé en U et des tubes verticaux continus (monoblocs). Ces boucles d'échangeur géothermique doivent être fabriquées et soumises à essai en usine. La partie verticale du tube ne doit pas avoir de raccord, excepté avec le fond de la boucle. Elle doit être soigneusement emballée et transportée jusqu'au site de construction. La manipulation soigneuse et le stockage en toute sécurité sur site empêchent tout endommagement du BHE avant installation.

Il convient de souder en usine le raccord entre le profilé en U au fond de la boucle de BHE et les tubes verticaux (Figure 3). Il convient que le matériel de soudage soit automatisé et certifié. Le soudage ne doit être effectué que par un soudeur certifié conformément aux lignes directrices nationales et disposant d'un certificat d'essai valide pour l'opération de soudage. Chaque soudage effectué doit être documenté. Il convient de faire contrôler la qualité de la production par un superviseur externe.

Pour des raisons de traçabilité, il convient d'apposer sur les tubes de BHE un marquage indiquant l'identification du fabricant, les informations sur le matériau, l'identification du lot et les dimensions du tube (SDR/spécifications du tube). Il convient d'imprimer les marquages des longueurs sur les tubes. Il convient de démarrer à 0 au fond et d'augmenter en remontant.

Il existe des exceptions applicables aux modèles de BHE, notamment le soudage dans la partie verticale de BHE co-axiaux qui ont généralement un diamètre de tube plus large. Dans ce cas, des dispositifs de soudage et des modes opératoires d'essai spéciaux sont requis. Le soudage dans la partie verticale de tubes de BHE co-axiaux peut être effectué sur site à condition de respecter les règles techniques applicables au processus. Le soudage ne doit être effectué que par un soudeur certifié conformément aux lignes directrices nationales et disposant d'un certificat d'essai valide pour l'opération de soudage. Il convient de documenter tous les raccords fabriqués sur site.

8.5 Installation de la boucle d'échangeur géothermique

Les boucles d'échangeur géothermique présentent généralement une géométrie en U simple, en U double, en U multiple ou co-axiale pour produire la surface requise pour le transfert de chaleur vers le fluide (Figure 2).

La manipulation méticuleuse et le stockage en toute sécurité sur site empêchent tout endommagement des boucles de BHE avant installation. Les boucles de BHE doivent donc être stockées sur des palettes pour s'assurer qu'elles ne sont pas en contact direct avec le sol et les éventuelles pierres pointues potentiellement présentes sur le site. Il convient d'inspecter visuellement les boucles de BHE pour déceler toute rayure ou tout autre dommage physique avant installation. Les tubes endommagés ne doivent pas être installés.

Il convient d'installer les boucles de BHE depuis un dérouleur pour éviter les dommages.

Pour l'installation de la boucle de BHE dans des puits de forage remplis d'eau/de boue de forage, la remplir d'eau et disposer un poids au fond avant installation pour compenser le soulèvement.

Pendant le forage des boucles de BHE, la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du tube doit être maintenue au-dessous de la pression d'écrasement.

Tous les raccords doivent être fabriqués par soudage en utilisant l'assemblage par fusion à emboîtement et de préférence le soudage par manchonnage avec des éléments chauffants intégrés (assemblage par électrofusion). Il convient d'éviter le soudage bout à bout sur le site de construction. Les raccords à compression/à serrage ne doivent être utilisés dans le sous-sol.

La tête de la boucle de BHE doit être scellée temporairement avec un bouchon fixe pour éviter toute pénétration de saleté dans les tubes tant que le tube horizontal n'est pas raccordé.

8.6 Comblement et injection de coulis

8.6.1 Généralités

L'objectif général du comblement est de sceller le puits de forage sur toute sa longueur, jusqu'à la surface. Le comblement assure également le bon contact thermique de la boucle de BHE avec le sol environnant. Selon les conditions géologiques et hydrogéologiques, différents modèles de BHE nécessitent différents types de scellement.

Le scellement des puits de forage par comblement est extrêmement important pour s'assurer que tous les aquitards qui ont été perforés sont à nouveau scellés, de telle sorte que les niveaux de pression des eaux souterraines restent inchangés. Le scellement du BHE dépend non seulement du matériau de comblement employé, mais également des installations utilisées et des caractéristiques du puits de forage. Ainsi, le système (tubes, matériau de comblement, configurations géométriques et sous-sol environnant) doit être considéré dans son ensemble. Il convient d'effectuer le comblement du puits de forage directement après l'installation de la boucle de BHE. Des tubes d'injection spécifiques sont nécessaires. Un bon contact thermique et un scellement adéquat des BHE sont obtenus en comblant entièrement les trous, les inclusions d'air et les inclusions d'eau. Il est interdit de combler l'espace annulaire depuis la surface.

8.6.2 Injection de coulis

Ainsi, il convient d'effectuer l'injection de coulis dans un type de mode de fonctionnement en continu du fond jusqu'au sommet du puits de forage, mais en laissant le tube d'injection dans le puits de forage. Par conséquent, un tube d'injection doit être installé avec la boucle de BHE jusqu'au point le plus bas du puits de forage. Si les conditions géologiques et hydrogéologiques sont spéciales, si les puits de forage sont profonds, etc., des tubes d'injection supplémentaires à des profondeurs moins élevées peuvent être requis. Dans ce cas, le comblement doit être effectué progressivement.

Si un tubage est requis, il peut être retiré du puits de forage. Le BHE est ensuite comblé, mais il convient que le niveau de suspension soit toujours maintenu à l'intérieur du tubage. Les limitations des tubes de BHE utilisés doivent être considérées représentées par la pression d'écrasement et la pression de fonctionnement maximale admissible des tubes.

Le mélangeur, la pompe et les tubes d'injection doivent être jugés appropriés. Le processus de mélange doit être ajusté en fonction du matériau de comblement choisi. Les exigences des fabricants de matériau de comblement doivent être prises en compte. Les matériaux de comblement prémélangés industriellement et ayant fait l'objet de contrôle qualité sont la norme. Le mélange sur site doit être évité.

Le coulis doit être mélangé avec de l'eau selon les techniques de mélange recommandées.

Il convient de contrôler la masse volumique du coulis de chaque lot avant l'injection dans le puits de forage.

Le coulis doit être injecté dans le puits de forage pour le remplir du fond jusqu'au sommet jusqu'à ce que le coulis déborde avec la masse volumique requise.

Généralement, le plastique est utilisé pour les tubes de bétonnage, les tubes en acier ne sont pas recommandés.

D'autres concepts de scellement peuvent être utilisés si le concept est confirmé et accepté par les autorités locales. Les exigences d'injection de coulis dépendent des conditions géologiques et hydrogéologiques locales.

8.6.3 Autre opération de comblement

Dans certains cas, des billes d'argile gonflante peuvent être utilisées à la place du coulis. Ceci peut nécessiter des pompes de comblement spéciales et un système de surveillance de la température du processus de comblement. Le tube d'injection doit être retiré progressivement. La surveillance de la pression est nécessaire pour s'assurer que tout l'espace annulaire est rempli de billes d'argile.

En cas de comblement avec des matières solides, le puits de forage peut être comblé avec différents matériaux (comblement stratifié), les couches de scellement (aquitards) étant comblées avec des billes d'argile. Le reste est comblé avec du sable ou du gravier. Lors d'une opération de comblement de ce type, il est essentiel de connaître la profondeur exacte des couches de scellement et de contrôler la profondeur d'introduction du matériau de comblement.

Les matières solides telles que le sable, le gravier et les granulés de bentonite peuvent être comblées dans le puits de forage en les introduisant sous la forme d'un mélange eau/solide depuis la surface, à l'aide d'un tube d'injection. Pour établir le niveau de progression du comblement, un jaugeage répété de la profondeur de comblement est requis. De plus, la profondeur mesurée doit être comparée avec le volume du puits de forage et le volume de comblement requis.

8.7 Tube horizontal

Il convient de choisir les tubes de raccordement horizontaux en fonction des conditions locales. Ils doivent permettre la même durée d'exploitation (aux températures et pressions de fonctionnement) que la boucle verticale. Il convient de disposer les tubes dans une couche de sable sans pierres ni particules pointues, sauf si le matériau du tube et du raccord permet une exception, qui doit être garantie par le producteur. Le rayon de courbure minimal des matériaux doit être respecté.

Il convient d'éviter les raccords à compression dans le sous-sol ou d'en permettre l'accès en vue de l'inspection visuelle par un regard de visite.

Plusieurs BHE sont raccordés à un collecteur.

Il convient d'installer un ruban marqueur au-dessus des tubes souterrains pour indiquer leur emplacement en vue de l'excavation ultérieure.

La profondeur du tube horizontal doit être suffisante pour limiter l'influence thermique de la surface et réduire le risque de dommages mécaniques. Une isolation peut être installée si nécessaire ou si le concepteur indique les avantages.

Dans tous les cas, des mesures doivent être prises pour éviter au fluide caloporteur en circulation de geler. Il convient d'installer les tubes horizontaux sous la profondeur de gel mais à au moins 0,8 m.

Les parties froides du système doivent être installées à une distance significative (> 1 m) des conduites d'alimentation et d'évacuation des déchets. Si ce n'est pas le cas, la partie appropriée doit être isolée avec un matériau adapté à une utilisation dans le sous-sol.

8.8 Essais du BHE - Contrôle d'étanchéité, contrôle d'écoulement, contrôle du coulis, mesurages géophysiques

Tous les assemblages par fusion et tubes de BHE doivent être contrôlés pour vérifier l'absence de fuite dans la boucle en usine, avant l'emballage et la livraison.

Juste avant d'introduire la boucle de BHE dans le puits de forage, un contrôle visuel méticuleux des dommages doit être effectué et documenté. Il convient que le fabricant définisse les dommages maximaux admissibles.

Le contrôle d'étanchéité peut être réalisé avant d'introduire la boucle dans le puits de forage.

Lors de l'introduction de la boucle de BHE dans le puits de forage, il convient de veiller à ne pas rayer le tube contre des pierres pointues, contre un bord du tubage du puits de forage ou à ne pas le déformer.

Juste après l'introduction de la boucle de BHE et l'injection du coulis dans le puits de forage, un contrôle de pression peut être effectué pour le contrôle d'étanchéité - les toutes petites fuites ne peuvent pas être détectées de cette façon.

Les tubes de BHE ne doivent pas être pressurisés avec de l'air, sauf à une faible pression et avec submersion dans l'eau.

Après installation de la boucle de BHE et injection du coulis, un contrôle d'écoulement doit être effectué et comparé avec les valeurs prévues pour détecter une baisse de pression supplémentaire en bouchant ou en pliant les tubes.

Le volume, la pression et le débit du coulis peuvent être contrôlés et notés pendant et après le processus de comblement si, par exemple, un coulis enrichi en magnétite est utilisé en mesurant la sensibilité magnétique depuis l'intérieur du tube de l'échangeur thermique (contrôle du coulis).

Les conditions géologiques ou hydrogéologiques peuvent nécessiter l'utilisation de matériaux pour coulis enrichis (par exemple, enrichissement en magnétite). Le matériau enrichi permet un comblement contrôlé puis un mesurage et une vérification du BHE. De nos jours, l'utilisation de matériaux pour coulis ayant une sensibilité magnétique spécifique est confirmée. De plus, pour l'utilisation de matériaux non enrichis, il peut être utile d'effectuer des mesurages géophysiques pour contrôler la qualité d'un BHE. Les méthodes thermiques, par exemple les relevés de température, les TRT et les TRT améliorés, les TRT à court terme et d'autres méthodes de mesure, par exemple les diagraphies gamma-gamma, peuvent fournir des indications sur la qualité du coulis.

Tous les essais doivent être documentés.

8.9 Collecteurs

Pour les systèmes équipés de plusieurs BHE, il convient d'installer des collecteurs. Il convient que les collecteurs soient munis de robinets d'isolement pour chaque BHE. Des régulateurs de débit sont nécessaires à l'équilibre hydraulique du système.

Il est nécessaire d'avoir un dispositif d'aération dans les collecteurs pour purger l'air.

Les collecteurs doivent être facilement accessibles pour réaliser les inspections et la maintenance.

— Les collecteurs sont, par exemple, en plastique, cuivre ou acier inoxydable.

— Les collecteurs doivent être fabriqués en usine dans des conditions contrôlées et garantes de la qualité.

— Tous les collecteurs doivent être soumis à un essai hydrostatique par le fabricant avant livraison.

— Les collecteurs doivent être soumis à un essai de pression sur site, mais pas avec de l'air.

— Les collecteurs livrés doivent être raccordables à l'unité de production, au lot et au contrôle qualité.

— Les raccords des collecteurs nécessitent des robinets d'isolement distincts.

— Des régulateurs de débit doivent être installés pour permettre le réglage hydraulique de chaque circuit.

— Les collecteurs munis de raccords amovibles et d'un fluide actif contenant de l'antigel doivent être installés dans des puits pour éviter toute fuite dans le sous-sol.

Il convient de préférence d'installer les collecteurs dans des compartiments/puits extérieurs à la construction. Il convient que les compartiments soient étanches et peuvent être en polyéthylène ou en béton.

9 Mise en marche

9.1 Généralités

En principe, les échangeurs géothermiques ne nécessitent pas de maintenance. Cependant, la qualité du milieu de circulation est un aspect important du fonctionnement du système.

Pendant la mise en service et avant d'utiliser le système, il est nécessaire de s'assurer que le milieu de circulation :

— est de l'eau de qualité potable ;

— n'est pas contaminé par des bactéries. Ceci peut être vérifié par une analyse en laboratoire d'un échantillon ;

— ne contient pas de matières fines telles que du sable, du gravier ou des raclures de PE. Il convient d'installer un filtre avant la pompe à chaleur et/ou côté aspiration de la pompe de circulation ;

— présente une concentration correcte en antigel. Ceci peut être vérifié sur site à l'aide d'un réfractomètre ;

— est intégralement désaéré et à pression correcte (la pression de fonctionnement habituelle est de 2 bars, la pression statique réelle requise dépend de la hauteur d'aspiration positive nette de la pompe de circulation).

9.2 Fluide caloporteur

Avant la mise en marche, il convient de vérifier le point de congélation en fonction des spécifications de conception et des exigences du fabricant de la pompe à chaleur (6.3.5).

Pour les températures constamment supérieures à 0 °C, l'eau peut être utilisée comme fluide actif.

Si des températures inférieures à 0 °C risquent de se produire, un antigel doit être ajouté pour éviter toute détérioration du système par le gel.

Le type d'antigel doit être pris en compte lors de la sélection des autres matériaux du système (par exemple, la corrosion est critique lorsque du glycol et du laiton sont associés sans inhibiteur de corrosion).

Lorsque les températures de fonctionnement baissent généralement de quelques degrés au-dessous de 0 °C, il convient que la concentration n'excède pas celle requise. Les concentrations supérieures à celles requises en fonction de la température minimale ont un effet négatif sur les propriétés du fluide (viscosité) et les propriétés thermiques du milieu.

9.3 Remplissage du système

Avant de raccorder la boucle de BHE au système hydraulique (par exemple, tube de raccordement horizontal, collecteur, etc.), il est recommandé de le purger minutieusement par un récipient ouvert et de déceler toute trace de contamination. En cas d'utilisation d'antigel, il convient de s'assurer que l'eau pure provenant du rinçage du système est complètement remplacée par le mélange antigel. Pour finir, il convient de confirmer la concentration en antigel et de la consigner dans la documentation.

9.4 Séchage des nouvelles constructions

Pendant la phase de construction, les constructions en béton et en briques contiennent une grande quantité d'eau (béton, plâtre, gypse, chape, etc.) et doivent être séchées vers la fin de la construction avec une demande de chaleur incroyablement élevée. En général, ceci n'est pas pris en compte dans la conception du système de chauffage. La demande de chaleur supplémentaire doit être couverte par d'autres sources pour éviter tout dommage irréversible du système souterrain.

9.5 Mise en service

Un contrôle approprié du fonctionnement et de la performance est recommandé, en particulier du débit et de l'évolution des températures, lors du fonctionnement de la pompe à chaleur. Ceci nécessite un minimum de matériel de surveillance.

Il est recommandé d'indiquer à l'opérateur comment exploiter le système et optimiser la performance. La liste de contrôle (Annexe C) peut être appliquée :

9.6 Documentation

Il est recommandé de fournir une documentation exhaustive sur les calculs de performance.

10 Exploitation, surveillance et maintenance

10.1 Exploitation

Le fonctionnement du système BHE est principalement affecté par les caractéristiques de construction, la demande d'eau chaude sanitaire et les paramètres du système de pompe à chaleur.

10.2 Surveillance

10.2.1 Généralités

La surveillance sert à :

— assurer le fonctionnement fiable du système GSHP afin d'empêcher toute pollution environnementale et toute dégradation de la performance du système sur le long terme ;

— fournir les indicateurs de rendement énergétique sur les échanges d'énergie (énergie extraite, injectée, stockée) nécessaires pour consigner l'énergie extraite du sous-sol (pour le chauffage) et l'énergie injectée dans le sous-sol (pour le refroidissement) ;

— fournir des informations techniques permettant un réglage optimisé du système et d'éventuelles incitations financières.

Le système de surveillance peut varier en fonction de la taille de l'installation et des objectifs. Il peut s'agir d'un système d'enregistrement manuel et/ou de données enregistrées.

Les paramètres suivants peuvent être surveillés :

— températures avec données historiques :

  — il convient de surveiller la température du fluide pour les circuits d'alimentation et d'évacuation aux limites de la pompe à chaleur ;

  — température ambiante ;

  — température dans le sol ;

— humidité relative ;

— pression : il convient de surveiller localement la pression différentielle pour chaque système BHE à l'aide d'un manomètre ou d'un capteur de pression positionné à la sortie de la boucle de sondage ;

— débit : il convient de surveiller le débit du fluide circulant dans le système BHE aux limites de la pompe à chaleur ;

— énergie de fonctionnement fournie ;

— énergie échangée avec le sol ;

— il convient de surveiller la consommation d'électricité - pour le pompage et pour la compression - aux limites de la pompe à chaleur. Pour ce faire, il convient d'alimenter la pompe à chaleur et les pompes de circulation à l'aide de circuits électriques dédiés permettant de mesurer la consommation d'électricité.

La température (d'entrée et de sortie) et la pression sont des paramètres qu'il convient de mesurer pour chaque système. Pour surveiller efficacement un système, il faut non seulement pouvoir surveiller les paramètres critiques mais également avoir accès à chaque BHE, soit directement au niveau du puits de forage soit au niveau du collecteur.

NOTE Pour atteindre l'objectif de la surveillance, les données peuvent être fournies par la pompe à chaleur.

10.2.2 Température

La température d'entrée et de sortie du système BHE doit être mesurée et notée.

Les objectifs de ces exigences sont d'identifier tout dysfonctionnement ou l'identification rapide d'un dysfonctionnement.

Quelle que soit la région d'Europe et l'objectif du site de forage, il convient de respecter les limites prescrites. Un paramètre de temps doit être associé à la température.

10.2.3 Pression

La pression doit être surveillée car une perte de pression indique un changement dans le système, c'est-à-dire le fluide sort du système collecteur et peut nuire à l'environnement.

Il convient de fixer une limite inférieure critique au-dessous de laquelle une alarme se déclenchera, la pompe de circulation s'arrêtera, afin de pouvoir prendre des mesures.

10.2.4 Débit

Pour qu'un système BHE fonctionne efficacement, il convient que le débit du fluide caloporteur se situe dans les limites fixées. La différence de température peut également être utilisée comme mesure du débit.

10.3 Maintenance

Il est recommandé de contrôler la qualité du fluide caloporteur à intervalles réguliers (par exemple, tous les deux ans).

Les contrôles peuvent porter sur :

— la concentration en glycol ;

— le pH ;

— la conductivité électrique ;

— la qualité biologique.

Il est recommandé d'effectuer une maintenance annuelle du BHE et une inspection tous les six mois au cours des deux premières années, notamment pour les grands systèmes.

L'objectif de la maintenance est de contrôler la qualité générale du milieu de circulation (notamment les petites fuites telles que celles dues à une fracture par fluage, les fuites catastrophiques n'étant pas détectées) et la concentration en antigel. La dégradation de la concentration en antigel peut être due à l'infiltration d'oxygène, la remontée d'eau dans les systèmes qui fuient ou la dégradation bactériologique. Dans ce dernier cas, il convient de noter que les produits de dégradation peuvent augmenter l'acidité du fluide.

L'inspection de maintenance peut comprendre :

— le contrôle des filtres et le nettoyage ou le remplacement de la toile filtrante ;

— le contrôle et l'enregistrement des paramètres de qualité générale du fluide (pH, conductivité). Ces paramètres sont principalement utilisés pour s'assurer que la qualité du milieu est stable à long terme ;

— le contrôle et l'enregistrement de la concentration en antigel ;

— le contrôle et l'enregistrement de la pression statique du circuit du puits de forage lorsque le système est à l'arrêt ;

— le contrôle de la qualité bactériologique par une analyse en laboratoire.

De plus, la différence de température dans le circuit du puits de forage peut être contrôlée avec une pompe à chaleur en service. Si des manomètres côté flux et reflux sont disponibles, la baisse de pression de l'échangeur géothermique peut être enregistrée et comparée avec les valeurs de conception ou de mise en service.

11 Réhabilitation

Dans le cas de la réhabilitation d'un système GSHP, si la pompe à chaleur est remplacée par une nouvelle pompe plus performante, la demande de chaleur à faible température fournie par le sous-sol augmente.

La conception et la demande de chaleur doivent être réévaluées conformément à un rendement plus élevé de la pompe à chaleur (par exemple, réduction de la demande de chaleur de la construction, amélioration de la demande d'énergie par des mesures d'isolation supplémentaires). Il est nécessaire de reconcevoir tout le système.

12 Déclassement

12.1 Généralités

Le déclassement des échangeurs géothermiques est le processus qui doit être effectué lorsqu'un BHE est, pour quelque raison que ce soit, définitivement mis hors service. L'objectif du déclassement est d'empêcher tout effet nuisible pour l'environnement qui pourrait se produire suite à un arrêt inapproprié du système BHE.

Les potentiels effets nuisibles pour l'environnement sont généralement les mêmes que ceux mentionnés à l'Article 4. Les points pertinents à éviter en ce qui concerne le déclassement sont :

— la contamination du sous-sol ;

— la contamination des eaux de surface ;

— la contamination des eaux souterraines.

Les fuites de fluide caloporteur et les défauts de scellement du BHE sont considérés comme étant les principaux facteurs de risque qui doivent être éliminés pendant le déclassement. Des exigences spécifiques de déclassement peuvent être une condition établie dans le permis de construction du système BHE.

12.2 Fluide caloporteur

Le fluide caloporteur doit être éliminé de la boucle d'échangeur géothermique et des tubes horizontaux raccordés.

Pour éviter l'écrasement des tubes d'échangeur géothermique, le fluide caloporteur doit être remplacé par de l'eau (eau potable).

Les tubes horizontaux peuvent être laissés remplis d'air ou d'eau, ou être entièrement retirés.

12.3 Échangeurs géothermiques

12.3.1 Puits de forage comblés

Il convient d'empêcher l'accès direct à la boucle de BHE. Si la boucle de BHE reste accessible depuis la surface, il convient de la souder.

Au cas où le puits de forage n'aurait pas été correctement scellé, au moins le sommet du puits de forage doit être à nouveau scellé et, selon le cas, d'autres mesures techniques peuvent être nécessaires.

Le soudage au lieu du comblement de la boucle de BHE avec une matière solide telle que le coulis de bentonite permet de préserver l'accès à la boucle de BHE avec un outil pour ensuite faire éclater le tube et injecter un matériau de scellement dans le puits de forage.

12.3.2 Puits de forage remplis d'eau

Il convient d'éliminer le fluide caloporteur et de le remplacer par de l'eau pure. Il convient de fermer la boucle de BHE avec un bouchon ou de la souder. Le puits de forage lui-même est rempli de sable grossier jusqu'au niveau correspondant au sabot de tubage, tandis que le reste du tubage est rempli de billes d'argile gonflante. Pour finir, le trou autour du puits de forage est rempli de sol ordinaire.

12.4 Tubes horizontaux

Les tubes horizontaux peuvent être retirés ou les extrémités ouvertes des tubes doivent être soudées. Les tubes peuvent rester dans le sol.

12.5 Documentation

Il convient de compiler et de distribuer la documentation relative au déclassement au propriétaire du site et aux autorités compétentes.

Il convient que la documentation contienne une description du mode opératoire appliqué et un plan horizontal avec la position du/des puits de forage scellé(s). La position peut être les coordonnées XY dans un système de référence national/régional ou la position par rapport aux frontières du cadastre. La position exacte est importante pour retrouver le BHE.

Annexe A
(informative)

Isolation du tube horizontal

Le Tableau A.1 indique la zone de résistance thermique suggérée autour du tube. La résistance peut être obtenue en ajoutant des matériaux isolants sur les tubes ou en utilisant des tubes préalablement isolés.

Tableau A.1 — Résistance thermique au-dessus du sol en fonction de la température du sol non remanié

$\theta 0$ [°C]	17	15	13	11	9	7
R [m² K/W]	2,5	1,5	1	1,5	2,5	4

Annexe B
(informative)

Exemple de durée de simulation

Les exemples ne sont pas représentatifs de toutes les situations, par exemple : la demande de chaleur réelle et les paramètres thermiques du sol auront une influence sur les résultats. Pour les conceptions énergétiques totalement équilibrées (pas d'extraction de chaleur nette ou pas de rejet de chaleur dans le sol sur une base annuelle), la durée de simulation n'aura aucune influence sur les résultats. Pour les systèmes ayant une demande de chauffage ou de refroidissement dominante, la durée de simulation requise pour atteindre l'état d'équilibre dépendra des paramètres de conception tels que le nombre total d'échangeurs thermiques dans le système, la distance entre les échangeurs thermiques et les paramètres géothermiques, par exemple.

Dans cet exemple, la durée de simulation requise est analysée en calculant une conception de base avec une durée de simulation standard de 25 ans puis en utilisant cette conception (longueur de l'échangeur géothermique fixe) pour calculer l'effet sur la température du fluide caloporteur pour différentes périodes de simulation (5 à 50 ans, par paliers de cinq ans). L'effet thermique est exprimé sous forme de différence entre les calculs ultérieurs (effet thermique sur une durée de simulation de 10 ans = température calculée du fluide sur une durée de simulation de 10 ans - température calculée du fluide sur une durée de simulation de 5 ans).

Un critère peut être adopté pour décider si la durée de simulation est suffisante, par exemple, un effet thermique ajouté inférieur à 0,5 K.

1. Maison individuelle, conception énergétique non équilibrée

Pour une maison individuelle équipée d'un échangeur thermique, la courbe de saturation montre qu'une durée de simulation de 15 à 20 ans serait suffisante. Si la conception énergétique est totalement équilibrée, il n'y a pas de variation de température et même un calcul de conception d'une année serait suffisant.

En général, pour les petits systèmes, le taux de variation de la température a tendance à diminuer rapidement et une période de simulation de 30 ans est suffisante. Voir Figure B.1.

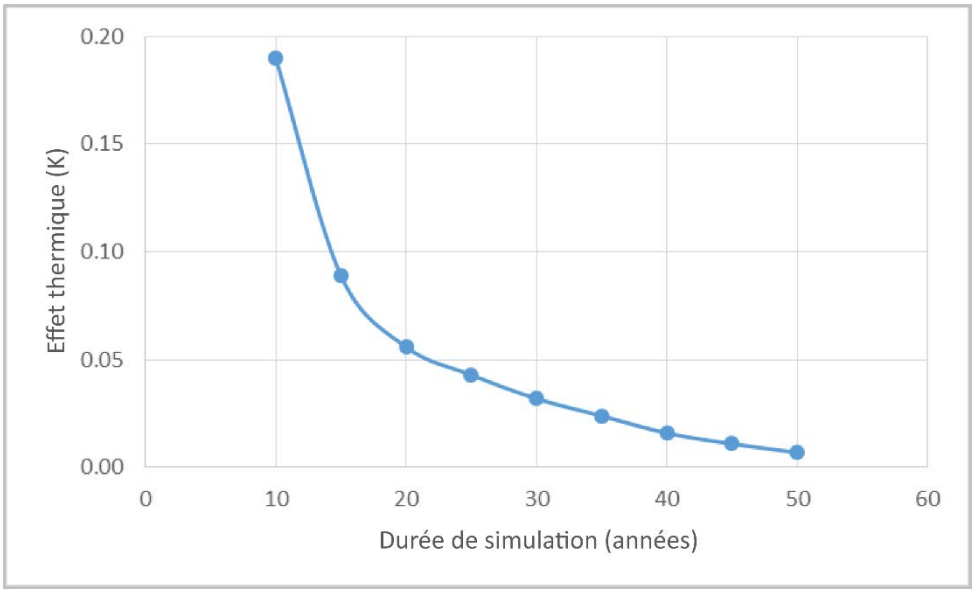


Figure B.1

2. Champ de 30 maisons ayant une conception non équilibrée

Il s'agit d'une simulation d'un champ de 3 × 10 puits de forage (30 maisons) avec une distance entre les puits de forage de 7 m.

Une durée de simulation de 30 ans est requise dans ce cas : la différence de température calculée entre la simulation sur 30 ans et la simulation sur 25 ans est de 0,45 K.

Voir Figure B.2.

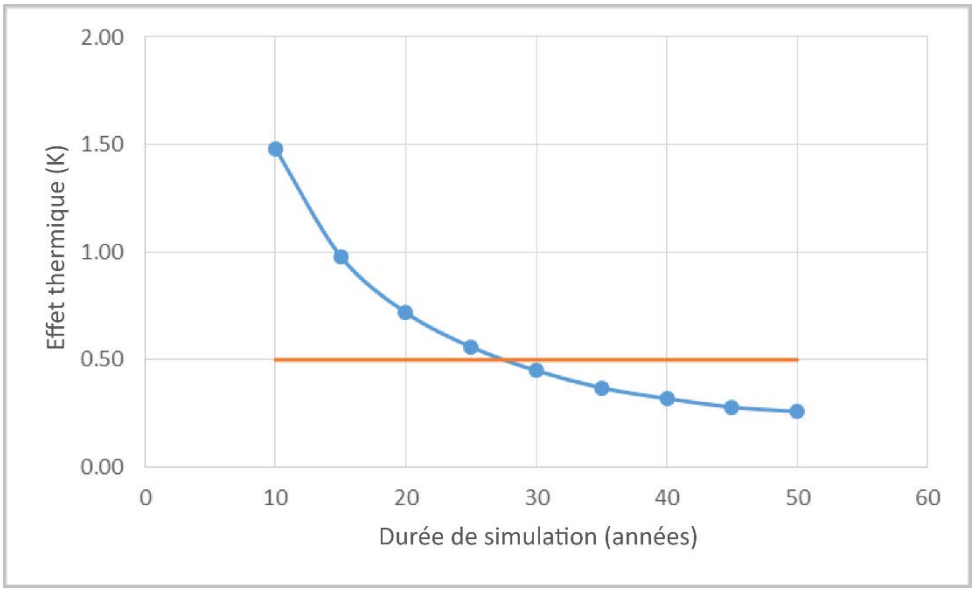


Figure B.2

3. Champ de 400 maisons ayant une conception non équilibrée

Il s'agit d'une simulation d'un champ de 20 × 20 puits de forage (400 maisons) avec une distance entre les puits de forage de 7 m. Dans ce cas, même après une simulation sur 70 ans, la variation de température avec le temps ajouté reste supérieure à 0,5 K. Si la durée de fonctionnement prévue est limitée à 50 ans, alors une simulation sur 50 ans devrait suffire.

Voir Figure B.3.

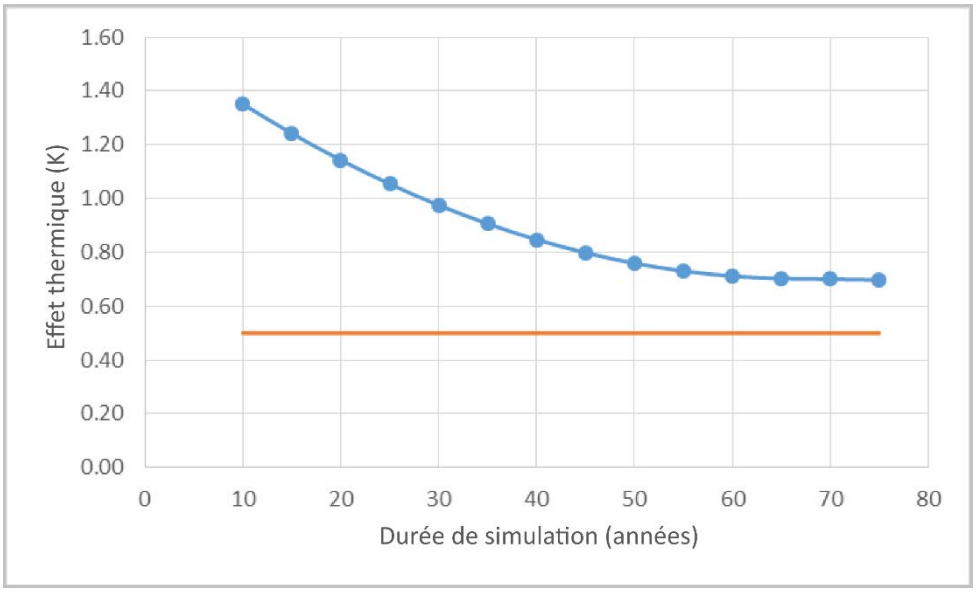


Figure B.3

Annexe C
(informative)

Liste de contrôle pour la mise en service

Le travail dans le local technique comprend normalement le positionnement de tout le kit, la fixation de tous les tubes de raccordement et des raccords électriques (alimentation et réseau) entre le kit et la mise à la terre. Le système est ensuite raccordé à la source d'alimentation externe et au réseau de distribution d'eau, rempli d'eau et soumis à un contrôle d'étanchéité.

Noter que le système BHE est mis en service séparément et avant la mise en service du local technique. La mise en service du système BHE sera effectuée pendant après le forage et les raccordements horizontaux. Elle comprend principalement les contrôles d'étanchéité et de pression, les contrôles d'écoulement et la documentation des positions.

La mise en service technique du système BHE comprend :

1) purge du système ;

2) contrôle d'étanchéité - essais de tous les raccords et composants ;

3) essai de résistance - essai de résistance du matériau en PE ;

4) introduction d'antigel, si nécessaire ;

5) évaluation des propriétés et de la qualité du milieu de circulation.

La mise en service du local technique comprend :

A. phase préalable à la mise en service :

— vérifier que tout l'équipement est installé conformément au diagramme des processus et des instruments et à la conception technique ;

— vérifier que tout l'équipement est correctement installé :

  — raccords électriques ;

  — raccords hydrauliques, réseau hydraulique et directions de l'écoulement ;

  — aspects mécaniques (accessibilité de l'installation) ;

B. vérifications des raccords électriques : vérifier la qualité de l'alimentation et de la terre, la transposition de phases (si nécessaire) et la mise à la terre ;

C. mise en service fonctionnelle de l'installation :

— vérifier toutes les E/S : capteurs correctement raccordés, robinets motorisés correctement raccordés, moteurs de pompe correctement raccordés, commande de la pompe à chaleur correctement raccordée ;

— vérifier le fonctionnement de tous les capteurs (gamme de lecture et étalonnage de base des capteurs) ;

— vérifier le fonctionnement de tous les robinets motorisés (position de réglage et rétrocontrôle corrects) ;

— vérifier le fonctionnement et la mise en service de toutes les pompes ;

— vérifier le fonctionnement et la communication de la pompe à chaleur ;

— contrôler la pression d'eau, la qualité de l'eau et la désaération ;

— contrôler et régler les débits ;

D. mise en service de la pompe à chaleur :

— mettre en marche la pompe à chaleur ; effectuer tous les contrôles fonctionnels (par exemple, verrouillages par défaut, etc.) ;

— mettre en route la pompe à chaleur en mode chauffage, ECS et refroidissement, collecter les données opérationnelles ainsi que l'ensemble des données de référence (pressions, températures et courant) ;

E. mise en service opérationnelle de l'installation :

— vérifier la sélection des modes de fonctionnement et le passage en mode hydraulique et réfrigérant ;

— définir les points de consigne initiaux et les paramètres opérationnels internes ;

— vérifier la communication et l'enregistrement des données ;

F. consignation et rapports :

— consigner les informations de mise en service et tous les paramètres du système ;

— faire constater le fonctionnement du système par un client.

Tout le mode opératoire de mise en service repose sur un ensemble de fiches de mise en service qui doivent être exécutées dans l'ordre.

Annexe D
(informative)

Exemples de conductivité thermique et de capacité thermique volumétrique du sous-sol

Les valeurs peuvent être utilisées dans l'équation indiquée en 7.2.3.

	Type de roche	**Conductivité thermique** λ en W/(m·K)		**Capacité thermique volumétrique** c_v en MJ/(m³·K)	**Masse volumique** ρ dans 10³ kg/m³
			Valeur type		
Meuble	Argile/limon, sec	0,4– 1,0	0,5	1,5– 1,6	1,8– 2,0
	Argile/limon, saturé en eau	1,1– 3,1	1,8	2,0– 2,8	2,0– 2,2
	Sable, sec	0,3– 0,9	0,4	1,3– 1,6	1,8– 2,2
	Sable, humide	1,0– 1,9	1,4	1,6– 2,2	1,9– 2,2
	Sable, saturé en eau	2,0– 3,0	2,4	2,2– 2,8	1,9– 2,3
	Gravier/pierres, secs	0,4– 0,9	0,4	1,3– 1,6	1,8– 2,2
	Gravier/pierres, saturés en eau	1,6– 2,5	1,8	2,2– 2,6	1,9– 2,3
	Till/loam	1,1– 2,9	2,4	1,5– 2,5	1,8– 2,3
	Tourbe, lignite tendre	0,2– 0,7	0,4	0,5– 3,8	0,5– 1,1
Roche sédimentaire	Argilite/siltite	1,1– 3,4	2,2	2,1– 2,4	2,4– 2,6
	Grès	1,9– 4,6	2,8	1,8– 2,6	2,2– 2,7
	Conglomérat/brèche	1,3– 5,1	2,3	1,8– 2,6	2,2– 2,7
	Marne	1,8– 2,9	2,3	2,2– 2,3	2,3– 2,6
	Calcaire	2,0– 3,9	2,7	2,1– 2,4	2,4– 2,7
	Roche dolomitique	3,0– 5,0	3,5	2,1– 2,4	2,4– 2,7
	Roche sulfatée (anhydrite)	1,5– 7,7	4,1	2,0	2,8– 3,0
	Roche sulfatée (gypse)	1,3– 2,8	1,6	2,0	2,2– 2,4
	Roche chlorurée (sel gemme, potasse)	3,6– 6,1	5,4	1,2	2,1– 2,2
	Anthracite	0,3– 0,6	0,4	1,3– 1,8	1,3– 1,6

	Type de roche		Conductivité thermique λ en W/(m·K)		Capacité thermique volumétrique c_v en MJ/(m³·K)	Masse volumique ρ dans 103 kg/m³
				Valeur type		
Roche magmatique	Tuf		1,1	1,1	Non disponible	Non disponible
	Vulcanite, acide à intermédiaire	par exemple rhyolite, trachyte	3,1– 3,4	3,3	2,1	2,6
		par exemple latite, dacite	2,0– 2,9	2,6	2,9	2,9– 3,0
	Vulcanite, alcaline à ultra-alcaline	par exemple andésite, basalte	1,3– 2,3	1,7	2,3– 2,6	2,6– 3,2
	Plutonite, acide à intermédiaire	Granite	2,1– 4,1	3,2	2,1– 3,0	2,4– 3,0
		Syénite	1,7– 3,5	2,6	2,4	2,5– 3,0
	Plutonite, alcaline à ultra-alcaline	Diorite	2,0– 2,9	2,5	2,9	2,9– 3,0
		Gabbro	1,7– 2,9	2,0	2,6	2,8– 3,1
Roche métamorphique	Légèrement métamorphique	Schiste argileux	1,5– 2,6	2,1	2,2– 2,5	2,4– 2,7
		Chert	4,5– 5,0	4,5	2,2	2,5– 2,7
	Modérément à hautement métamorphique	Marbre	2,1– 3,1	2,5	2,0	2,5– 2,8
		Quartzite	5,0– 6,0	5,5	2,1	2,5– 2,7
		Micaschiste	1,5– 3,1	2,2	2,2– 2,4	2,4– 2,7
		Gneiss	1,9– 4,0	2,9	1,8– 2,4	2,4– 2,7
		Amphibolite	2,1– 3,6	2,9	2,0– 2,3	2,6– 2,9
Autres matériaux	Bentonite		0,5– 0,8	0,6	~3,9	
	Béton		0,9– 2,0	1,6	~1,8	~2,0
	Glace (–10 °C)			2,32	1,87	0 919
	Matières synthétiques (HD-PE)			0,42	1,8	0,96
	Air (0 °C à 20 °C)			0,02	0,0012	0,0012
	Acier			60	3.12	7,8
	Eau (+10 °C)			0,59	4,15	0 999

NOTE La masse volumique des roches meubles varie considérablement en fonction de la densité de stratification et de la teneur en eau. Dans le grès, les conglomérés et la brèche, la gamme de conductivités thermiques est très large. Outre le matériau constitutif, sa distribution et sa saturation en eau, les principaux facteurs sont le type liant ou de matrice.

Bibliographie

[1] EN 12828, *Systèmes de chauffage dans les bâtiments — Conception des systèmes de chauffage à eau*

[2] EN 12831-1, *Performance énergétique des bâtiments — Méthode de calcul de la charge thermique nominale — Partie 1 : Charge de chauffage des locaux, module M3-3*

[3] EN 14511-2, *Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur pour le chauffage et le refroidissement des locaux et refroidisseurs industriels avec compresseur entraîné par moteur électrique — Partie 2 : Conditions d'essai*

[4] EN 14511-3, *Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur pour le chauffage et le refroidissement des locaux et refroidisseurs industriels avec compresseur entraîné par moteur électrique — Partie 3 : Méthodes d'essai*

[5] EN ISO 22475-1, *Reconnaissance et essais géotechniques — Méthodes de prélèvement et mesurages piézométriques — Partie 1 : Principes techniques des travaux (ISO 22475-1)*

[6] EN ISO 52016-1, *Performance énergétiques des bâtiments — Besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement, les températures intérieures et les chaleurs sensible et latente — Partie 1 : Méthodes de calcul (ISO 52016-1)*