
Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostrucures thermiques

CFMS/SYNTec INGENIERIE



Illustration : géothermie-professionnelle

Sommaire

Membres du groupe de travail.....	5
Introduction générale.....	6
1 Introduction aux géostructures thermiques	7
1.1 Définitions et périmètre du guide	7
1.2 Organisation générale des projets	8
1.2.1 Principes généraux	9
1.2.2 Contraintes liées à la technique	9
1.2.3 Retour d'expérience et optimisation des bases de données	10
1.3 Démarche générale	11
2 Données d'entrées et caractérisation du terrain	12
2.1 Notion de potentiel géothermique	12
2.1.1 Facteurs de faisabilité technique vis-à-vis du terrain.....	15
2.1.1.1 Caractéristiques thermiques	15
2.1.1.2 Caractéristiques hydrodynamiques (vitesse d'écoulement).....	17
2.1.1.3 Effet barrage de l'ouvrage projeté	20
2.1.1.4 Interactions avec le terrain, la nappe et les avoisinants	22
2.1.2 Etude préalable-préliminaire : espace cartographique du BRGM	24
2.2 Méthodes et outils de conception	25
2.3 Points sensibles pour le suivi d'un dispositif de géostructures thermiques	27
2.4 Retour d'expérience sur des opérations existantes.....	28
2.5 Contexte réglementaire : état des lieux et perspectives	28
3 Dimensionnement géotechnique et aspects structurels	30
3.1 Problématiques mécaniques.....	30
3.2 Variation des propriétés mécaniques des sols.....	31
3.3 Les pieux énergétiques.....	31
3.3.1 Enjeux associés aux pieux énergétiques	31
3.3.2 Comportement des pieux géothermiques	31
3.3.2.1 Barre totalement libre.....	32
3.3.2.2 Barre bloquée à ses extrémités.....	32
3.3.2.3 Etudes expérimentales disponibles.....	33
3.3.3 Méthodes d'analyse	33
3.3.3.1 Méthode des courbes de transfert	34

3.3.3.2	Méthodes numériques	35
3.3.3.3	Paramètres de dimensionnement.....	36
3.3.4	Modélisation de la structure portée	37
3.3.5	Principe de justification.....	37
3.4	Ecrans énergétiques	39
3.4.1	Préambule	39
3.4.2	Typologie des écrans énergétiques et spécificités.....	39
3.4.2.1	Typologie	39
3.4.2.2	Spécificités.....	40
3.4.3	Problématique posée par le fonctionnement géothermique	40
3.4.3.1	Comportement vertical	40
3.4.3.2	Comportement horizontal.....	41
3.4.4	Méthodes d'analyses.....	42
3.4.5	Modélisation de l'écran.....	43
3.4.6	Principe de justification.....	44
3.5	Autres géostructures thermiques	44
4	Conditions de réalisation et de mise en œuvre	45
4.1	Implantation des géostructures thermiques.....	45
4.1.1	Pieux, barrettes et micropieux.....	45
4.1.2	Parois moulées	45
4.1.3	Radiers et fondations superficielles	45
4.1.4	Autres ouvrages géotechniques.....	46
4.2	Fixation et positionnement des tubes.....	46
4.2.1	Pieux géothermiques.....	46
4.2.1.1	Pieux géothermiques coulés en place	46
4.2.1.1.1	Nombre de tubes et de boucles	46
4.2.1.1.2	Dispositions relatives aux cages d'armatures	47
4.2.1.1.3	Fixation des tubes.....	48
4.2.1.2	Pieux énergétiques préfabriqués ou métalliques	49
4.2.2	Parois moulées	49
4.2.3	Pieux de soutènement	49
4.2.4	Micropieux.....	50
4.2.5	Radiers et semelles superficielles.....	50
4.3	Mise en œuvre	50

4.3.1	Pieux énergétiques	50
4.3.1.1	Cage d'armatures mise en place après bétonnage	50
4.3.1.2	Pieux coulés en place après la pose de la cage d'armatures	50
4.3.2	Parois moulées	50
4.3.3	Pieux de soutènement	51
4.3.4	Micropieux.....	51
4.3.5	Radiers et fondations superficielles	51
4.4	Recépage des géostructures thermiques.....	51
4.5	Ouvrages en tête de la structure géothermique.....	51
4.6	Connexion horizontale jusqu'au collecteur principal.....	51
4.7	Suivi de pose des tubes et reprise des tubes défectueux	52
4.7.1	Etapes du suivi.....	52
4.7.2	Reprises en cas de tubes défectueux	54
4.7.3	Dispositions relatives à la conception	54
5	Aspects contractuels, assurances et responsabilités	55
5.1	Introduction.....	55
5.2	Principes de couverture	56
5.3	Approches contractuelles.....	57
	Bibliographie	59
	Index des normes citées dans le document	62
	Symboles et unités	64
	Abréviations	65
	Glossaire	66
	ANNEXE A : Fiche de déclaration type.....	69
	ANNEXE B : Détermination de la conductivité thermique des sols.....	75
	ANNEXE C : Exemple de réalisation : Aéroport de Zürich	77
	ANNEXE D : Combinaisons d'action.....	83
	ANNEXE E : Exemple de justification de pieux énergétiques	85
	ANNEXE F : Equipements de base des pieux et des parois moulées énergétiques	117

Membres du groupe de travail

Animation du groupe de travail : Éric ANTOINET

- Animation sous-groupe « Principes de fonctionnement, caractérisation du milieu hôte » :
Lionel DEMONGODIN
- Animation sous-groupe : « Dimensionnements géotechniques et aspects structurels » ;
Julien HABERT
- Animation sous-groupe : « Conditions d'exécution et de mise en œuvre » ;
Nathalie POZZI
- Animation sous-groupe : « Aspects contractuels, assurances et responsabilités »
Laurent PIERSON D'AUTREY

Secrétariat : M Yvon DELERABLEE

Mr	Eric ANTOINET	Antea Group
Mr	Jean-Baptiste BERNARD	Ecome
Mr	Patrick BERTHELOT	Bureau Veritas
Mr	Cyril BORELY	Terrasol
Mr	Stéphane BRULE	Ménard
Mr	Luis CARPINTEIRO	Socotec
Mr	Anthony COSSON	Systra
Mme	Elodie DARMON	Dacquin
Mr	Yvon DELERABLEE	Antea Group/IFSTTAR
Mr	Lionel DEMONGODIN	Egis
Mr	Nicolas FRECHIN	Antea Group
Mr	Jean-Robert GAUTHEY	Spie Fondations
Mr	Julien HABERT	Cerema
Mr	Pierre-Jean HOUSSE	PINTO/Botte Fondations
Mr	Philippe JANDIN	Cerema
Mr	Richard MANIRAKIZA	PINTO
Mr	Dominique NIBEL	Botte Fondations
Mr	Umur OKYAY	Terrasol
Mr	Laurent PIERSON D'AUTREY	Axa Corporate Solutions
Mme	Nathalie POZZI	Demathieu-Bard
Mr	Léo QUIRIN	Keller
Mr	Philippe REIFFSTECK	IFSTTAR
Mr	Nicolas UTTER	Soletanche Bachy
Mme	Roxana VASILESCU	PINTO
Mr	Jean-Paul VOLCKE	Franki Fondation

La relecture du document a été assurée par : Jean-Christophe Bocquet (ERG), Sébastien Burlon (IFSTTAR), Bruno Demay (CFMS), Fabrice Emeriault (CFMS), Hassan Farhat (Arcadis), Jean-Baptiste Gress (Hydrogéotechnique) et Moulay Zerhouni (Fondasol).

Introduction générale

Ces recommandations présentent des références théoriques et des cas pratiques pour la conception, la réalisation et la mise en œuvre des géostructures thermiques. Elles ont l'ambition d'être un guide pratique et accessible au plus grand nombre.

Le premier chapitre concerne le principe de fonctionnement des géostructures thermiques et présente les différentes données d'entrées nécessaires à leur dimensionnement thermique et mécanique, ainsi que la caractérisation du milieu hôte.

Le deuxième chapitre se concentre sur les effets des variations de température dans les structures, puis, détaille leur dimensionnement géotechnique et les justifications normatives à mener.

Le troisième chapitre, quant à lui, présente les conditions de réalisation et de mise en œuvre des différents types de géostructures thermiques habituellement rencontrées¹.

Enfin, le quatrième chapitre discute des aspects législatifs et assurantiels concernant l'utilisation de la ressource thermique au moyen des géostructures.

Des annexes complètent le texte. Elles comprennent une fiche de déclaration d'opération de géostructures thermiques type (Annexe A), le détail de méthodes d'estimation et de calcul des propriétés thermiques des terrains (Annexe B), un retour d'expérience sur une opération de géostructures thermiques (Annexe C), un exemple du fonctionnement des combinaisons d'actions dans la cadre des justifications géotechniques (Annexe D), un exemple de calcul et de justification de géostructures thermiques (Annexe E) et, enfin, quelques photos de l'équipement de base d'une géostructure thermique (Annexe F).

Ce document est à destination de tous les acteurs publics et privés : Maîtres d'Ouvrages, Maîtres d'Œuvres, bureaux d'études, entreprises de travaux, laboratoires, etc. Il a été élaboré dans le cadre d'un groupe de travail à l'initiative du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS) et du bureau géotechnique de SYNTEC-INGENIERIE.

¹ Dans le cas de réglementations spécifiques pour le dimensionnement des ouvrages (ex : zone sismique), les dispositions constructives recommandées dans ce document s'ajoutent aux normes spécifiques (Eurocode 8 dans l'exemple).

1 Introduction aux géostructures thermiques

1.1 Définitions et périmètre du guide

Développées au début des années 1980 en Autriche (Brandl H., 2006), les géostructures thermiques ont d'abord pris la forme de radiers et de pieux. En plus d'être utilisées classiquement comme des éléments de fondation supportant des bâtiments, elles permettent des échanges de chaleur avec le terrain dans lequel elles sont réalisées.

Les termes « fondation thermoactive » ou « géostructure énergétique », que l'on peut rencontrer dans la littérature, désignent les mêmes structures. Les ouvrages géotechniques provisoires tels que les pieux supportant une grue peuvent être également concernés, sous réserve qu'ils puissent être pérennisés. Les géostructures thermiques ont fait l'objet d'une définition dans le décret 2015-15 du 8 Janvier 2015 : « *Les géostructures thermiques sont des éléments de structure enterrés d'un bâtiment, d'un ouvrage ou d'un équipement, équipés de tubes échangeurs de chaleur dès leur construction. La circulation d'un fluide caloporteur dans les tubes permet l'échange de l'énergie thermique avec le terrain, dans le but de chauffer ou de rafraîchir un bâtiment, un ouvrage ou un équipement ou d'y produire l'eau chaude sanitaire* ».

Les échangeurs thermiques sont constitués de tubes en polyéthylène de diamètre compris entre 25 et 32 mm. Le fluide caloporteur est généralement de l'eau glycolée, le glycol jouant le rôle d'antigel. Des additifs tels que le CO₂ peuvent être également utilisés pour améliorer les caractéristiques thermiques du fluide.

Les géostructures thermiques appartiennent à la filière de la géothermie de très basse température, dans la mesure où le terrain est sollicité dans une gamme de températures généralement comprises entre 1 et 35 °C.

Contrairement à la géothermie sur nappe où le fluide caloporteur circule en circuit ouvert avec un aquifère, les géostructures thermiques fonctionnent en circuit fermé, autrement dit sans échange, autre que thermique, avec le milieu encaissant. Outre les aspects techniques, cette distinction a une incidence significative au plan de la réglementation et plus particulièrement au sens du décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015. Ce point est abordé plus en détail au paragraphe 2.5.

Comme l'illustre la Figure 1, les géostructures thermiques peuvent concerner des fondations superficielles ou profondes (pieux, barrettes, radiers, etc.), des écrans de soutènement (parois moulées, etc.) ou encore des tunnels. Selon l'emplacement des tubes échangeurs de chaleur, différents cas de fonctionnement sont possibles (par exemple, pour un tunnel, dans le radier ou dans les piédroits). Classiquement, on distingue les géostructures verticales telles que les pieux et les parois moulées et les géostructures horizontales telles que les radiers et les tunnels. Des solutions mixtes associant des géostructures verticales et horizontales sont, bien entendu, possibles.

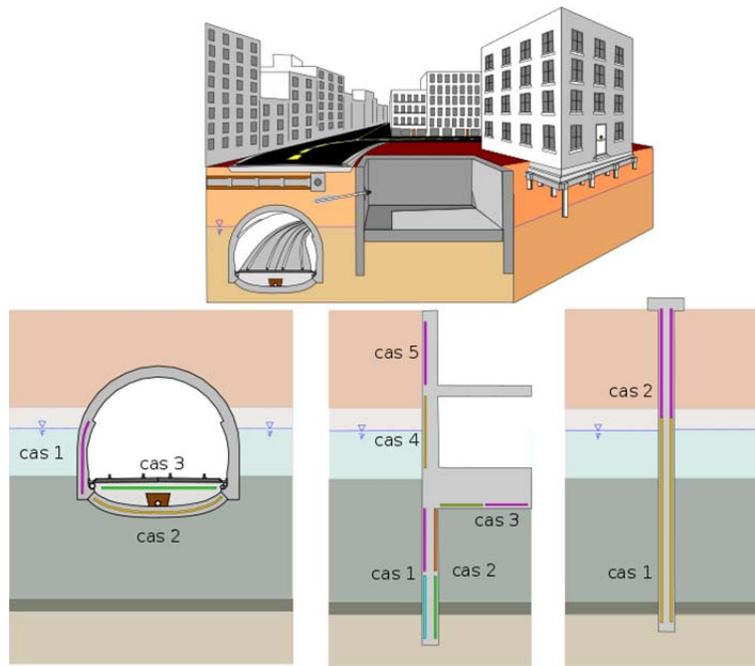


Figure 1 : Exemples de géostructures thermiques et de cas de fonctionnement considérés dans ces recommandations (Reiffsteck P., 2015)

A ce jour, les principales opérations réalisées en France concernent des pieux, des radiers et plus récemment des parois moulées (stations de métro). Aucun cas de tunnel urbain n'est actuellement recensé sur le territoire. L'exemple du tunnel du métro U2 de Vienne (Autriche) est un des seuls cas connus à l'international.

Les tunnels urbains sont des ouvrages très particuliers notamment par leur géométrie, leur méthode de construction, les techniques d'installation des tubes échangeurs et la relative rareté des projets et des maîtres d'ouvrage. Ils ne sont pas traités dans le cadre de ce guide mais pourront faire l'objet d'une mise à jour ultérieure. Leur principal intérêt tient à l'importance des surfaces d'échange avec le sol et donc à leur fort potentiel géothermique. Cependant, la distribution d'énergie en surface et l'identification des besoins restent des sujets complexes.

1.2 Organisation générale des projets

L'objet est de lister autant que faire se peut les particularités des géostructures thermiques dont il convient de tenir compte.

Il n'est pas question de définir ici les rôles et les responsabilités respectives du Maître d'Ouvrage, de l'Assistant Maître d'Ouvrage, du Maître d'Œuvre ou de tout autre acteur permettant le bon déroulement d'un projet : c'est au Maître d'Ouvrage de les définir et de contractualiser ces missions en conséquence.

NB : le Maître d'Ouvrage peut choisir d'autres montages contractuels (par exemple PPP ou équivalent, entreprise générale, ensemblier, etc.) qui renvoient cette obligation à d'autres entités pour certaines définitions de mission.

Le terme « Maître d'Ouvrage ou son mandataire » sera utilisé dans la suite pour désigner le ou les acteurs en charge de la mise en place et du suivi de l'organisation.

1.2.1 Principes généraux

Les géostructures thermiques doivent être prises en compte à tous les stades d'une opération : conception, exécution et suivi.

A ce titre, l'enchaînement proposé pour les missions géotechniques par la norme NF P 94 500, pour les aspects relatifs aux données de nature géotechnique, présente un cadre que nous recommandons pour l'utilisation de géostructures thermiques dans une opération.

La conception des géostructures thermiques interfère spécialement avec les domaines du chauffage et de la climatisation (rendement énergétique, besoins en chaleur, combinaison de plusieurs systèmes complémentaires), de la résistance des structures et de la géotechnique (ajout de charges spécifiques, questions de déformations différentielles, interaction avec l'ouvrage géotechnique proprement dit, charges cycliques, mouvements associés, etc.). Le contexte est tel que l'ouvrage géotechnique devient inaccessible, et donc non modifiable, une fois en place.

Le Maître d'Ouvrage ou son mandataire doit donc instaurer à tous les stades du projet un dialogue entre les spécialistes de ces domaines et mettre en place une coordination : le BET thermique avec l'ingénieur structure et le géotechnicien, l'entreprise en charge de l'équipement géothermique avec celui en charge de l'équipement du bâtiment et avec celui en charge des fondations et/ou du gros œuvre, le « réceptionneur » du réseau géothermique et le « superviseur » structurel et/ou géotechnique.

1.2.2 Contraintes liées à la technique

L'optimisation en termes de résistance des ouvrages géotechniques peut être contraire à l'efficacité thermique du procédé : le Maître d'Ouvrage ou son mandataire doit fixer les conditions qui seront formalisées dans le volet contractuel. Il est recommandé de dire, par exemple, quelle est la latitude sur la profondeur d'équipement nécessaire.

Il ne faut jamais oublier qu'un ouvrage géotechnique peut rarement être modifié après sa réalisation et que les aléas sont nombreux dans le sol : la faisabilité n'est pas nécessairement acquise. Ce point doit être pris en compte dès la conception sous forme d'une certaine redondance des équipements, permettant d'obtenir un fonctionnement global satisfaisant.

Cette redondance sera, en l'état des expériences actuelles, une exigence des assureurs qui souhaiteront limiter un risque de dysfonctionnement de l'ouvrage commandé par le Maître d'Ouvrage. En effet, ces derniers seront enclins à déclarer des sinistres pour « impropreté à destination » qui imposeront des travaux de grande ampleur pour compenser la nature des ouvrages géothermiques difficilement, voire non modifiables. Le risque porte sur un défaut de fonctionnement mais également sur un rendement en deçà des prévisions qui pourrait s'avérer inconfortable pour les utilisateurs.

Enfin, la connaissance du comportement thermique (au même titre que mécanique) du sol est fortement liée au nombre de données disponibles. Un projet sera d'autant mieux dimensionné que la quantité et la qualité des données seront en adéquation. Il est de bonne pratique de retenir des valeurs caractéristiques « sécuritaires » (fonctions de cette quantité de données) vis-à-vis des propriétés du sol, mais il convient également de prendre du recul sur la couverture du besoin vis-à-vis de la ressource thermique théorique.

NB : c'est-à-dire qu'une opération qui couvrirait à 100% ses besoins énergétiques par une exploitation à 100% de sa ressource géothermique théorique, sans tenir compte des incertitudes techniques sur le rendement à long terme, s'exposerait au risque de ne plus pouvoir couvrir ses besoins énergétiques.

1.2.3 Retour d'expérience et optimisation des bases de données

A ce jour, le retour d'expérience disponible sur le comportement mécanique et thermique des géostructures thermiques en phase exploitation est quasi-inexistant (cf. 2.4). Ces données seraient pourtant très utiles dans le cadre de la diffusion de cette technique, notamment pour améliorer la qualité des modèles prédictifs utilisés pour la conception, ou encore pour identifier et diagnostiquer d'éventuels écarts de fonctionnement ou de rendement.

Ainsi, il convient d'encourager l'acquisition et la mise à disposition de mesures de certaines variables comme la déformation, la température et la sollicitation thermique du système. La déformation concerne la géostructure thermique à proprement parler (élément de fondation en béton équipée de tubes géothermiques). Quant à elle, la température concerne la géostructure thermique à proprement parler mais également le terrain en périphérie proche (0 – 20 m). En effet, le rendement de l'installation est étroitement lié à la capacité du terrain à dissiper l'anomalie provoquée par la sollicitation thermique du système.

Par conséquent, la Pompe à Chaleur (PAC) doit également faire l'objet d'un suivi énergétique à travers la mesure de la pression, du débit et de la température du fluide, mais aussi de sa consommation électrique.

Plusieurs techniques existent (jauges de déformation, sondes Pt100, cordes vibrantes, fibres optiques, etc.). Cette instrumentation dédiée est à étudier le plus en amont possible du projet de géostructure thermique et, le cas échéant, conjointement à l'instrumentation mise en œuvre pour le suivi de l'ouvrage en phase travaux. Il faut garder à l'esprit qu'elle doit être conçue pour le long terme (au minimum 20 ans).

Les techniques robustes et peu intrusives sont à privilégier. La réflexion doit également porter sur la position, la densité et la fréquence des mesures en fonction des caractéristiques du projet (sens et vitesse de l'écoulement, puissance thermique totale installée, formation géologique, etc.).

L'idée est de pouvoir corréler, d'une part, le comportement mécanique à la sollicitation thermique, d'autre part, le rendement et la performance globale du dispositif au comportement thermique du système sol-structure.

Une fiche type de déclaration est disponible en Annexe A.

Une synthèse annuelle est recommandée. Celles-ci pourront être mises à disposition de la communauté scientifique via l'adresse geostructure.thermique@ifsttar.fr.

1.3 Démarche générale

Par nature, les géostructures thermiques sont habituellement des opérations d'opportunité visant à tirer parti d'un projet de construction en interaction avec le terrain. Pour des raisons économiques, elles ne doivent impacter, orienter ou contraindre le dimensionnement de l'ouvrage que de façon marginale.

Une opération de géostructure thermique doit être envisagée le plus en amont possible du projet, autrement dit dès le stade des études préliminaires, et suivre le déroulement logique de la vie du projet en s'intégrant aux phases de conception et d'exécution. Elle s'inscrit typiquement dans le cadre d'une démarche à la fois économique (en tirant partie d'une contrainte constructive par la production d'énergie) et d'écoconception par l'exploitation d'une source d'énergie renouvelable (la géothermie).

Une opération de géostructure thermique suppose que le maître d'ouvrage définisse une politique énergétique qui, selon la nature et l'importance du projet, peut-être de répondre à tout ou partie du besoin énergétique propre de l'ouvrage projeté, voire d'être excédentaire pour la fourniture d'énergie des bâtiments voisins existants ou projetés, ou même d'être totalement dédiée à la mise à disposition d'énergie à des tiers. L'objectif des études techniques est alors de caractériser le potentiel géothermique du terrain et d'évaluer la puissance thermique mobilisable compte-tenu des dimensions de l'ouvrage et du rendement prévisionnel des géostructures thermiques.

Il importe de préciser ici que pour garantir une performance durable, ce type d'installation doit être exploité en recherchant un certain équilibre entre la production de chaud et de froid de façon à éviter une dérive thermique du milieu qui altérerait à plus ou moins long terme le rendement du système et qui aurait des conséquences négatives d'un point de vue écologique et environnemental.

2 Données d'entrées et caractérisation du terrain

Ce chapitre définit les données d'entrées nécessaires pour le dimensionnement thermique des géostructures thermiques et l'analyse de la ressource thermique du terrain.

2.1 Notion de potentiel géothermique

Le potentiel géothermique d'un ouvrage est la quantité d'énergie mobilisable dans le terrain sans modification durable de sa température (la ressource énergétique).

L'objectif de l'étude préliminaire est d'identifier et de valider le potentiel du terrain (zone d'influence géothermique²), afin de statuer sur les possibilités de recourir à une solution géothermique pour satisfaire tout ou partie des besoins énergétiques des ouvrages projetés.

On rappelle qu'il est important de se positionner le plus en amont possible dans le projet énergétique pour permettre l'intégration des contraintes et adaptations qu'il implique dans le programme de l'ouvrage.

De manière générale, au stade de l'étude préliminaire, peu, voire aucune information précise relative aux besoins énergétiques du projet n'est disponible pour la Maîtrise d'Œuvre. La localisation et le mode de fondation ne sont pas encore figés. Les campagnes de reconnaissance et, a fortiori, les éventuels essais spécifiques (Test de Réponse Thermique) ne sont pas encore réalisés.

Les aspects suivants doivent cependant être étudiés (Brandl H., 2006) :

- Les propriétés et potentiel thermique du terrain au droit du projet et compte tenu des avoisinants ;
- Les contraintes techniques afférentes au projet ;
- L'enveloppe financière prévisionnelle de la boucle primaire ;
- Le planning prévisionnel du projet géothermique.

Cette démarche d'évaluation du potentiel géothermique d'un site est résumée, pour le cas des pieux, sur l'organigramme de la Figure 2. Il fait, en particulier, ressortir les deux principaux paramètres qui conditionnent la puissance énergétique exploitable : la conductivité thermique des terrains et la présence d'un écoulement souterrain. Ces deux grandeurs renvoient aux deux mécanismes physiques qui gouvernent les transferts de chaleur en milieux poreux :

- la conduction, liée à l'existence d'un gradient de température ;
- l'advection (ou convection), liée à la présence d'un écoulement souterrain, autrement dit d'une nappe.

² Par similitude avec la norme NF P94-500, c'est dans cette zone qu'il y a interaction entre le projet, le terrain et l'environnement. Son extension doit faire l'objet d'une estimation, à partir des données recueillies sur la nature de l'ouvrage à réaliser et le contexte géotechnique/hydrogéologique du site.

L'état thermique initial du milieu est un paramètre à prendre en compte. En condition normale et jusqu'à une profondeur de l'ordre de 100 m, la température du terrain correspond approximativement à la moyenne annuelle des températures de l'air, soit 12 à 18 °C en France métropolitaine. Au-delà de cette profondeur, les effets du gradient géothermique commencent à se ressentir à raison d'environ 30 °C/km (sauf anomalie thermique notable et pour une géologie semblable à la France métropolitaine). En milieu urbain, l'état thermique naturel peut être localement perturbé par une installation géothermique voisine ou par la présence de réseaux thermiquement actifs (réseau EU, de chaleur, etc.).

De manière générale, le contexte sera d'autant plus favorable que la conductivité thermique sera forte, que la vitesse d'écoulement de la nappe sera élevée et que l'état thermique du milieu sera proche de l'état naturel, ou, tout au moins, peu influencé par des facteurs anthropiques.

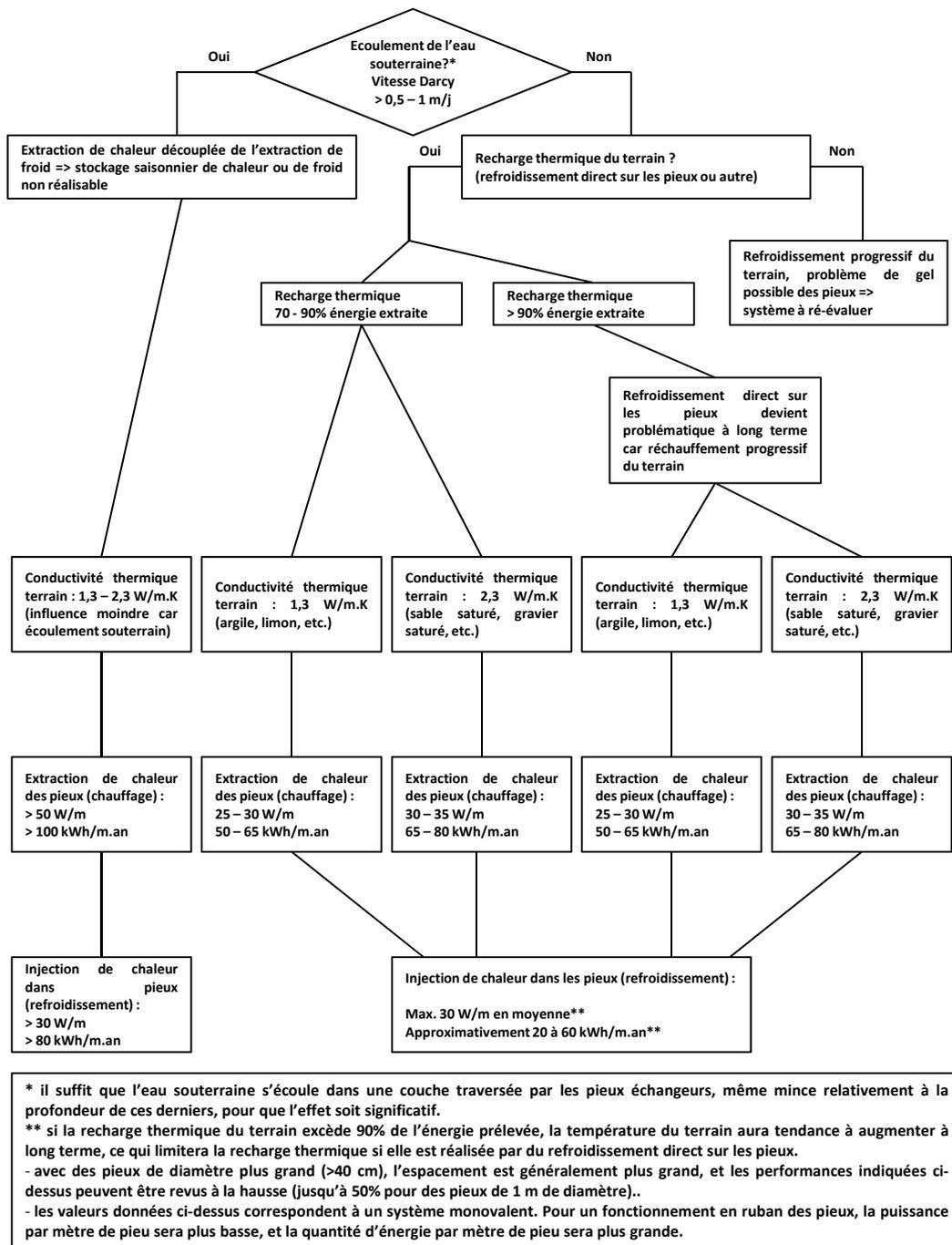


Figure 2 : Organigramme de choix d'équipement de pieux géothermiques en fonction du potentiel géothermique du site (Fromentin A. et al, 1997)

NB : les valeurs indiquées dans cet organigramme sont basées sur des simulations d'un système de référence à la géométrie, à la géologie et aux besoins propres. **Ces valeurs ne peuvent pas être extrapolées directement à un autre projet.**

2.1.1 Facteurs de faisabilité technique vis-à-vis du terrain

2.1.1.1 Caractéristiques thermiques

La conduction thermique exprime le transfert de chaleur qui s'établit spontanément entre deux régions présentant un différentiel de température. Elle est formalisée par la loi de Fourier :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad T}}$$

Où $\vec{\varphi}$ désigne le flux géothermique (W/m^2), $\overrightarrow{\text{grad T}}$ le gradient de température ($^{\circ}\text{C/m}$ ou K/m) et λ la conductivité thermique du milieu (W/m.K).

La conductivité thermique est une grandeur caractéristique du phénomène de conduction en régime stationnaire. Pour les phénomènes transitoires qui intéressent plus particulièrement la géothermie, l'équation de la chaleur fait intervenir un autre paramètre, la diffusivité thermique κ (m^2/s) définie par la relation :

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

Où ρ désigne la masse volumique du milieu (kg/m^3) et c_p la capacité thermique massique (J/kg.K). La capacité thermique volumique c_v ($\text{J/m}^3.\text{K}$) parfois rencontrée dans la littérature correspond au produit ρc_p .

Généralement, la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique massique sont les paramètres demandés par les logiciels de simulation intégrant l'équation de la chaleur.

Le Tableau 1 donne quelques valeurs de conductivité thermique pour les principaux matériaux et composants des sols.

Tableau 1 : Conductivité thermique des principaux matériaux et composants des sols rencontrés en géotechnique (Fromentin A. et al, 1997)

Matériaux	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Air	0,024
Eau	0,60
Glace	2,25
Sol (moyen)	0,25 - 2,5 (~1,7)
Béton	1,3 - 1,7

Pour un sol, et de manière générale pour tout matériau constitué d'un assemblage minéral dont les interstices sont occupés par de l'eau et de l'air en quantité variable, la conductivité thermique dépend essentiellement de trois principaux facteurs : la proportion des constituants minéralogiques, la porosité totale et la teneur en eau. L'agencement géométrique des constituants et, plus accessoirement, la température peuvent également intervenir.

Les paramètres thermiques qui caractérisent les matériaux sont sensibles à la température, mais tous ne varient pas dans le même sens. A titre d'exemple, la conductivité thermique de l'eau croît quand la température augmente alors que celle des minéraux décroît. Cependant, dans la gamme 1-35 $^{\circ}\text{C}$ qui intéresse les géostructures thermiques et de manière plus générale la géothermie dite de très basse température, les paramètres thermiques peuvent être considérés comme invariants.

Dans le Tableau 2 sont reportées les caractéristiques thermiques des minéraux communément rencontrés dans les sols. On constate une forte variabilité entre espèces minérales, notamment entre le quartz et les minéraux argileux. Le contraste est encore plus marqué avec l'eau et surtout l'air, très isolant. Il en résulte qu'un matériau sera d'autant plus conducteur que sa porosité sera faible, qu'il sera proche de la saturation et que sa teneur en quartz sera importante. Les mesures montrent que ces paramètres (composition minéralogique, porosité et saturation en eau) n'agissent pas de manière linéaire sur la conductivité thermique globale du matériau. En dehors de l'air, la diffusivité thermique suit la même tendance que la conductivité thermique.

Tableau 2 : Conductivité thermique des principaux minéraux, de l'eau et de l'air (Brigaud F. & Vasseur G., 1989 ; Vasseur G. et al, 1995 ; S. Goto and O. Matsubayashi, 2009)

Phase	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Diffusivité thermique κ (10^{-6} m ² /s)	Masse volumique ρ (10^3 kg/m ³)	Capacité thermique massique c_p (J/kg.K)
Quartz	7,7	3,92	2,65	740
Calcite	3,59	1,62	2,71	820
Albite	2,20	1,08	2,62	776
Anorthite	1,68	0,82	2,76	745
Orthoclase	2,32	1,28	2,57	707
Muscovite	2,32	1,03	2,831	796
Smectite, illite	1,5 - 1,8	0,8 - 1,1	2,1 - 2,7	780 - 800
Eau	0,6	0,13	1,00	4185
Air (sec)	0,024	19,9	0,0012	1005

Pour un terrain donné, le principal facteur d'influence est la teneur en eau. La relation entre la conductivité et l'humidité du sol est illustrée dans le Tableau 3 et par les courbes (d'assèchement thermique) de la Figure 3.

Il est donc établi qu'un même sol présentera des caractéristiques thermiques bien plus favorables s'il est saturé, autrement dit baigné par une nappe. Pour les études de cas, il conviendra donc de prendre en compte un niveau de nappe correspondant au niveau EB (au sens de la norme NF EN 1990/NA) représentatif du niveau moyen de la nappe.

Tableau 3 : Conductivité thermique des sols en fonction de leur teneur en eau (Fromentin A. et al, 1997)

Type de sol	Conductivité thermique λ (W/m.K)		Capacité thermique volumique c_v (10^6 J/m ³ .K)	
	Sec	Saturé	Sec	Saturé
Argile	0,2 - 0,3	1,1 - 1,6	0,3-0,6	2,1 - 3,2
Limon	0,2 - 0,3	1,2 - 2,5	0,6 - 1,0	2,1 - 2,4
Sable	0,3 - 0,4	1,7 - 3,2	1,0 - 1,3	2,2 - 2,4
Gravier	0,3 - 0,4	1,8 - 3,3	1,2 - 1,6	2,2 - 2,4