

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

CFMS/SYNTec INGENIERIE/SOFFONS-FNTP



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	Dacquín
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), du bureau géotechnique de SYNTEC-INGENIERIE et du SOFFONS/FNTP.

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 géo structures 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.

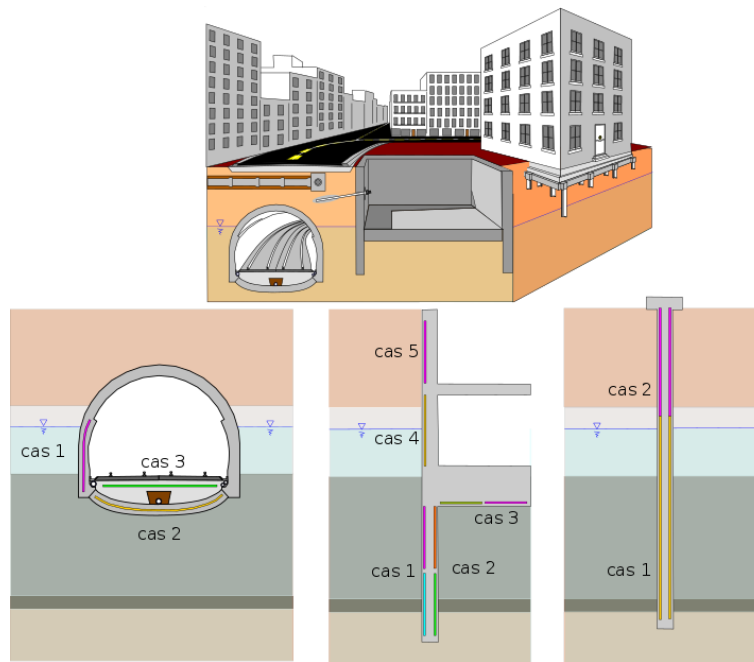


Figure 1 : Exemples de géostructures thermiques et de cas de fonctionnement considérés dans ces recommandations (Reiffsteck P., 2015)

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 échangeur 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 « impropropriété 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 le site du CFMS (www.geotechnique.org).

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.

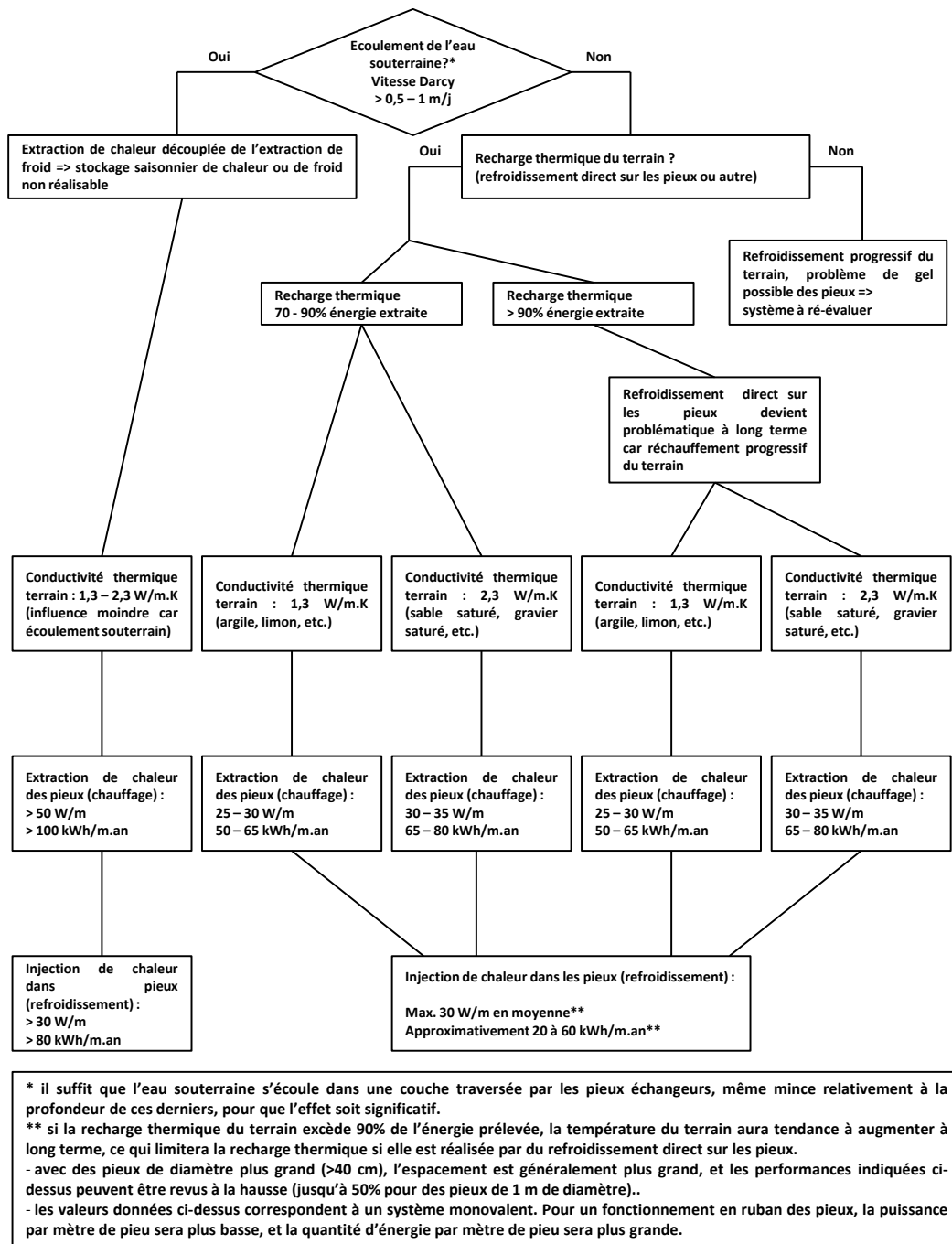


Figure 2 : Organigramme de choix d'équipement de pieux géothermiques en fonction du potentiel géothermique du site (Fromentin A. et al, 1997)

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} m²/s)	Masse volumique ρ (10^3 kg/m³)	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/m³.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

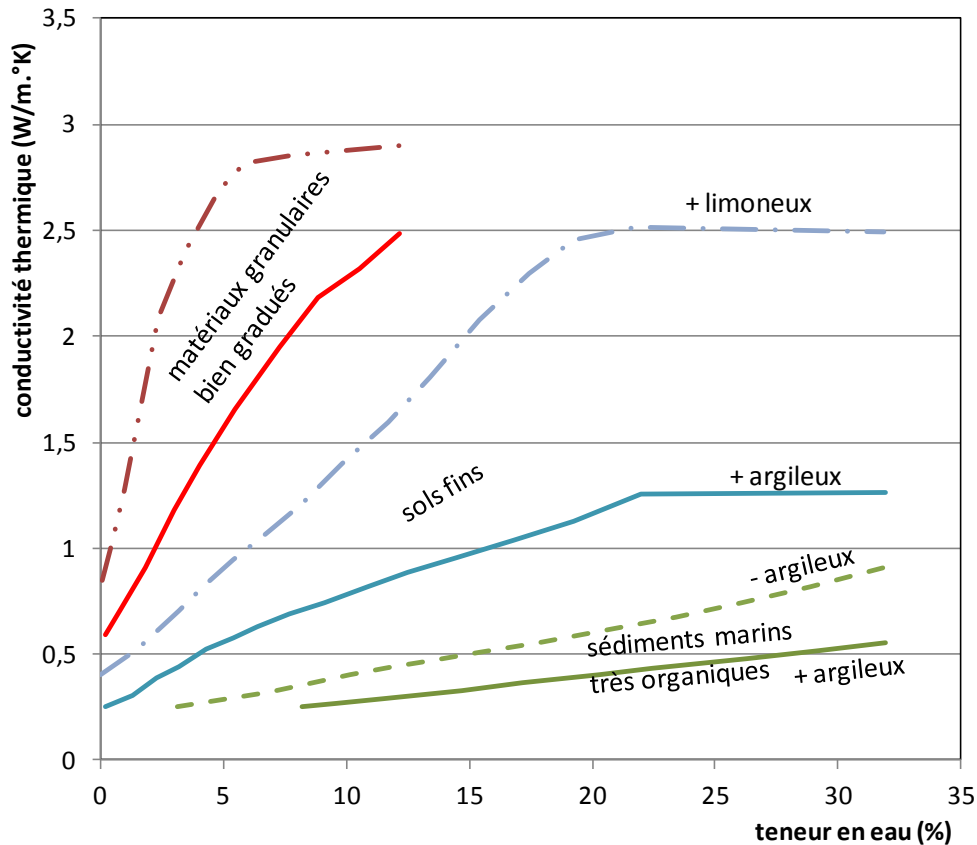


Figure 3 : Courbes de tendance de la relation entre la conductivité thermique et la teneur en eau selon le type de sol (Reiffsteck P., 2015 d'après EPRI 1989)

Selon le stade des études et le niveau de connaissances du milieu en interaction avec l'ouvrage projeté, les caractéristiques thermiques des sols peuvent être progressivement définies par :

- Une approche bibliographique, par exemple en référence à des terrains de nature analogue ;
- Des méthodes empiriques moyennant la détermination de certains paramètres (cf. Annexe B) ;
- Des tests de réponse thermique (TRT) qui permettront de vérifier *in situ* la conductivité thermique du sol (cf. norme pr NF EN ISO 17628).

Des méthodes de mesures en laboratoire sur échantillon existent (aiguille chauffante, barreau chauffant, barre divisée, etc.) mais elles nécessitent des moyens peu courants et sont très peu pratiquées (cf. norme ASTM D5334-14).

2.1.1.2 Caractéristiques hydrodynamiques (vitesse d'écoulement)

La vitesse d'écoulement d'un aquifère est caractérisée par la loi de Darcy (2). Cette dernière relie le flux (Q) traversant une unité de surface (S) d'un aquifère, à la charge piézométrique, par l'intermédiaire d'un coefficient K appelé perméabilité de Darcy (Figure 4).

$$Q = KS \frac{H_1 - H_2}{x_2 - x_1} = -KS \frac{\Delta H}{\Delta x} \quad (2)$$

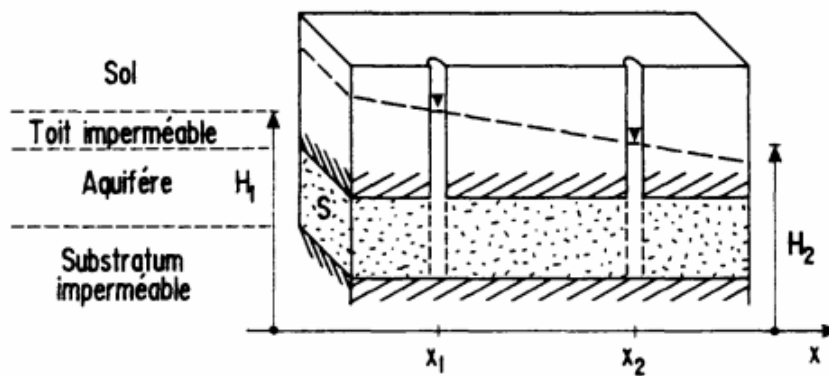


Figure 4 : Définition de la loi de Darcy (rapport BRGM N°86 SGN 125)

La vitesse de Darcy (ou vitesse de filtration) s'exprime ensuite de la manière suivante (3) :

$$V_d = \frac{Q}{S} = -K \frac{dH}{dx} \quad (3)$$

Le domaine d'intérêt des géostructures thermiques correspond à des perméabilités habituellement comprises entre 10^{-2} et 10^{-7} m/s (Tableau 4). Les perméabilités plus faibles impliquent des vitesses d'écoulement très petites et, par conséquent, des échanges thermiques purement conductifs.

Tableau 4 : Exemples de valeurs de coefficient de perméabilité (Principes et méthodes de l'hydrogéologie, d'après G. Castany)

K (m/s)		10⁻¹ 10⁻² 10⁻³ 10⁻⁴ 10⁻⁵ 10⁻⁶ 10⁻⁷ 10⁻⁸ 10⁻⁹ 10⁻¹⁰ 10⁻¹¹										
GRANULOMÉTRIE	Homogène	Gravier pur		Sable pur		Sable très fin		Silt		Argile		
	Variée	Graviers gros et moyen	Gravier et sable		Sable et argile-limons							
DEGRÉS DE PERMÉABILITÉ		TRÈS BONNE		BONNE		MAUVAISE					NULLE	
TYPES DE FORMATION		Perméables				Semi-perméables					Imperm.	

↙ Limites conventionnelles ↘

Selon le contexte, les vitesses d'écoulement peuvent être très variables, de quelques mètres à plusieurs km par an (Tableau 5).

Tableau 5 : Exemples de valeurs de vitesse d'écoulement dans les aquifères (d'après Principes et méthodes de l'hydrogéologie, G. Castany)

Types d'aquifère	Vitesses effectives calculées m/an	Vitesses de déplacement (traceurs) m/an	Temps de séjour an/km
<u>Aquifères profonds</u>			
Sables paléocènes du bassin d'Aquitaine	2 à 3		300 à 500
Sables albiens du bassin de Paris	3	4	250 à 300
Sables du continental intercalaire du Sahara septentrional	2 à 3		300 à 500
Grès de Nubie (Egypte)		15	66
Bassin du Nord de l'Ukraine		33 à 55	30 à 300
Sables du littoral des Pays-Bas	5		250
<u>Aquifères à nappe libre</u>			
Alluvions de la vallée du Rhin à Kiel	1700		0,6
Alluvions de la vallée du Rhin à Bâle		100 à 2000	0,5 à 1
Alluvions de la vallée du Rhône		1800	0,5

Ces valeurs peuvent être mises en relation avec le seuil de 0,5 à 1 m/jour (soit 182 m/an et 365 m/an respectivement) évoqué dans le logigramme de la Figure 2.

Dans le cas d'une nappe en mouvement, les effets thermiques de l'eau sont particulièrement importants. La circulation de l'eau souterraine interviendra significativement sur la température du fluide circulant dans la géostructure. Selon la dimension et l'orientation de l'ouvrage par rapport à la direction d'écoulement de la nappe, celle-ci limitera tout effet de stockage saisonnier et permettra une recharge naturelle saisonnière.

Inversement, pour des couches de sols peu perméables et sensiblement horizontales, comme la nappe souterraine qu'elles contiennent, la vitesse de Darcy ne dépasse pas quelques mètres par an et l'effet de l'écoulement peut être négligé : le transfert de chaleur autour de l'ouvrage souterrain sera essentiellement diffusif, donc le rendement sera moindre, voire quasiment nul.

La Figure 5 montre l'allure d'un panache thermique à proximité d'un champ de sondes verticales (au comportement thermique très comparable à celui de géostructures) qui traverse deux aquifères (perméabilité élevée) séparés par un aquitard (formation semi-perméable). Cette figure permet de mettre en évidence le rôle de l'écoulement dans les échanges thermiques grâce à la déformation du panache représentant le champ de température. Dans la formation aquitard, le panache thermique est peu déformé et, au contraire, dans les formations aquifères, il est déformé dans le sens de l'écoulement.

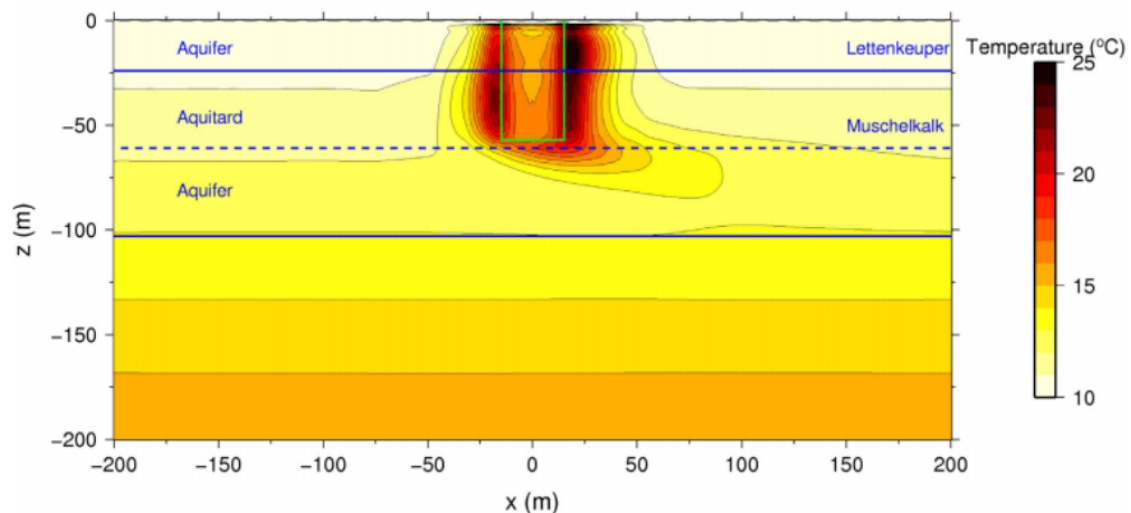


Figure 5 : Vue en coupe de l'écoulement du champ de température à proximité d'un champ de sondes (matérialisé par la ligne verte) en exploitation (rapport BRGM N°59387)

2.1.1.3 Effet barrage de l'ouvrage projeté

Comme nous l'avons vu précédemment, le potentiel géothermique d'un ouvrage est amélioré par l'écoulement d'une nappe qui assure la recharge thermique du sol. Il est néanmoins entendu que les seuils proposés dans la Figure 2 sont indicatifs et que seules des simulations hydrothermiques intégrant les caractéristiques réelles du milieu (conductivité et vitesse d'écoulement de la nappe) et de l'ouvrage (dimensionnel) permettront de fournir des éléments d'analyse et de faisabilité même du projet.

Il est donc recommandé d'engager ces simulations hydrothermiques dès le stade de la faisabilité et de poursuivre en fonction des ajustements du projet et des données complémentaires pour orienter progressivement le dimensionnement. Ces simulations doivent bien entendu prendre en compte les modalités d'exploitation de l'installation géothermique en référence à une chronique annuelle (ou scénario énergétique) des besoins en chaud et froid.

Les écoulements naturels sont peu influencés par des radiers superficiels ou des pieux en interaction avec une nappe et l'analyse n'a pas à intégrer les effets perturbateurs de l'ouvrage. La situation peut être par contre très différente pour une enceinte en parois moulées (ou assimilées), dont la présence peut modifier les écoulements et la distribution du champ de vitesse. L'ancrage dans une formation imperméable amplifie cet effet. Ce phénomène connu sous le terme d'effet barrage se manifeste par un basculement piézométrique avec une remontée du niveau de nappe à l'amont, une baisse à l'aval, ainsi qu'un contournement latéral (Figure 6). Son amplitude et sa portée dépendent de quatre paramètres principaux :

- Structure du sol qui peut être multicouche et présenter des perméabilités variables ;
- Vitesse d'écoulement de la nappe (perméabilité et gradient hydraulique) ;
- Coefficient de coupure (β) défini par le rapport entre la hauteur de nappe recoupée par l'ouvrage et l'épaisseur totale de la nappe ;
- Angle d'incidence (α) correspondant à l'angle formé par la direction d'écoulement et la direction de l'axe principal ou axe d'allongement de l'ouvrage.

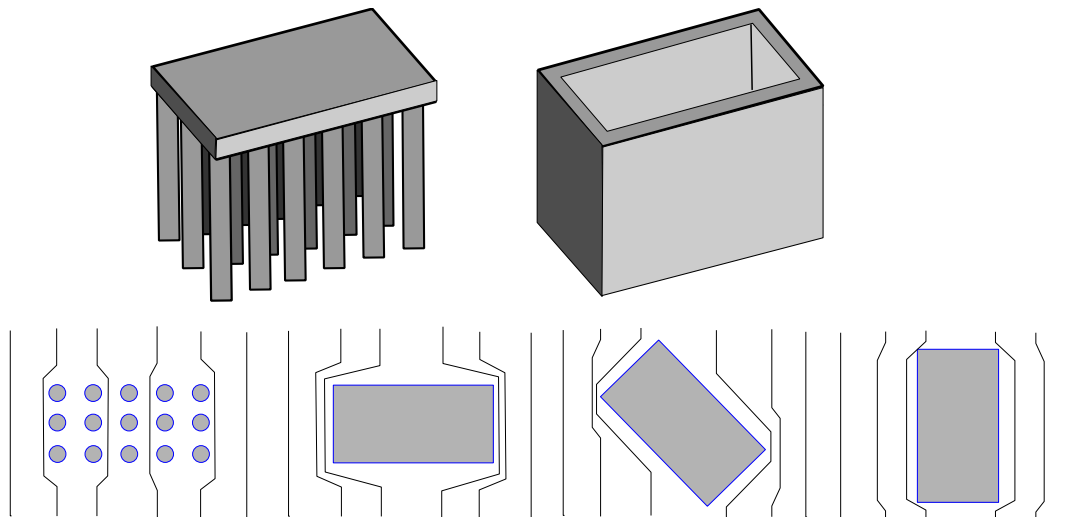


Figure 6 : Principe de l'effet barrage d'un bâtiment en fonction de son système de fondation (Reiffsteck P., 2015)

L'effet barrage est un phénomène complexe que seule une approche par modélisation permet d'aborder de manière globale et précise en tenant compte des conditions internes (structure et propriétés hydrauliques du milieu aquifère) et externes (géométrie de l'ouvrage), qui contrôlent l'écoulement souterrain.

La figure 7 donne un exemple de modification de la surface piézométrique et du champ de vitesse généré par une enceinte en paroi moulée plongée dans un champ d'écoulement homogène. Elle montre notamment une accélération des vitesses sur les parois latérales et un ralentissement sur les parois opposées (amont et aval). Ce comportement laisse entendre que la recharge thermique assurée par l'écoulement de la nappe sera plus importante sur les faces latérales, qui seront donc plus propices pour l'installation des tubes échangeurs ou un meilleur rendement.

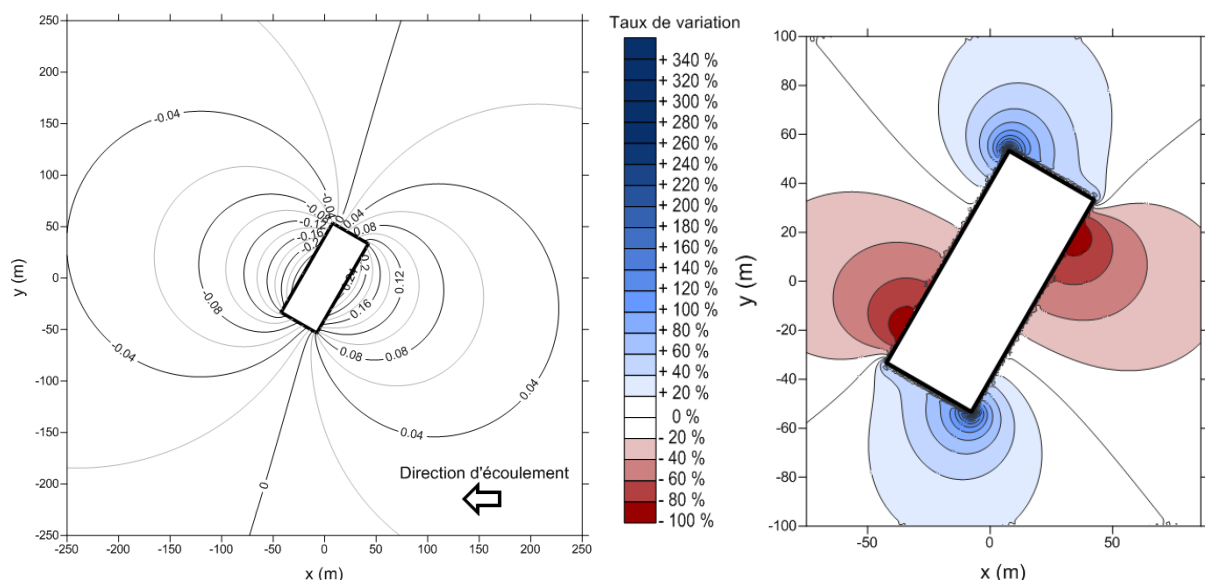


Figure 7 : Exemple de déformation du champ de vitesse au voisinage d'un ouvrage en paroi moulée. Gauche = anomalie piézométrique (cm), droite : variation du module de vitesse de Darcy. Cas d'un ouvrage de dimensions $L = 100$ m x $l = 40$ m, avec $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 1$, $k = 1.10^{-4}$ m/s (homogène et isotrope) et $i = 1\%$ Est-Ouest. (Demongodin L., 2015).

D'autres différences sont également à relever par rapport à des géostructures sur pieux :

- Sous le radier, la vitesse d'écoulement est nulle ou presque (à moins qu'il s'agisse d'un radier drainant, auquel cas la vitesse est conditionnée par le débit de drainage). L'équipement du radier doit donc être dimensionné en sachant que les transferts thermiques avec le sol se feront alors préférentiellement par conduction et non par advection, impliquant des rendements moindres.
- A l'intérieur de la partie aménagée de l'enceinte, autrement dit au-dessus du radier, les échanges thermiques sont nécessairement limités par la conductivité thermique de l'air (isolant) et le maintien de conditions quasi-isothermes.

Dans le cas d'une enceinte, il convient donc de vérifier ces différents points par des études appropriées et de se servir des résultats pour le dimensionnement de l'installation.

2.1.1.4 Interactions avec le terrain, la nappe et les avoisinants

L'exploitation thermique de géostructures va entraîner une modification de la température initiale du milieu. Comme vu précédemment, cet impact est fortement lié à la présence d'une nappe avec un écoulement significatif. La Figure 8 montre la sensibilité du phénomène aux caractéristiques hydrogéologiques du milieu à travers la modélisation d'une sonde géothermique verticale. Dans cet exemple, la perméabilité est croissante du haut vers le bas et le gradient de la gauche vers la droite.

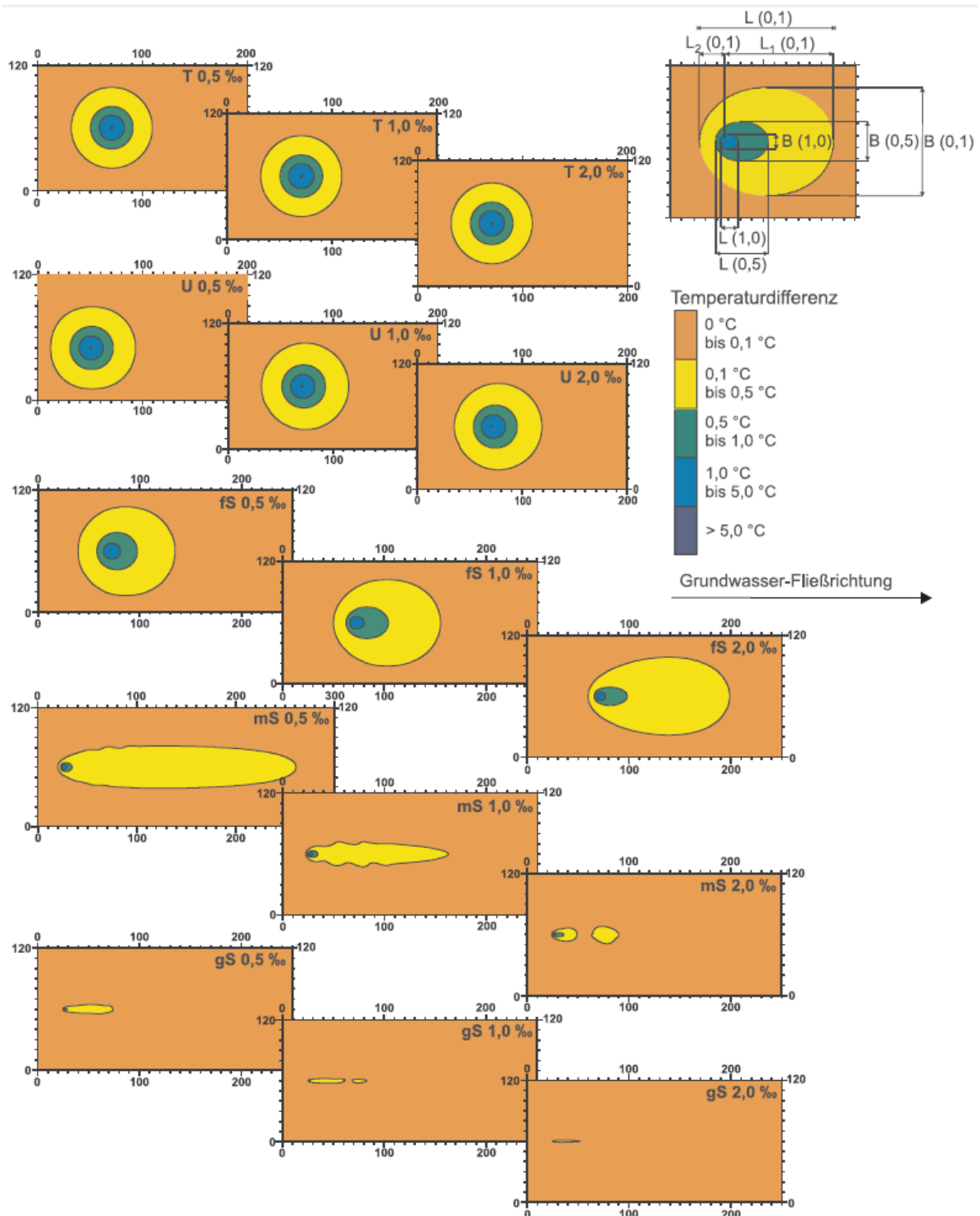


Figure 8 : Champs de température autour d'une sonde géothermique verticale à la fin de la 30^{ème} saison de chauffe pour 15 contextes hydrogéologiques modélisés : 5 perméabilités différentes, et 3 gradients hydrauliques 0.5 %, 1 % et 2 % (Pannike S. cité dans BRGM N°59387, 2012)

Il y apparaît notamment, que lorsque seuls des phénomènes de conduction sont en jeu (6 premières modélisations en haut), l'impact sur le voisinage de la sonde (ou de la géostructure) est très réduit : à une vingtaine de mètres de la sonde, l'impact est inférieur à 1°C. Le panache thermique se propage plus loin en cas d'écoulements de nappe plus rapides. La perturbation thermique reste toutefois limitée en amplitude.

Conformément à l'article 2 du décret N° 78-498, les fondations géothermiques ont été exclues du champ d'application du code minier, du fait du caractère superficiel des ouvrages et de la faible influence thermique de ce type d'ouvrages sur les avoisinants. Cependant, il est souhaitable, au vu de ce qui précède, de faire l'inventaire des projets géothermiques ou des constructions avoisinantes qui pourraient avoir un impact hydrodynamique et thermique significatif sur le futur projet, principalement en cas de présence d'une nappe présentant un écoulement significatif sur le site.

Pour ce qui concerne les projets de géothermie autres que les géostructures thermiques, l'impact des avoisinants actuels et futurs sur les ouvrages envisagés au titre de la géothermie de minime importance, tout comme sur les avoisinants est dorénavant régi par le code minier (depuis la publication du décret 2015-15 pour les équipements de minime importance (puissance < 500 kW et profondeur des captages < 200 m). Les projets antérieurs éventuellement référencés permettront d'obtenir l'information souhaitée.

La complexification éventuelle des modèles intégrant les écoulements d'eau souterrains doit cependant être limitée par l'inconnue que constitue la mise en œuvre future éventuelle d'autres constructions de bâtiments ou d'infrastructures proches (parkings, gares souterraines, tunnel, etc.) pouvant avoir à leur tour un impact sur les écoulements souterrains alimentant le site du futur projet. La prise en compte de l'impact hydrodynamique et thermique sur le système doit ainsi être considérée avec précaution.

2.1.2 Etude préalable-préliminaire : espace cartographique du BRGM

Le site du BRGM geothermie-perspectives.fr donne accès aux cartes de potentiel géothermique des terrains et au zonage réglementaire pour la géothermie de minime importance (GMI) sur échangeurs fermés (et ouverts). La méthodologie et les modalités de révision de ces cartes sont définies par l'Arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance. Un guide d'élaboration de ces cartes est également disponible en ligne.

Bien que le Décret 2015-15 du 8 janvier 2015 exclut explicitement les géostructures thermiques du périmètre de la GMI, cet espace cartographique permet en première approche :

- d'apprécier qualitativement le potentiel géothermique d'un site (fort, moyen, faible) ;
- d'identifier, à travers le zonage réglementaire, d'éventuels facteurs de risque (instabilité, cavité, retrait-gonflement, dissolution du gypse, pollution des eaux, etc.) ;
- d'identifier les opérations géothermiques existantes relevant soit directement du Code minier, soit de la géothermie de minime importance sur échangeurs ouverts ou fermés.

La consultation de cet espace est un préalable recommandé avant toute autre démarche ou investigation technique.

NB : les facteurs de risques ne concernent pas spécifiquement les géostructures thermiques. Leur étude est identique à celle d'un système de fondation non géothermique.

2.2 Méthodes et outils de conception

Il est souhaitable pour les études relatives à l'intégration des systèmes de géostructures thermiques de les intégrer le plus en amont possible dans le processus d'étude, notamment pour identifier les besoins à couvrir et le dispositif de production optimal pour le projet. Jusqu'à présent, la part majoritaire des besoins était rarement assurée et, a fortiori, la globalité des besoins de puissance. Cependant, les performances accrues des enveloppes des bâtiments permettent désormais d'envisager une couverture de la globalité des besoins pour les projets.

La difficulté est que les caractéristiques des besoins et des structures géotechniques ne sont pas nécessairement connues dans les phases amont des projets.

Le tableau ci-dessous (Tableau 6) présente les différentes étapes d'étude, et précise, notamment, les interactions entre études "géothermiques" et "géotechniques".

Tableau 6 : Aspects géothermiques dans l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique ³

Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique classiques	Eléments complémentaires pour la géothermie	Impact conception projet
Avant mission géotechnique	Stratégie énergétique (tout, partie ou plus des besoins du projet) Etude bibliographique générale géologie + hydrogéologie	Pré faisabilité (avis) + définition des éléments complémentaires à obtenir
Mission G1		Informations complémentaires sur caractéristiques du milieu + caractéristiques dimensionnelle des fondations
Mission G2	Si nappe productive attendue étude des caractéristiques de la nappe : estimation du Darcy et impact potentiel sur les performances du système	Faisabilité (avis définitif) + performance attendue en fonction des données disponibles
	TRT si autres données d'entrée du projet figées (besoin thermique + dimensions des fondations). Sinon report en phase EXE.	
Missions G3/G4 (niveau EXE)	TRT une fois données d'entrée du projet figées (besoin thermique + dimensions des fondations).	Dimensionnement définitif
Mission G5		Phase étude remise en cause du projet possible Phase service réévaluation des performances

Il convient de préciser que le niveau d'études doit être adapté aux enjeux. Ainsi, les enjeux sont plus importants s'il est demandé une fourniture de 100% des besoins sans système d'appoint, ou encore si un taux de couverture est à garantir, notamment pour atteindre tel ou tel niveau de performance énergétique.

³ La version 2013 de la norme NF P94 500 n'aborde pas explicitement les propriétés thermiques des sols. Il s'agit donc ici d'une proposition.

De la même manière, les niveaux d'étude doivent être proportionnés à la taille du projet et aux incertitudes résiduelles, sous peine de grever l'intérêt économique de la solution. Ainsi, il est parfois préférable de réaliser un dimensionnement conservateur sur des petits projets, voire des projets importants, afin d'éviter des études inutilement complexes dont le niveau de détail serait sans rapport avec les incertitudes résiduelles.

Ainsi, les effets de l'écoulement souterrain ont un impact positif sur la performance du système en facilitant sa régénération. Si ces effets sont indirectement pris en compte lors du Test de Réponse Thermique (TRT qui combine dans son résultat la conductivité du sol et les effets induits par les écoulements souterrains), ils doivent néanmoins être corrigés par des méthodes et procédures adaptées. Sauf cas très particulier (quasi absence d'écoulement, auquel cas on peut s'interroger sur l'opportunité d'une opération géothermique classique, cf. Figure 2), il est recommandé de recourir à des modélisations thermo-hydrodynamiques couplées, en tenant compte des incertitudes à travers une étude de sensibilité. Il faut bien prendre en compte qu'un écoulement plus important, bien que positif pour un projet, augmente le risque d'influence sur les avoisinants ou provenant de l'un d'eux.

L'évolution ultérieure des caractéristiques du projet et des géostructures est également un élément à prendre en compte. Les éventuelles optimisations lors des études d'exécution peuvent affecter la performance thermique du système. Une approche conservatrice et pragmatique est donc recommandée en phase conception. Une vérification des performances thermiques doit être effectuée lors de la phase d'exécution.

La réponse des systèmes géothermiques à une sollicitation dépend, contrairement à d'autres systèmes, des sollicitations antérieures appliquées. De ce fait, seule une modélisation dynamique permet de déterminer la performance du système avec fiabilité. Lors de la modélisation du comportement du système, on cherchera à établir le comportement du système sur une année, mais également sur des cycles répétés sur plusieurs années. Un horizon minimal de 20 à 25 ans est recommandé. En tout état de cause, jusqu'à ce que la courbe de tendance converge vers un point d'équilibre fiable.

Afin de réaliser la modélisation, les caractéristiques du sol sont nécessaires. Il s'agit notamment de la conductivité thermique, de la température initiale et de la capacité calorifique du terrain. Ces éléments peuvent être dans un premier temps appréhendés à partir des données bibliographiques et des informations fournies dans l'étude géotechnique. Un Test de Réponse Thermique permet de préciser la connaissance des propriétés thermiques du milieu.



Figure 9 : Dispositif de test de réponse thermique (Ecome, 2015)

Les principales étapes d'un test de réponse thermique sont décrites dans la norme pr NF EN ISO 17628.

2.3 Points sensibles pour le suivi d'un dispositif de géostructures thermiques

Il a été constaté sur plusieurs projets de géothermie sur sondes que les sinistres en cas de non performance, sont souvent causés par les liaisons des sondes vers le local technique, plus que par la réalisation des sondes elles-mêmes.

L'attention est attirée sur l'importance du partage et du transfert de la responsabilité lors de la réalisation des géostructures thermiques, ce d'autant que l'ensemble du dispositif n'est plus visible après exécution et que l'unicité de la responsabilité est un élément important.

C'est pourquoi, il est recommandé que la prestation de mise en œuvre soit réalisée en intégrant dans une unicité de prestation la mise en place des systèmes de captage dans les géostructures thermiques, jusqu'au local technique, y compris les raccordements et liaisons horizontales. Le partage entre le lot fondation et le lot CVC de cette responsabilité entraîne très souvent des pathologies et des problèmes de responsabilité. Les contrôles et autocontrôles aux différentes étapes permettront de garantir l'intégrité des réseaux avant l'étape ultérieure, et ce jusqu'à la mise en service. Les dégradations éventuelles pourront être réparées avant l'étape suivante et/ou les responsabilités identifiées.

Il est donc recommandé de regrouper la prestation :

- De l'équipement des fondations ;
- Des connexions et raccordement au local technique jusqu'aux collecteurs mis en eau afin de réaliser les tests finaux.

2.4 Retour d'expérience sur des opérations existantes

Plusieurs projets ont été réalisés en France et sont actuellement en service. On pourra citer notamment des projets de pieux ou de radiers énergétiques. Des projets de parois moulées sont en cours de réalisation à la date de rédaction de ce document sur certaines gares de métro (ligne B du métro de Rennes, lignes 12, 14, 15, 16 et 17 du métro parisien). Si les systèmes en exploitation fonctionnent de manière satisfaisante, il n'existe cependant pas de retour quantifié permettant de vérifier le fonctionnement attendu de l'installation (notamment au sens du rendement des géostructures sous sollicitations thermiques réelles et de son évolution dans le temps) ni d'établir un calcul de retour sur investissement autre que théorique.

Parmi les projets réalisés en Europe, l'opération sur pieux de l'Aéroport de Zürich est un des seuls cas dont le retour d'expérience thermique est accessible (cf. Annexe C).

Il convient de rappeler que ces dispositifs peuvent faire l'objet d'un subventionnement susceptible de réduire sensiblement le temps de retour de ces installations (subvention de 20 à 30% du dispositif y compris pompes à chaleur).

2.5 Contexte réglementaire : état des lieux et perspectives

Selon le Code Minier et le décret modificatif n° 2015-15 du 8 janvier 2015, les géostructures thermiques ne relèvent pas du régime légal des mines, qui régit notamment l'activité géothermique. Par ailleurs, le décret exclut explicitement les géostructures thermiques du champ de la géothermie de minime importance (GMI).

Concernant le Code de l'Environnement, au sens de la police de l'Eau et des études d'impact, aucun article ne s'applique non plus aux géostructures thermiques. Par ailleurs, compte tenu de la nature des fluides caloporteurs (eau glycolée), des puissances électriques développées et des quantités de fluide frigorigène utilisées par les PAC classiquement mises en œuvre, ce type d'opération n'est pas soumis à la réglementation ICPE.

Seul le Code de la Santé publique et éventuellement les SAGE et SDAGES peuvent contenir des éléments de réglementation indirects portant sur l'obligation de réduction du risque lié à une augmentation locale de la température de la nappe (risque de prolifération bactérienne).

En définitive, les géostructures thermiques ne sont concernées directement par aucun texte réglementaire, y compris pour des opérations supérieures à 500 kW (seuil de la GMI), ne serait-ce que pour faire obligation de déclaration auprès des autorités compétentes. Cette situation, visiblement avantageuse puisqu'elle affranchit l'opérateur de démarches administratives, peut être cependant un frein au développement de la filière.

Tout d'abord, il y a un risque de défaut d'inventaire. Les opérations sont certes encore peu nombreuses en France mais elles tendent à se multiplier, en particulier dans les grands centres urbains où les besoins en chaud et froid sont à la fois les plus importants et les plus denses. Le concepteur doit être en mesure d'identifier les opérations voisines susceptibles d'interférer thermiquement avec son projet.

Par ailleurs, si la géothermie exploite une ressource renouvelable, **le potentiel géothermique d'un sol reste une quantité finie qui doit être gérée autant que possible**. On comprend aisément que la multiplication « anarchique » d'opérations concurrentes peut compromettre à terme le bon fonctionnement et le rendement projeté des systèmes. De tels conflits s'observent pour des opérations de géothermie sur nappe qui disposent, pourtant, d'un cadre réglementaire précis.

Toujours dans le même ordre d'idée, le mode d'exploitation d'une géostructure thermique est aussi un facteur potentiellement déterminant pour son fonctionnement à moyen et long terme mais aussi pour celui d'opérations voisines. Une exploitation fortement déséquilibrée car répétées en mode chaud (production de froid) ou froid (production de chaud) peut conduire à une dérive thermique du milieu et à des pertes de performances significatives. Sur ce sujet, la géothermie sur nappe n'est pas explicitement encadrée par des textes réglementaires, mais l'instructeur est en général très attentif sur les résultats des simulations thermiques long terme produits dans le cadre des études d'incidences sur la ressource en eau.

A défaut d'obligation réglementaire il est donc fortement recommandé dans l'intérêt de la filière comme de l'opérateur d'informer l'administration d'un projet de géostructure thermique, par exemple sous la forme d'un porté à connaissance ou d'une télédéclaration sur le site geothermie-perspectives.fr dédié à la GMI. Il est également proposé de mettre à disposition de la communauté scientifique certaines informations non-sensibles afin d'améliorer la connaissance des phénomènes et des problématiques en jeu (cf. 1.2.3 et Annexe A)

3 Dimensionnement géotechnique et aspects structurels

Ce chapitre présente les différents éléments à prendre en compte pour le dimensionnement géotechnique et structurel, ainsi que les aspects relatifs à la justification normative des ouvrages.

3.1 Problématiques mécaniques

Sur le plan mécanique, les modifications de température sont susceptibles de soulever deux grandes problématiques :

- La modification des propriétés mécaniques des matériaux, en particulier la résistance et la déformabilité ;
- Des déformations volumiques internes générées par les modifications de température, qui nécessitent de s'interroger sur les 3 conséquences suivantes :
 - Les efforts dans les éléments de structure ;
 - Les déformations ;
 - La modification de la « sécurité géotechnique ».

Ces différentes problématiques ne sont pas traitées explicitement par les règlements de calcul actuels, et notamment :

- La norme NF EN 1997-1 (Eurocode 7) ;
- La norme NF EN 1998-5 (Eurocode 8) pour les zones sismiques ;
- La norme NF P94-262 concernant la justification des fondations profondes ;
- La norme NF P94-282 concernant la justification des écrans de soutènements.

Cette lacune justifie la nécessité des présentes recommandations, qui seront organisées de la façon suivante :

- Variation des propriétés mécaniques intrinsèques du terrain : ce point, commun aux différentes techniques, sera traité dans un unique chapitre.
- Étude des déformations volumiques internes à la géostructure thermique générées par les modifications de température : cette problématique, susceptible de générer des conséquences spécifiques à chaque type d'ouvrage géotechnique sera traitée spécifiquement pour chaque typologie de géostructure thermique.

3.2 Variation des propriétés mécaniques des sols

Sur la base de l'étude bibliographique menée dans le cadre de ce groupe de travail, l'évolution des propriétés mécaniques des terrains à proximité d'ouvrages énergétiques n'a jamais été constatée en Europe, notamment en Autriche, en Suisse et en Allemagne (Cekeverac C. et Laloui L., 2004 ; SIA, 2005 ; Laloui L. et Di Donna A., 2014). Il est difficile de se prononcer sur l'influence réelle de la température. Comme les températures imposées dans les ouvrages énergétiques varient en général entre 1 et 35°C, elles restent suffisamment faibles pour ne pas solliciter le comportement visqueux des sols, si bien que cette absence d'évolution constatée soit normale.

À l'heure actuelle, les seuls changements constatés dans le comportement des sols proviennent des variations de volume induites par les évolutions de température. Le sol se contracte ou se dilate, ce qui provoque une variation de son indice des vides et donc un changement de ses propriétés de résistance mécanique. Les expériences réalisées en laboratoire montrent une contractance des échantillons de sol, qui se traduit pour les sols pulvérulents par une augmentation des propriétés de résistance au cisaillement et pour les sols fins par une diminution de la pression de consolidation (Cekeverac C. et Laloui L., 2004). En l'état des connaissances, il peut donc être admis de ne pas considérer ces évolutions dans l'étude des géostructures thermiques. Cette approche n'est ni optimiste, ni pessimiste.

3.3 Les pieux énergétiques

3.3.1 Enjeux associés aux pieux énergétiques

Sous l'effet des cycles de réchauffement et de refroidissement, la fondation va se contracter ou se dilater en interaction avec le bâtiment et avec le sol. Ces variations volumiques vont générer, dans le cas d'une fondation profonde verticale :

- Des déplacements verticaux ;
- Des évolutions de la contrainte verticale dans la fondation (ou de l'effort vertical dans le pieu) du fait de l'interaction avec le bâtiment et le sol encaissant ;
- Une évolution de la mobilisation de la résistance du sol (frottement axial et contrainte sous la base du pieu).

Ces mouvements empêchés par les conditions aux limites (encastrement, etc.) vont générer :

- Des contraintes qu'il est primordial d'estimer pour évaluer et garantir la pérennité de la fondation ;
- Une évolution potentielle de la portance des pieux du fait du chargement cyclique induit par les variations répétitives de longueur des pieux. Cette évolution de portance est liée à la variation possible des propriétés mécaniques de l'interface sol-pieu sous l'effet des cycles de charge et de décharge.

3.3.2 Comportement des pieux géothermiques

Cette partie a pour vocation d'étudier les conséquences des dilatations et contractions thermiques dans des cas simplifiés. Des variations uniformes de la température dans l'élément de fondation profonde en béton armé sont ici étudiées.

NB : le raisonnement peut être extrapolé pour une fondation métallique.

Afin d'étudier ce problème, le coefficient de dilatation thermique du matériau béton α_T est nécessaire. Il permet de relier la déformation longitudinale d'origine thermique ϵ^{th} à la variation de température ΔT de la façon suivante (4) :

$$\epsilon^{th} = \frac{\Delta L}{L} = \alpha_T \Delta T \quad (4)$$

NB : un raccourcissement correspond à une déformation négative

Le coefficient de dilatation thermique α_T du béton est pris égal à $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (variation usuelle entre $1,0$ et $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

Étant donné l'élancement important des fondations profondes, nous considérerons dans un premier temps que seul l'effort vertical ainsi que les déformations verticales sont à étudier.

Avant de s'intéresser au cas d'une fondation profonde, dont le comportement doit intégrer les propriétés mécaniques des interfaces le long du fût et du sol sous la pointe et de la structure portée, considérons une barre constituée d'un matériau thermoélastique soumise à une variation de température de 15°C . Cette analogie permet, notamment d'étudier les effets des conditions aux limites.

3.3.2.1 Barre totalement libre

En considérant une barre totalement libre (absence de rigidités aux extrémités et le long de la barre) de 20 m de longueur, la variation de longueur totale est égale à 3,6 mm :

- Si la variation de température est positive, le matériau se dilate et la barre s'allonge ;
- Si la variation de température est négative, le matériau se contracte, et la barre est raccourcie.

Ce premier résultat montre par ailleurs que les déplacements prévisibles restent faibles. Si l'on compare aux tassements prévisibles des fondations profondes, les résultats sont inférieurs aux tassements théoriques des pieux sous leur charge de service (Frank R., 1996).

3.3.2.2 Barre bloquée à ses extrémités

Si la barre est supposée maintenant bloquée à ses extrémités, toute déformation est empêchée.

L'évolution de contrainte peut alors être obtenue en décomposant la déformation totale en une composante d'origine élastique ϵ^e et une composante d'origine thermique ϵ^{th} de la façon suivante (5) :

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{th} \quad (5)$$

Dans ce cas, la variation de contrainte peut être déterminée de la façon suivante (6) :

$$\Delta \sigma = -E \alpha_T \Delta T \quad (6)$$

NB : une contrainte de traction est comptée positivement (convention de mécanique des milieux continus)

En considérant toujours une variation de température de 15°C, un module de déformation E de 20 000 MPa (module de déformation longitudinal du béton) et quelle que soit la longueur de la barre, la contrainte normale évolue de la façon suivante :

- Si la variation de température est positive, la dilatation du matériau est empêchée, et une augmentation homogène de la contrainte axiale égale à 3,6 MPa va se produire ;
- Si la variation de température est négative, la contraction du matériau est empêchée, et une diminution homogène de la contrainte axiale égale à 3,6 MPa va se produire.

Le comportement réel est intermédiaire entre ces deux cas extrêmes car les ordres de grandeurs ne traduisent pas les points suivants qui peuvent avoir des effets antagonistes sur les déplacements et les variations d'effort normal :

- La « souplesse » de la structure portée et du sol présent sous la base du pieu ;
- La fissuration du béton, qui conduit à une rigidité axiale de l'élément de fondation beaucoup plus faible ;
- Le frettage additionnel apporté par le sol présent autour de la fondation profonde.

3.3.2.3 Etudes expérimentales disponibles

Les différents essais réalisés dans le cadre de différentes expérimentations (EPFL, Lambeth Collège, IFSTTAR) mettent en évidence que :

- L'absence d'effets significatifs et mesurables sur la résistance des cycles de chauffage-refroidissement. Dans des sables lâches, et à partir des premiers essais réalisés par l'IFSTTAR, il semble que les pieux énergétiques sollicités thermiquement présentent une portance supérieure à celle d'un pieu non équipé sollicité uniquement mécaniquement. L'augmentation de portance semble être provoquée par la densification des sables lors des cycles thermiques. Par ailleurs, durant ces cycles thermiques, les mouvements du pieu, même sous une charge égale au tiers de la portance du pieu non équipé, sont négligeables (moins de 5 mm) ;
- Les variations de tassements et d'efforts restent faibles et peuvent être appréhendées par les différentes modélisations d'interaction sol-pieu couramment utilisées, sous réserve d'intégrer de façon adéquate l'effet des variations de température.

3.3.3 Méthodes d'analyse

La mise en œuvre d'un pieu énergétique peut nécessiter des dispositions particulières par rapport aux pieux « conventionnels » non équipés en tubes échangeurs de chaleur, concernant, par exemple :

- La fixation des tubes énergétiques à la cage de ferrailage ;
- Le dispositif de sortie des tubes à proximité de la tête des pieux.

En revanche, le mode de forage et de soutien des terrains dans le cas des pieux forés, ou de fonçage ou de vissage dans les cas des pieux à déplacement de sols, ne diffère pas entre des pieux énergétiques ou non. Toutes les techniques de réalisation de fondations profondes peuvent, a priori, être énergétiques : pieux forés, pieux à refoulement de sol, etc.

Comme la température ne semble pas affecter les propriétés mécaniques intrinsèques des sols (en termes de résistance et de déformabilité), il devient inutile, voire impossible, de chercher à définir des « frottements axiaux unitaires » et des « facteurs de portance » spécifiques à cette technique (SIA, 2005 ; Laloui L. et Di Donna A., 2014). Un pieu géothermique diffère des autres pieux par le fait qu'il est soumis à un chargement thermique spécifique, induit par des variations de température et à des déformations volumiques associées. Ce chargement thermique ne s'applique pas à la tête du pieu, mais est interne au pieu. L'étude du comportement d'un pieu géothermique impose en conséquence un calcul d'interaction sol-pieu, permettant de tenir compte du comportement des différentes couches de sol traversées, de la rigidité axiale du pieu et du comportement du sol.

Ces calculs peuvent être menés par différentes approches (Burlon S. et Habert J., 2017), et notamment :

- La méthode des courbes de transferts ;
- Des calculs numériques : éléments finis, différences finies, etc.

Ces approches nécessitent de modéliser le pieu en deux phases distinctes :

- Une première phase où seul le chargement mécanique est appliqué : effort en tête et frottement négatif éventuel ;
- Une deuxième phase pour introduire le chargement thermique.

Les expérimentations en vraie grandeur réalisées ont montré, par ailleurs, la pertinence de ces approches pour modéliser le comportement des pieux lors des chargements thermiques.

3.3.3.1 Méthode des courbes de transfert

Pour appréhender le comportement d'un pieu énergétique, le calcul d'interaction sol-pieu le plus simple à réaliser est celui basé sur les courbes de transferts (7). L'équilibre vertical est alors traduit par l'équation suivante :

$$E_y S \frac{d^2 w}{dz^2} - P f_{\text{pieu-sol}}(z, w) = 0 \quad (7)$$

Où :

- E_y est le module d'Young du matériau constituant le pieu ;
- S et P respectivement la section et le périmètre du pieu ;
- w le déplacement vertical ;
- $f_{\text{pieu-sol}}$ la relation de mobilisation du frottement axial.

Les conditions aux limites doivent permettre de représenter :

- La mobilisation de la résistance sous la base du pieu en fonction du déplacement vertical ;
- La rigidité éventuelle de la structure portée en tête de pieu.

L'équation différentielle peut être résolue numériquement en discrétisant verticalement l'élément de fondation profonde, puis en recherchant de manière itérative le tassement en pointe du pieu, permettant d'obtenir les conditions en têtes recherchées. Dans chaque élément discrétisé, il est possible de tenir compte de la variation de température du pieu en ajoutant aux déformations mécaniques des déformations thermiques (voir 3.3.2.2 et Annexe E.2.)

Les lois de mobilisation de la résistance locale sol-pieu ou les lois de réactions $f_{\text{pieu-sol}}$ utilisées sont analogues aux lois de mobilisation du frottement axial disponibles couramment utilisées pour le calcul des déformations de fondations profondes soumises à des chargements axiaux (Frank et Zhao, 1982). Ces lois correspondent à celles retenues dans la norme NF P94-262. De légères adaptations, doivent être apportées pour prendre en compte les inversions des déplacements dans les lois de comportement, comme indiqué, par exemple, sur la Figure 10 (adaptations en rouge).

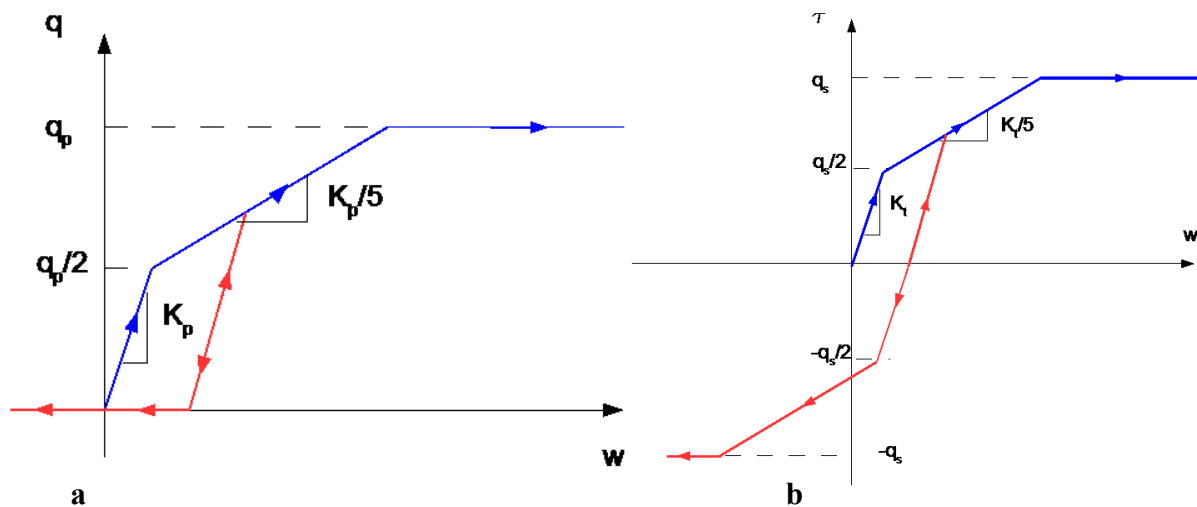


Figure 10 : courbes de Frank et Zhao modifiées pour tenir compte de la réversibilité des déplacements relatifs entre le pieu et le sol : a en pointe et b le long du fût.

3.3.3.2 Méthodes numériques

Ces méthodes peuvent également être utilisées, sous réserve de modéliser le pieu avec des éléments massifs ou volumiques.

Il peut être tenu compte des déformations d'origine thermique :

- Soit en réalisant un calcul tenant compte du couplage thermo-mécanique ;
- Soit en injectant directement les déformations volumiques en décomposant les déformations en une composante thermique et une composante mécanique classique. Cette démarche nécessite généralement d'utiliser des éléments massifs pour modéliser les éléments structurels.

Dans ce dernier cas, les déformations volumiques peuvent ensuite être injectées directement dans les éléments massifs, en utilisant l'expression suivante (8) :

$$\epsilon_{xx}^{th} = \epsilon_{yy}^{th} = \epsilon_{zz}^{th} = \alpha_T \Delta T \quad (8)$$

Dans la majorité des cas, la considération des seules déformations verticales permet de reproduire l'approche t-z décrite précédemment et les observations des différentes expérimentations.

Certains logiciels nécessitent d'entrer globalement la déformation volumique ϵ_v . Dans ce cas, la déformation volumique d'origine thermique est déterminée par l'équation suivante (9) :

$$\epsilon_v^{th} = 3\alpha_T \Delta T \quad (9)$$

Comme tout calcul numérique, un soin particulier doit être apporté aux caractéristiques du modèle (maillage, initialisation des contraintes, etc.), aux propriétés mécaniques des terrains et des interfaces et à leur calage. Par exemple, on doit contrôler que l'effort normal en tête de pieu ne varie pas si le pieu est libre en tête.

3.3.3.3 Paramètres de dimensionnement

Trois grandeurs sont intéressantes à considérer : la variation d'effort normal avec la profondeur $\Delta N_{th}(z)$, la variation de déplacement en tête de pieu Δw_{th} et la variation de résistance mobilisée dans le terrain $\Delta R_{mob} = R_{mob, th} - R_{mob, mec}$. Pour une augmentation de température, l'effort normal dans le pieu augmente et le tassement en tête du pieu diminue (Figure 11). Les grandeurs $\Delta N_{th}(z)$, Δw_{th} et ΔR_{mob} vont permettre de procéder au dimensionnement du pieu énergétique.

De manière usuelle, les valeurs $\Delta N_{th}(z=0)$ en tête de pieu et ΔR_{mob} sont égales.

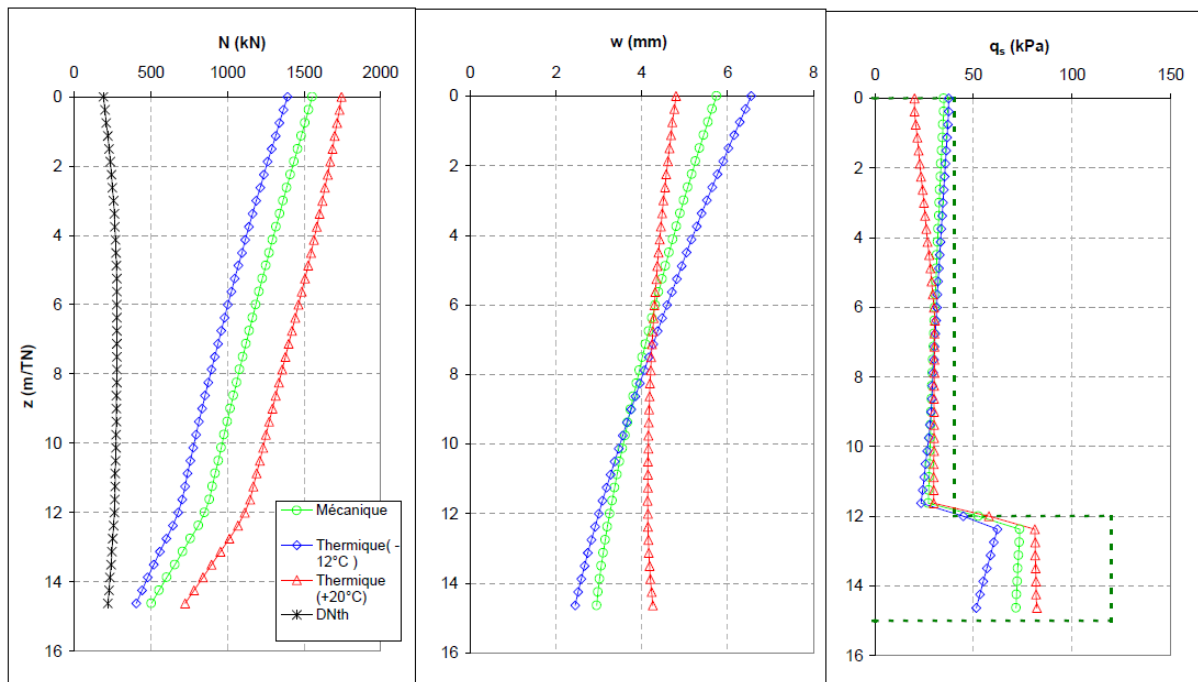


Figure 11 : Variations d'effort normal, de tassement et de frottement latéral mobilisé pour un pieu soumis à des variations de température.

3.3.4 Modélisation de la structure portée

Dans le cadre des présentes recommandations, il est proposé d'appréhender le comportement de chaque pieu de façon indépendante, tout en considérant cependant la rigidité de la structure portée (Suryatryastuti M.E., 2013). Concernant la rigidité de la structure en tête de pieu, et afin de ne pas modéliser l'ensemble de la structure, il est en effet possible :

- D'appliquer une valeur par excès de la rigidité en tête pour accéder aux variations d'effort normal $\Delta N_{th}(z)$ et de mobilisation de la résistance géotechnique ΔR_{mob} . La rigidité en tête doit permettre de rendre compte :
 - des pieux non équipés situés à proximité ;
 - des éventuels défauts de fonctionnement des pieux géothermiques adjacents.⁴
- De négliger la rigidité en tête afin d'accéder au déplacement vertical additionnel en tête Δw_{th} , permettant d'appréhender dans un second temps les efforts additionnels dans la structure portée (longrines, radier, etc.)

Cette approche nécessite également de tenir compte des reports de charge sur les pieux non énergétiques.

Des modélisations plus globales, reposant sur la prise en compte de l'interaction sol-structure au sens large, sont également envisageables et peuvent conduire à une certaine optimisation du projet. Elles doivent permettre de tenir compte des éventuels défauts de fonctionnement⁵ des pieux géothermiques. En conséquence, ces modélisations sont à réserver pour les phases pour lesquelles le projet est suffisamment bien défini.

3.3.5 Principe de justification

Des principes de justification compatibles avec les normes de calcul en application (NF EN 1997-1 - Eurocode 7 - et norme NF P94-262) sont proposés.

Les vérifications à effectuer sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Vérifications à effectuer dans le cadre de la justification de géostructures thermiques.

		ELU	ELS
Résistance géotechnique (GEO)	Portance (ou résistance à la traction)	X	X
Résistance structurelle (STR)	Section de béton armé	X	X
Déplacements			X

4- Les pieux géothermiques sont disposés en boucles de quelques unités fonctionnant en série. De ce fait, le comportement des pieux d'une même boucle peut être supposé homogène. Par ailleurs, lors de la conception, le regroupement au sein d'une même boucle de pieux proches et fortement liaisonnés en tête permet souvent de simplifier le problème.

5- Sont visés ici les défauts de fonctionnement liés à un défaut d'exploitation (fermeture d'une vanne) pouvant neutraliser temporairement le fonctionnement d'un groupe de pieux. En l'absence de contrôle du fonctionnement du système géothermique, les défauts sont à considérer en ELU Accidentel (cf. Annexe D).

La méthode proposée consiste à déterminer les grandeurs $\Delta N_{th}(z)$, Δw_{th} et ΔR_{mob} . Afin de ne pas alourdir inutilement le processus de justification, il n'apparaît pas pertinent de réaliser un calcul d'interaction sol-structure pour chaque cas de charge pour un chargement mécanique. De plus, cette démarche est conservatrice. C'est pourquoi, il est proposé d'estimer les grandeurs par un seul calcul d'interaction sol-structure. Ce calcul est mené en considérant les descentes de charges mécaniques correspondant à l'ELS Quasi-Permanent.

Les grandeurs $\Delta N_{th}(z)$, Δw_{th} et ΔR_{mob} sont déterminées pour une phase de chauffage et une phase de refroidissement. En tout, six grandeurs sont donc à calculer. Étant donné la durée d'application des charges, le module de Young du béton E à considérer est celui couramment utilisé pour les phases provisoires (moyenne des modules de courte et longue durée d'application) et la valeur de 20 000 MPa peut être retenue.

La valeur $\Delta N_{th}(z)$, considérée comme une action variable, doit ensuite être intégrée dans les différentes combinaisons de charges (ELU et ELS) pour déterminer les efforts dans le pieu et finaliser son dimensionnement⁶.

Afin d'introduire les évolutions d'effort dans les combinaisons d'actions, il est également nécessaire de définir les coefficients de combinaisons ψ_i . En se basant sur l'étude des variations de température de systèmes géothermiques, les valeurs suivantes sont proposées (Habert, J. et Burlon, S., 2012) :

- Valeur de combinaison : $\psi_0 = 0,6$;
- Valeur fréquente : $\psi_1 = 0,5$ (Les combinaisons fréquentes ne sont pas utilisées pour la justification des ouvrages géotechniques);
- Valeur quasi-permanente : $\psi_2 = 0,2^7$

La valeur Δw_{th} est à comparer aux valeurs habituellement considérées pour juger de l'importance de tassements différentiels. La valeur limite égale à 1/500 de la distance entre appuis semble convenir à un grand nombre de structures et peut être retenue en première approche. Elle permet de s'affranchir également du calcul des efforts parasites dans les éléments de structure⁸.

6 Les efforts thermiques ne peuvent être négligés même si les autres variables d'accompagnement présentent des valeurs plus importantes.

7 Ces valeurs sont proposées en retenant comme données d'entrée la température minimale ou maximale du fluide caloporteur à l'entrée du système géothermique. Elles permettent notamment de tenir compte de la température moyenne du pieu, qui diffère de la simple température d'entrée du fluide. Il est également possible de déterminer directement, par le biais d'une modélisation thermique, la température moyenne du pieu sur la durée de vie de l'ouvrage. Dans ce cadre, les couples de valeurs de combinaison à considérer (distinctes pour les scénarios de chauffage et de refroidissement) sont déterminées directement, en retenant en première approche :

- Les 2 valeurs de combinaison sont les valeurs minimales et maximales au cours de la vie de l'ouvrage de la température moyenne dans le pieu ;
- Les 2 valeurs fréquentes sont les valeurs correspondant à la valeur dépassée pendant 1% de la durée d'un cycle de fonctionnement (une saison de chauffage par exemple) ;
- Les 2 valeurs quasi-permanentes sont les valeurs médianes pendant un cycle de fonctionnement (une saison de chauffage par exemple).

8 Des dispositions particulières sont à envisager concernant des configurations avec pieux « rapprochés et fortement liaisonnés en tête » (c'est-à-dire qui influencent de façon non négligeable le comportement des autres pieux.

Enfin, la valeur ΔR_{mob} est introduite dans les combinaisons d'action ELU et ELS avec les coefficients partiels γ_Q et les coefficients de combinaisons ψ_i appropriés pour vérifier la portance du pieu.

Ce calcul est justifié par analogie avec la prise en compte du frottement négatif⁹.

Enfin le rapport $\Delta R_{mob} / R_c$ peut ensuite être calculé et reporté dans un diagramme de stabilité cyclique (G/R_c ; $\Delta R_{mob} / R_c$) où G désigne l'ensemble des charges permanentes et R_c la portance (Résistance à la compression) du pieu (cf. Annexe E).

Il permet de contrôler que la variation de résistance mobilisée lors des phases de chauffage et de refroidissement reste en deçà des valeurs nécessitant de considérer plus finement les problématiques cycliques.

Étant donné les premiers calculs réalisés (Burlon S. et al, 2013 ; Habert J. et Burlon S., 2012), cette dernière étape indique des variations de résistance bien en deçà des seuils nécessitant de considérer les problématiques cycliques. Le report des variations de mobilisation de la résistance n'apparaît donc pas systématiquement nécessaire pour le traitement des cas courants.

3.4 Ecrans énergétiques

3.4.1 Préambule

De manière générale, le retour d'expérience et la bibliographie sur les écrans de soutènement énergétiques sont beaucoup moins nombreux que sur les pieux énergétiques. Il convient, en conséquence, d'apporter une attention particulière à la justification de ces ouvrages.

Les éléments présentés dans ce chapitre permettent d'élaborer de premiers éléments permettant leur justification mécanique.

3.4.2 Typologie des écrans énergétiques et spécificités

3.4.2.1 Typologie

Les écrans de soutènement énergétiques visent notamment les ouvrages suivants :

- Les parois moulées ;
- Les parois préfabriquées ;
- Les parois de pieux sécants ;
- Les parois lutéciennes et moscovites, dont les poteaux sont constitués de pieux ou de barrettes.

9 L'effort dû au frottement négatif est en effet considéré dans les règlements de calcul actuels comme une charge appliquée en tête, ce qui constitue une simplification évidente, mais sécuritaire, de l'étude du comportement vertical des fondations profondes.

3.4.2.2 Spécificités

Du fait de leur conception énergétique d'une part, mais aussi de la recherche courante d'optimisation de leur dimensionnement (prolongement de la fiche mécanique par une fiche hydraulique généralement non ou peu armée, optimisation du ferrailage et positionnement des aciers de renforts au droit des efforts les plus importants), la section équipée de ces ouvrages est variable, en particulier pour les parois moulées énergétiques :

- Ouvrages équipés toute hauteur. Pour ces ouvrages, les tubes échangeurs de chaleur sont généralement fixés uniquement côté terre. C'est pourquoi, il est nécessaire de tenir compte d'un gradient horizontal de température ;
- Ouvrages équipés uniquement au niveau de la fiche ;
- Ouvrages équipés uniquement au niveau de la fiche mécanique.

Par ailleurs, ces ouvrages sont susceptibles d'être soumis à des problématiques spécifiques :

- Liaisons à des structures connexes ;
- Etanchéité ;
 - De l'écran proprement dit ;
 - Des structures connexes (radier) ;
- Mise en traction de la fiche de la paroi sous l'effet de la pression d'eau sous le radier.

3.4.3 Problématique posée par le fonctionnement géothermique

Par similarité avec les pieux énergétiques, et du fait de la circulation d'un fluide caloporteur au sein de la structure, les écrans énergétiques sont susceptibles de se dilater et de se contracter. Elles sont également susceptibles de soulever :

- Des problématiques mécaniques se traduisant par les points suivants :
 - Des déplacements additionnels ;
 - Une modification des efforts structuraux ;
 - Une modification de la résistance géotechnique ;
- Des problématiques de condensation avec l'apparition de rosée sur la face interne des parois moulées utilisées pour réchauffer la structure.

3.4.3.1 Comportement vertical

Tout d'abord, et de façon analogue aux pieux, les dilatations et contractions du béton se traduisent par un allongement ou un raccourcissement vertical (déplacements verticaux additionnels), qui est partiellement empêché :

- Par le terrain, de la même manière que pour les pieux énergétiques :
 - Par frottement écran-sol ;
 - Sur toute la hauteur de l'écran côté terres soutenues ;
 - Uniquement sur la hauteur de fiche côté fouille ;

- Par interaction sous la base de l'écran de soutènement énergétique ;
- Du fait de la rigidité des éléments de structures additionnels, et notamment la rigidité des niveaux de radier et des planchers éventuels de l'ouvrage.
- Mais également du fait de la rigidité des panneaux adjacents, non équipés géothermiquement ou dont l'installation géothermique est défailante.

Cet empêchement mécanique partiel conduit à une modification des efforts normaux dans la structure mais également une mobilisation de la résistance verticale. Ce dernier point doit tenir compte du fonctionnement potentiel en traction.

3.4.3.2 Comportement horizontal

Ce comportement peut s'étudier en considérant, de façon similaire au comportement vertical, les trois points suivants : les déplacements additionnels, les efforts structurels complémentaires et la mobilisation de la résistance géotechnique.

Par ailleurs, et en première approche, les variations de température sont susceptibles d'influer sur le comportement horizontal des écrans énergétiques. Ce point est d'autant plus vrai que les comportements verticaux et horizontaux des écrans de soutènements classiques (non géothermiques) ne peuvent être dissociés. À ce sujet, il peut être noté :

- Que l'inclinaison des efforts de poussée et de butée, bien que choisie par convention, est évidemment dépendante du déplacement vertical relatif entre l'ouvrage et le sol ;
- Que les écrans de soutènement soumis à des efforts verticaux descendants importants, doivent faire l'objet de vérifications spécifiques, pouvant induire dans certains cas, la remise en cause des valeurs d'obliquité.

Les efforts horizontaux (et donc l'équilibre horizontal) s'appliquant à l'ouvrage sont donc susceptibles d'être modifiés lors des dilatations et contractions thermiques.

Cependant, il peut être souligné que les échanges de chaleur n'ont généralement lieu que lorsque l'ensemble de l'ouvrage est en service, c'est-à-dire quand la stabilité n'est pas la plus critique, du fait de la présence du radier et des différents niveaux de planchers constituant l'ouvrage. A ce sujet, les calculs déjà réalisés, tant sur des exemples académiques que sur des cas réels (Habert J. et Burlon S., 2015, 2016), semblent indiquer que les déformations thermiques (dans les plages considérées ici, soit 1 à 35°C), ne génèrent pas de modification sensible des contraintes horizontales (poussée et butée), et en conséquence des efforts dans la paroi (moment fléchissant et effort tranchant). En particulier, les variations des valeurs extrêmes des efforts restent faibles (quelques pourcents).

Cela s'explique par les trois différentes raisons suivantes :

- Les ordres de grandeur des déplacements verticaux restent faibles (quelques millimètres) ;
- Les déplacements verticaux et les évolutions des obliquités associées sont susceptibles de conduire à des effets antagonistes : quand le sol est présent de chaque côté de la paroi, une augmentation théorique des efforts de poussée s'accompagne également d'une augmentation des efforts de butée. Il reste cependant à considérer que, hormis sur la partie en fiche, seule la poussée s'applique sur l'écran ;

- Dans les calculs à l'ELS, les contraintes de part et d'autre de l'écran n'ont pas atteint les états de poussée et de butée, et restent donc très peu impactées par les évolutions des déplacements verticaux.

3.4.4 Méthodes d'analyses

Du fait de l'interaction entre les équilibres verticaux et horizontaux, deux options de calcul peuvent être proposées pour considérer les déformations volumiques d'origine thermique :

- Utilisation d'une méthode aux courbes de transfert, de façon identique à ce qui est proposé pour les pieux énergétiques, qui permet de déterminer :
 - Les déplacements verticaux ;
 - Les variations d'effort vertical (en tenant compte de l'excavation éventuelle d'un côté de la paroi et des rigidités additionnelles de la structure, et notamment d'un niveau de radier appuyé sur le sol) ;
 - La variation de mobilisation de la résistance verticale.
- Mise en œuvre d'un calcul numérique (calcul 2D en éléments finis ou équivalent), qui permet d'apprécier l'intégralité du comportement de l'écran, y compris les efforts dans les structures connexes (appuis, etc.) :
 - Les déplacements additionnels ;
 - Les variations des torseurs des efforts structuraux :
 - Moments fléchissants ;
 - Efforts tranchants ;
 - Efforts verticaux.
 - La variation de mobilisation de la résistance géotechnique : butée et portance.

Pour ne pas alourdir inutilement les calculs, et de façon similaire à ce qui est pratiqué en général pour les structures en béton armé, des variations thermiques homogènes dans des sections horizontales sont introduites dans les calculs afin d'apprécier le comportement de la paroi moulée. Les gradients thermiques éventuels dans des sections horizontales peuvent être considérés *in fine* lors de la phase de justification de la section de béton armé.

Du fait des faibles variations du comportement vertical constaté pour les écrans présentant une hauteur libre ou une distance entre appuis raisonnable (et évoqué ci-dessus), le recours systématique à des méthodes numériques ne semble pas dans un premier temps indispensable. Son caractère obligatoire est à réserver à l'étude d'ouvrages complexes, ou pour lesquels des exigences en termes de déplacement admissible sont fixées.

3.4.5 Modélisation de l'écran

Quelle que soit la méthode retenue, l'idée est de procéder de façon identique à ce qui a été exposé pour les pieux géothermiques. Les déformations thermiques considérées homogènes dans une section horizontale de paroi moulée (mais qui peuvent être nulles sur certaines sections, en cas de non-équipement) sont déterminées uniquement sous combinaisons d'actions mécaniques quasi-permanentes, afin de ne pas alourdir inutilement le calcul. La résolution de l'équilibre permet ensuite d'obtenir :

- Les déplacements additionnels : déplacement vertical en tête Δw_{th} et déplacements horizontaux $u(z)$;
- Les variations d'effort $\Delta N_{th}(z)$, $\Delta M_{th}(z)$ et $\Delta T_{th}(z)$:
 - Dans l'écran proprement dit ;
 - Le cas échéant dans les structures connexes ;
- La mobilisation additionnelle de résistance géotechnique ΔR_{mob} , en termes de portance et éventuellement de butée mobilisée.

Des gradients horizontaux de température peuvent être introduits à la fin du calcul des efforts dans la paroi dans le dimensionnement de la section de béton armé, pour tenir compte :

- De la mise en place de tubes échangeurs de chaleur sur un seul côté de l'écran (cas des tubes situés uniquement côté terre au-dessus de la fiche des écrans énergétiques) ;
- D'effets transitoires correspondant à la mise en route du système géothermique, par exemple.

Étant donné la durée d'application des charges, la rigidité de l'écran peut être généralement déterminée en considérant le seul module de Young du béton. La valeur de 20000 MPa (moyenne des modules de courte et longue durée d'application) peut être couramment retenue.

Dans le cas des sections d'écran de soutènement travaillant intégralement en traction, les adaptations suivantes peuvent être apportées dans le choix de la rigidité de l'écran, selon le paramètre étudié :

- Pour appréhender le comportement global de l'écran (modélisation de la résistance géotechnique, efforts dans les éléments connexes et déplacements), il est possible de négliger le béton au-delà de sa résistance en traction et seuls les aciers sont alors considérés ;
- Pour appréhender les efforts dans l'écran, du fait de la non prise en compte du béton en traction dans la détermination du moment résistant, les sections entièrement en traction sont susceptibles de soulever des problématiques particulières. La détermination des efforts dans la paroi peut alors nécessiter de ne considérer que les aciers seuls.

La défaillance de panneaux adjacents, sous réserve de vérification du bon fonctionnement de l'ensemble de l'installation géothermique, doit être introduite comme un chargement accidentel.

3.4.6 Principe de justification

La même démarche que pour les pieux géothermiques est proposée ici. Ainsi, les vérifications listées dans le Tableau 7 doivent être effectuées.

Il est proposé d'introduire les variations d'efforts et de résistance géotechnique mobilisée dans les combinaisons d'action. Ces variations sont pondérées par les coefficients de combinaison ψ_i et les facteurs partiels γ_Q (cf.3.3.5 et Annexe D).

Pour vérifier l'intégrité des sections en béton armé travaillant intégralement en traction, d'autres approches peuvent également être utilisées pour la justification (prise en compte des variations d'origine thermique de la même façon que pour un phénomène de retrait du béton par exemple).

3.5 Autres géostructures thermiques

Les autres géostructures thermiques (radiers, revêtement de tunnel, etc.) peuvent faire l'objet du même principe de vérifications que celles évoquées ci-dessus, en s'attachant à étudier :

- les déplacements additionnels ;
- les efforts structuraux additionnels ;
- la modification de la résistance géotechnique le cas échéant.

4 Conditions de réalisation et de mise en œuvre

Ce chapitre concerne les dispositions constructives relatives aux géostructures thermiques. Il y est développé des règles simples concernant toutes les phases de construction de ces géostructures : de leur implantation sur le projet, aux contrôles et à la reprise des tubes défectueux, en passant par leur mise en œuvre et la fixation des tubes transportant le fluide caloporteur.

4.1 Implantation des géostructures thermiques

4.1.1 Pieux, barrettes et micropieux

Il est de bonne pratique de ne pas placer des pieux géothermiques à proximité de pieux non-géothermiques. Cette notion de proximité dépend des interactions avec la structure portée. Elle doit faire l'objet d'une étude telle que présentée en annexe E.

Lorsque le pieu équipé de tubes géothermiques est provisoire (absence de liaison mécanique avec la structure définitive), il n'y a pas de contrainte d'espacement minimal autre que celle de l'efficacité géothermique (exemples de pieux provisoires : pieux de grues, pieux de soutènement provisoire, etc.).

Ces dispositions constructives s'appliquent également aux barrettes et micropieux.

4.1.2 Parois moulées

Un panneau de paroi moulée peut comporter plusieurs cages. L'équipement géothermique est obligatoirement monté cage après cage, il n'est donc pas possible d'avoir un équipement géothermique commun à plusieurs cages (Figure 12).

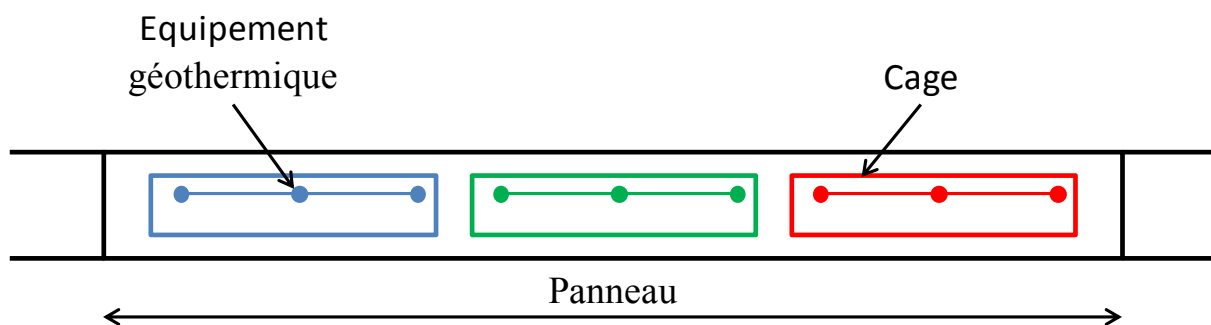


Figure 12 : Exemple d'implantation des tubes géothermiques dans une paroi moulée

4.1.3 Radiers et fondations superficielles

Les tubes sont usuellement installés sous les radiers ou sous les fondations superficielles afin d'éviter les interactions structurales. Si cette configuration n'est pas possible, les tubes seront positionnés en sous-face de la fondation. Dans tous les cas, il faut éviter les percements ultérieurs.

Les tubes ne doivent pas être posés directement sur le sol, mais sur une structure évitant leur écrasement. Pour des raisons d'efficacité thermique, il pourrait être nécessaire de disposer un isolant entre l'équipement et la structure. Celui-ci devra résister aux contraintes appliquées.

Une attention particulière doit être portée sur la caractérisation du terrain dans le cas de sols susceptibles de présenter une variation de volume lors de cycles de séchage/humidification, si ce phénomène peut affecter la structure.

NB : formellement, un tube géothermique posé sur le sol et isolé de la structure ne relève pas d'une géostructure thermique. Mais, la structure et l'interaction sol-structure doivent prendre en compte les variations de température, spécialement si l'isolation thermique n'est pas parfaite.

4.1.4 Autres ouvrages géotechniques

Les voiles par passes, tranchées blindées et parois clouées doivent faire l'objet d'une étude spécifique en s'inspirant des prescriptions des radiers.

Les palplanches ou rideaux mixtes (combi-wall) et parois au coulis peuvent être équipés de tubes géothermiques.

D'autres ouvrages géotechniques (jetgrouting, inclusions rigides, pieux préfabriqués pleins, profilés métalliques, tirants provisoires et clous de structures provisoires) peuvent être équipés de tubes géothermiques, sous réserve d'analyses spécifiques de la faisabilité.

4.2 Fixation et positionnement des tubes

4.2.1 Pieux géothermiques

4.2.1.1 Pieux géothermiques coulés en place

Les tubes sont mis en place par l'intermédiaire d'un équipement rigide provisoire ou définitif (cage d'armatures, profilés ou tubes), qui permet le positionnement conformément à la conception.

Cet équipement peut se substituer ou compléter l'armature calculée pour les efforts structuraux. Il doit remonter jusqu'au niveau de la plateforme.

Il n'est conseillé que l'espacement des tubes géothermiques soit au minimum de 15 cm entre eux.

4.2.1.1.1 Nombre de tubes et de boucles

Le nombre maximal de tubes géothermiques envisageable est :

- Diamètre des pieux $\varnothing < 40\text{cm}$: 1 boucle ;
- Diamètre des pieux $40\text{ cm} \leq \varnothing \leq 60\text{ cm}$: 2 boucles ;

NB : dans cette configuration, la pose de tubes d'auscultation est prohibée car l'ensemble tubes géothermiques et tubes d'auscultation crée trop d'obstacles pour obtenir un bétonnage de qualité.

- Diamètre des pieux $60\text{ cm} < \varnothing \leq 80\text{ cm}$: 3 boucles ;
- Diamètre des pieux $80\text{ cm} < \varnothing \leq 100\text{ cm}$: 4 boucles ;
- Pour des diamètres supérieurs, il est possible d'ajouter une boucle par augmentation de diamètre de 20 cm.

Des coudes en U thermosoudables doivent être placés en bout de boucles lorsqu'il n'est pas possible de garantir un rayon de courbure r_c conforme avec les exigences du fournisseur des tubes.

NB : en l'absence d'information, on retient $r_c = 20 \cdot D_{\text{tube}}$, avec D_{tube} le diamètre extérieur du tube échangeur.

4.2.1.1.2 Dispositions relatives aux cages d'armatures

Lorsque les armatures n'ont pas de fonction structurelle définitive, les tubes doivent être uniquement positionnés en fonction d'une bonne mise en œuvre de béton.

NB : on rappelle qu'une distance minimale de $4 \cdot D_{\text{max}}$ (D_{max} étant le diamètre du plus gros agrégat) entre éléments noyés dans du béton est usuellement considérée comme satisfaisant ce critère de mise en œuvre.

Lorsque les armatures ont une fonction structurelle définitive, il est recommandé de respecter une distance $4 \cdot D_{\text{max}}$ entre les armatures longitudinales et les tubes (et donc de fixer ces derniers sur les armatures transversales), hors hauteur de recépage (Figure 13).

NB : la fixation du tube sur l'armature longitudinale reste possible si elle est compatible avec la fonction structurelle définitive de l'armature.

Les cages d'armatures doivent respecter les normes en vigueur concernant les espacements minimaux et maximaux entre barres.

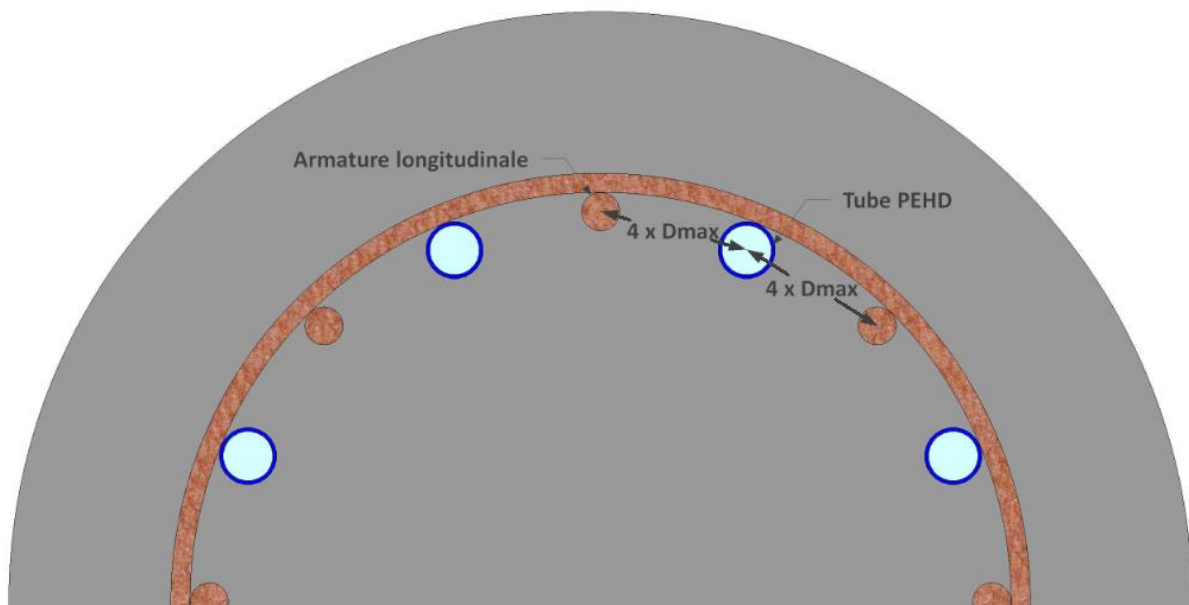


Figure 13 : Ecartement minimal des tubes PEHD dans une cage d'armature de pieux géothermiques

Dans le cas de fondations coulées en place par tube plongeur, la distance minimale entre le tube plongeur et le premier obstacle est de $4 \cdot D_{\text{max}}$ et afin d'éviter des problématiques de bétonnage en pied de pieu (cas de tubes dans la cage d'armatures), les boucles doivent être situées au minimum à 25 cm de la base de la cage d'armatures.

Dans le cas d'armatures mises en place après bétonnage, il est recommandé de réaliser un essai de faisabilité de la descente de la cage avec son équipement géothermique.

4.2.1.1.3 Fixation des tubes

Les tubes géothermiques doivent être fixés transversalement, afin d'éviter les déformations excessives.

Les fixations entre les armatures transversales doivent être réalisées afin d'éviter le cisaillement du tube (Figure 14). Les espacements minimaux à mettre en place sont :

- 1 m dans le cas de ligatures métalliques ;
- 50 cm dans le cas de colliers plastiques.



Figure 14 : Illustrations de la fixation de tubes PEHD sur des armatures de pieux géothermiques (géothermie-professionnelle)

Sur une hauteur de 1 m en bas de boucle et haut de boucle, des fixations doivent être placées tous les 25 cm.

La boucle située en tête doit être positionnée de façon à ne pas être endommagée par le recépage. Il est recommandé qu'elle soit située à un minimum de 20 cm sous le niveau de recépage.

La boucle située à la base doit être positionnée afin de ne pas gêner le bétonnage. Il est recommandé qu'elle soit située à un minimum de 25 cm au-dessus de la base de la cage dans le cas de l'utilisation de tube plongeur. Dans tous les cas, les tubes doivent rester protégés en pied par la cage d'armature.

Les tubes d'entrée/sortie doivent dépasser de la plate-forme d'une hauteur suffisante pour pouvoir faire les essais et les raccordements dans de bonnes conditions. Les tubes doivent être provisoirement obturés.

Le schéma ci-contre (Figure 15) présente ces préconisations.

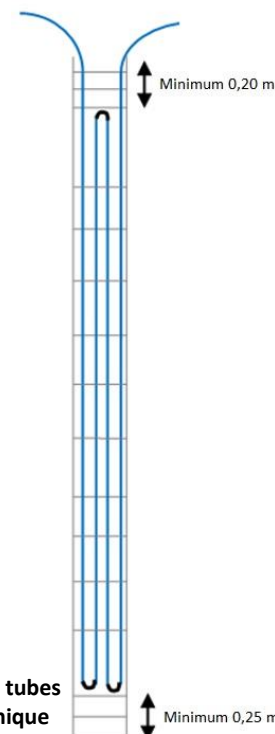


Figure 15 : limitation de hauteur des tubes géothermiques dans une géostructure thermique

Dans le cas où les tubes sont placés sur l'extérieur des cages, et dans la mesure où la présence du tube réduit l'enrobage et augmente donc le risque de corrosion, les prescriptions réglementaires d'enrobage doivent s'appliquer au nu extérieur du tube (soit une épaisseur d'enrobage par rapport à la cage d'armatures augmentée du diamètre extérieur des tubes géothermiques)

4.2.1.2 Pieux énergétiques préfabriqués ou métalliques

Ce type de pieux énergétiques correspond à des pieux en béton préfabriqué creux ou tubes acier foncés dans le sol. Dans la mesure où seule l'enveloppe participe à la reprise des efforts mécaniques, il n'y a pas de prescription quant à la position relative des tubes. Un poids doit être fixé en pied de tube afin d'empêcher la remontée des tubes lors du coulage du coulis ou mortier visant à protéger les tubes et améliorer le transfert thermique.

4.2.2 Parois moulées

Les prescriptions ci-dessous s'appliquent en complément de celles des paragraphes précédents :

- Dans le cas de parois sans réservation ni scellement, les tubes peuvent être fixés indifféremment dans l'intrados ou l'extrados ;
- Les scellements sont incompatibles avec les tubes en intrados et doivent être utilisés avec précaution dans les parois peu épaisses : les coupleurs doivent être préférés ;
- Dans le cas où les tubes ne remontent pas en surface, les tubes doivent être bien obturés et étanches. Les extrémités sont mises dans une boîte de protection solidement fixée à la face intrados de la cage d'armature.

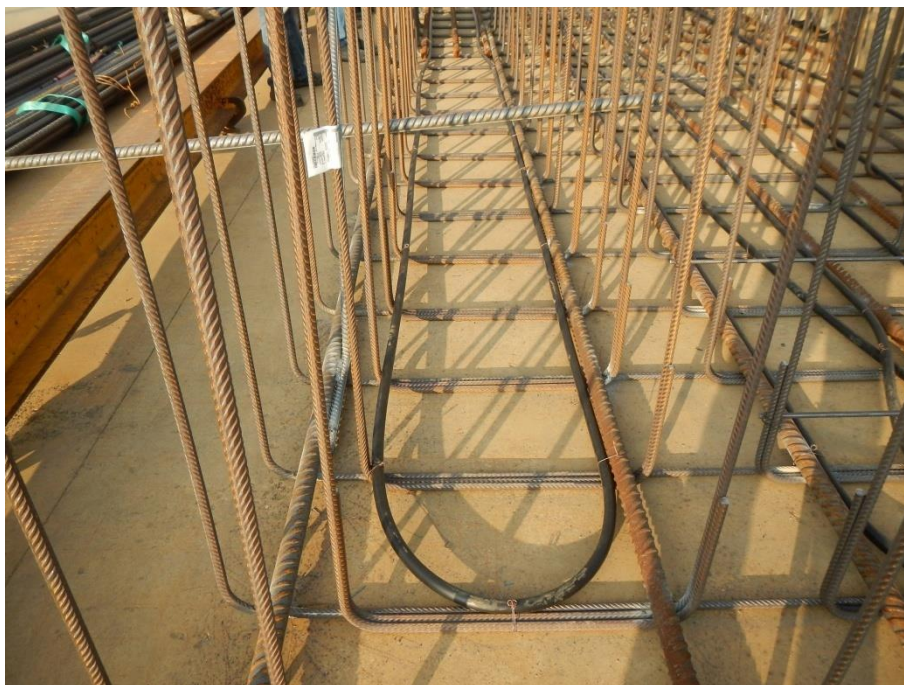


Figure 16 : Illustration d'une paroi moulée énergétique (Géothermie-Professionnelle/SYSTRA)

4.2.3 Pieux de soutènement

Les prescriptions évoquées dans les paragraphes précédents (cf. 4.2.1 et 4.2.2) s'appliquent.

4.2.4 Micropieux

Les dispositions des pieux énergétiques préfabriqués ou métalliques s'appliquent pour le cas des micropieux où seul le tube métallique travaille mécaniquement.

Dans les autres cas, et du fait des dimensions réduites des micropieux, la section occupée par les tubes géothermiques doit être déduite de la section de béton. La réalisation de micropieux énergétiques doit donc faire l'objet de calculs adaptés à la configuration de chaque projet.

4.2.5 Radiers et semelles superficielles

Si le choix est fait de placer les tubes à l'extérieur du radier (cf. 4.1.3), ils doivent être installés sous le radier, sinon les tubes sont placés au-dessus de la nappe inférieure d'armatures (Figure 17). Des attaches sont mises en place tous les mètres. L'espacement entre le tube géothermique et les barres HA est de $4 \cdot D_{\max}$.



Figure 17 : Illustration de la disposition des tubes PEHD dans l'épaisseur d'un radier (Géothermie-Professionnelle)

4.3 Mise en œuvre

4.3.1 Pieux énergétiques

4.3.1.1 Cage d'armatures mise en place après bétonnage

Au minimum, un béton de classe de consistance S4 doit être utilisé. La cage d'armature doit être descendue verticalement. Il est recommandé de réaliser un essai de faisabilité de la descente de la cage avec son équipement géothermique.

4.3.1.2 Pieux coulés en place après la pose de la cage d'armatures

Le tube plongeur ne doit pas être remonté trop vite pendant la phase de coulage, en particulier au niveau des boucles où le bétonnage peut être délicat.

Le niveau de la tête de cage doit être contrôlé pendant le bétonnage. Un système de blocage de la cage ou de lestage (par exemple remplissage des tubes à l'eau) pendant le bétonnage est conseillé pour éviter sa remontée.

4.3.2 Parois moulées

Les prescriptions évoquées dans le paragraphe précédent s'appliquent.

Le tube plongeur ne doit pas être remonté trop vite pendant la phase de coulage, en particulier au droit des coupleurs et des boîtes de réservations.

4.3.3 Pieux de soutènement

Les prescriptions évoquées dans les paragraphes précédents s'appliquent.

4.3.4 Micropieux

Lorsque les tubes ne peuvent pas être attachés à l'armature du micropieu, il est important de veiller à ce qu'aucune remontée de tube n'ait lieu.

4.3.5 Radiers et fondations superficielles

On évitera de déverser du béton frais directement sur les tubes géothermiques.

Il peut être nécessaire de les lester.

4.4 Recépage des géostructures thermiques

De manière générale, un recépage sur béton frais est préférable aux alentours des tubes. Le niveau de recépage doit correspondre à l'arase inférieure de l'élément de structure liaisonné à la géostructure thermique et à l'obtention d'une bonne qualité du béton sur la totalité de la section.

Lorsque le recépage béton frais n'est pas possible, les tubes doivent être protégés dans la zone de futur recépage et obturés pour empêcher l'entrée du béton ou de la laitance. La protection doit s'étendre 10 cm sous la zone de recépage. Le recépage mécanique doit alors être minutieux, et un contrôle des tubes doit être effectué en fin de recépage.

4.5 Ouvrages en tête de la structure géothermique

Ces ouvrages sont, par exemple, les massifs de tête de pieux, les poutres de couronnement etc., où se fait la jonction avec les connexions horizontales.

Les tubes doivent être fixés sur l'armature de cet ouvrage et non sur les attentes de la structure géothermique.

Les entrées et sorties doivent être positionnées de façon à ne pas être exposées à des sollicitations excessives ou anormales, ou doivent être protégées en conséquence. En particulier, les entrées et sorties constituent des chemins préférentiels vis-à-vis du risque de corrosion.

4.6 Connexion horizontale jusqu'au collecteur principal

La connexion des tubes sortant des géostructures thermiques à la centrale de production se fera après réalisation de l'ensemble des fondations dans la zone à connecter.

Le matériau sur lequel reposent les liaisons horizontales ne doit pas comporter d'arêtes vives. Il est, par exemple, possible de réaliser soit une purge, soit de placer les tubes sur un lit de sable.

Il est recommandé de prendre en compte les échanges thermiques entre tubes voisins. Dans la mesure du possible, il faut écarter les tubes d'entrée et de retour.

Du grillage avertisseur doit être placé directement au-dessus des tubes horizontaux s'ils ne sont pas situés sous une dalle béton. Ce grillage avertisseur doit clairement faire apparaître qu'il protège les « Tubes géothermiques ». Idéalement, cet avertissement doit être facilement repéré dans le cas de travaux ultérieurs pour éviter tout dommage.

4.7 Suivi de pose des tubes et reprise des tubes défectueux

4.7.1 Etapes du suivi

Le tableau suivant (Tableau 8) répertorie les différents contrôles à effectuer chronologiquement lors de l'exécution des géostructures thermiques.

On distingue l'entreprise en charge de l'équipement géothermique de celle qui réalise les travaux de fondations.

Afin de faciliter les contrôles, il est conseillé de disposer des manomètres en phase chantier. Ainsi toute chute de pression peut être aisément constatée, et des actions correctives peuvent être mises en place.

La mise sous pression des tubes géothermiques se fait à partir de la phase 2 et jusqu'à la fin de leur mise en place afin de pouvoir contrôler leur pression à chaque instant.

Tableau 8 : Etapes du suivi de la pose des tubes PEHD dans le cadre de la mise en œuvre de géostructures thermiques

Phase	Commentaires	Action	Par qui ?
1 - Arrivée des tubes sur chantier		Contrôle des références des tubes. Inspection visuelle de l'état des tubes pour mettre en évidence d'éventuelles coupures, etc.	Entreprise en charge de l'équipement géothermique.
2 –Fin d'installation des tubes sur cages	Tubes sous pression	Mise sous pression à minimum 4 bars. Chaque installation ne validant pas ce test doit être reprise. Rédaction d'un PV de réception avec relevé des pressions avec une précision de 0,1 bar.	Entreprise en charge de l'équipement géothermique.
3 – Au moment du transfert de la géostructure énergétique	Tubes sous pression	Contrôle contradictoire de la pression dans les tubes géothermiques, par comparaison avec le PV de la phase 2. Toute installation dont la pression a baissé doit être corrigée avant pose.	Entreprise en charge de la fondation et entreprise en charge de l'équipement géothermique.
4 – Lors de la mise en place de la géostructure énergétique	Tubes sous pression uniquement si les tubes sortent de la plate-forme de travail.	Inspection visuelle des tubes pour repérer des traces de coupure ou d'écrasement local.	Entreprise en charge de la fondation.
5 - Après mise en place de la géostructure énergétique	Tubes sous pression uniquement si les tubes sortent de la plate-forme de travail et si l'armature est mise en place avant bétonnage.	Contrôle contradictoire de la pression dans les tubes géothermiques et après coulage du béton, par comparaison avec le PV de la phase 3. Toute installation dont la pression a baissé au-delà de la tolérance de 0,1 bar doit être corrigée. S'il n'est pas possible de réparer la boucle géothermique, celle-ci doit être notée comme perdue, et les connexions adaptées. Rédaction d'un PV de réception.	Entreprise en charge de la fondation et entreprise en charge de l'équipement géothermique.
6 - Après recépage*	Tubes sous pression uniquement si les tubes sortent de la plate-forme de travail.	Contrôle contradictoire avec le PV de la phase 5. Reprise en cas de dégradation (par l'entreprise en charge de l'équipement géothermique).	Entreprise en charge du recépage et entreprise en charge de l'équipement géothermique.
7 – Après dégagement des tubes*	Tubes sous pression ou non. Cas des réservations limitées aux fiches des soutènements.	Contrôle contradictoire avec le PV de la phase 5. Reprise en cas de dégradation (par l'entreprise en charge de l'équipement géothermique)	Entreprise de GC ou GO et entreprise en charge de l'équipement géothermique.
8- Après réalisation des liaisons horizontales pour connexion au collecteur principal	Tubes sous pression	Toute installation dont la pression a baissé doit être réparée avant connexion. S'il n'est pas possible de réparer la boucle géothermique, celle-ci doit être notée comme perdue, et les connexions adaptées. Réalisation d'un test en eau. Rédaction d'un PV de réception.	Entreprise en charge de l'équipement géothermique.

*Les phases 6 et 7 ne sont pas successives. Elles correspondent à des configurations différentes.

4.7.2 Reprises en cas de tubes défectueux

Lorsque les contrôles avant bétonnage ne sont pas concluants, il est en général possible de procéder à la réfection des tubes.

Lorsqu'un défaut est décelé entre les phases 1 à 3 (définies ci-avant), la reprise est aisée, et consiste soit à contrôler les zones de faiblesse (coudes thermosoudés et entrée/sortie), soit à remplacer l'élément déficient.

Lorsqu'un défaut est décelé par contrôle visuel, l'élément qui devait être coulé est remplacé par un élément viable. L'élément incriminé est alors réparé.

Lorsqu'un défaut est décelé phase 5, 6 ou 7, il est conseillé de réaliser une injection d'air comprimé tout en projetant sur la surface des tubes un spray permettant de détecter des fuites de gaz et d'air comprimé afin de vérifier si la fuite ne se situe pas en tête. Si des bulles apparaissent, la tête de l'ouvrage énergétique peut être reprise, et le test en pression réalisé à nouveau.

Sinon, le pieu doit être marqué comme perdu.

Lorsqu'un défaut est décelé en phase 8, ce défaut concerne les liaisons horizontales, qui sont à contrôler, et à remplacer ou réparer.

4.7.3 Dispositions relatives à la conception

Il est conseillé de ne pas liasonner plus de cinq pieux en série, afin d'éviter des impacts trop importants dans le cas de défaut sur un pieu. Les différents circuits doivent pouvoir être isolés de façon manuelle par une vanne, dans l'hypothèse d'un dommage sur un tube.

Il est également très fortement conseillé de prévoir une marge au minimum de 5% sur le nombre de pieux équipés afin d'obtenir la fourniture des besoins thermiques, même en cas de défauts sur les tubes.

5 Aspects contractuels, assurances et responsabilités

5.1 Introduction

La mise en place de couvertures d'assurance pour des géostructures thermiques est en devenir, le législateur n'ayant pas réellement statué sur ces nouvelles techniques en cours de développement et dont la réalisation est de plus en plus couramment associée à la construction de nouvelles infrastructures.

A ce sujet, les assureurs, confrontés à la demande de leurs clients, ne peuvent s'appuyer que sur des textes législatifs existants qui concernent pour l'essentiel les installations géothermiques et leur corollaire « la transition énergétique ».

La géothermie étant définie comme une technique qui vise à extraire l'énergie stockée sous la surface de la terre et à s'en servir pour chauffer les bâtiments ou produire de l'électricité, les géostructures thermiques peuvent être considérées comme faisant partie de ce champ de responsabilités.

Par extension, les géostructures thermiques font donc partie des moyens pour produire des énergies renouvelables prioritaires entrant dans la compétence de la nouvelle loi sur la transition énergétique.

Dans ce contexte, le gouvernement entend notamment renforcer l'encadrement des pratiques professionnelles. Ainsi, ces derniers devront être en mesure de justifier de la souscription d'un contrat d'assurance ainsi que du libellé et du montant de la couverture à l'ouverture de tout chantier (*Art. L. 164-1-1*).

On rappellera que le sinistre est un fait dommageable pour soi-même ou pour autrui, de nature à mettre en jeu la garantie de l'assureur.

Bien que l'on ne soit pas encore en mesure d'établir un bilan de sinistralité, en raison du faible nombre de ces géostructures thermiques en fonctionnement, les professionnels devront veiller à analyser, préventivement à l'ouverture des chantiers, leurs risques sur des Tiers. En effet, les dommages survenus seront probablement examinés avec attention par les juges dans le cadre de la loi sur la transition énergétique, seul texte qui semble actuellement susceptible de fournir une base référentielle.

(Voir loi de transition énergétique, arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance).

5.2 Principes de couverture

Les deux grands principes de couverture, qui sont proposés par les assureurs, sont :

- Le défaut de performance ;
- L'atteinte à la destination.

Selon les compagnies d'assurance, le défaut de performance peut ou ne peut pas être couvert. Cela est directement lié à la politique de souscription de chaque compagnie.

Par contre, lorsqu'il y a « atteinte à la destination » (surconsommation d'énergie complémentaire hors de proportion par rapport au programme initial), le défaut de performance est alors pris en charge par la couverture d'assurance.

Les polices qui peuvent couvrir ces ouvrages en totalité ou partiellement en phase de construction avant réception, après réception ou en phase d'exploitation sont (Tableau 9) :

- Tous Risques Chantier (TRC)/Maître d'ouvrage ou tout intervenant (sous réserve d'un dommage matériel) ;
- Tous Risques Montage et Essai (TRME)/Maître d'ouvrage ou tout intervenant (sous réserve d'un dommage matériel) ;
- Décennale/Intervenants (sous réserve d'un dommage matériel) ;
- Responsabilité Civile (RC)/Maître d'ouvrage ou tout intervenant ;
- Responsabilité Civile Décennale (RCD) ;
- Garantie Dommages/Exploitant.

Tableau 9 : Polices d'assurances et intervenants dans le cadre assurantiel des géostructures thermiques

Garantie	Intervenant		
	Entreprise	Maître d'Ouvrage	Exploitant
Ouvrage	TRC/TRME RCD	TRC/TRME	Assurance Dommages
Tiers	RC Entreprise	RC MO	RC Exploitant
Pertes financières	PEA* (volet TRC/TRME)	PEA* (volet TRC/TRME)	PEA* (volet Ass. Dommages)

*PEA : Perte d'Exploitation Anticipée

Actuellement, et dans le cadre de la loi sur la transition énergétique, pour une mobilisation de garanties, il faut qu'un certain nombre de conditions soient réunies pour une prise en charge:

- L'existence de désordres matériels constatés (une simple non-conformité ne sera donc pas suffisante) ;
- La preuve de l'existence du dommage démontrée par le Maître d'Ouvrage ;
- Un dommage qui doit résulter de l'acte de construire (donc non basé sur une présomption de responsabilité) ;

- Etre en capacité de prouver une surconsommation énergétique (exorbitante ou non raisonnable), par rapport à celle initialement prévue, qui sera considérée comme une impropriété à destination (*Art. L. 111-13-1*).

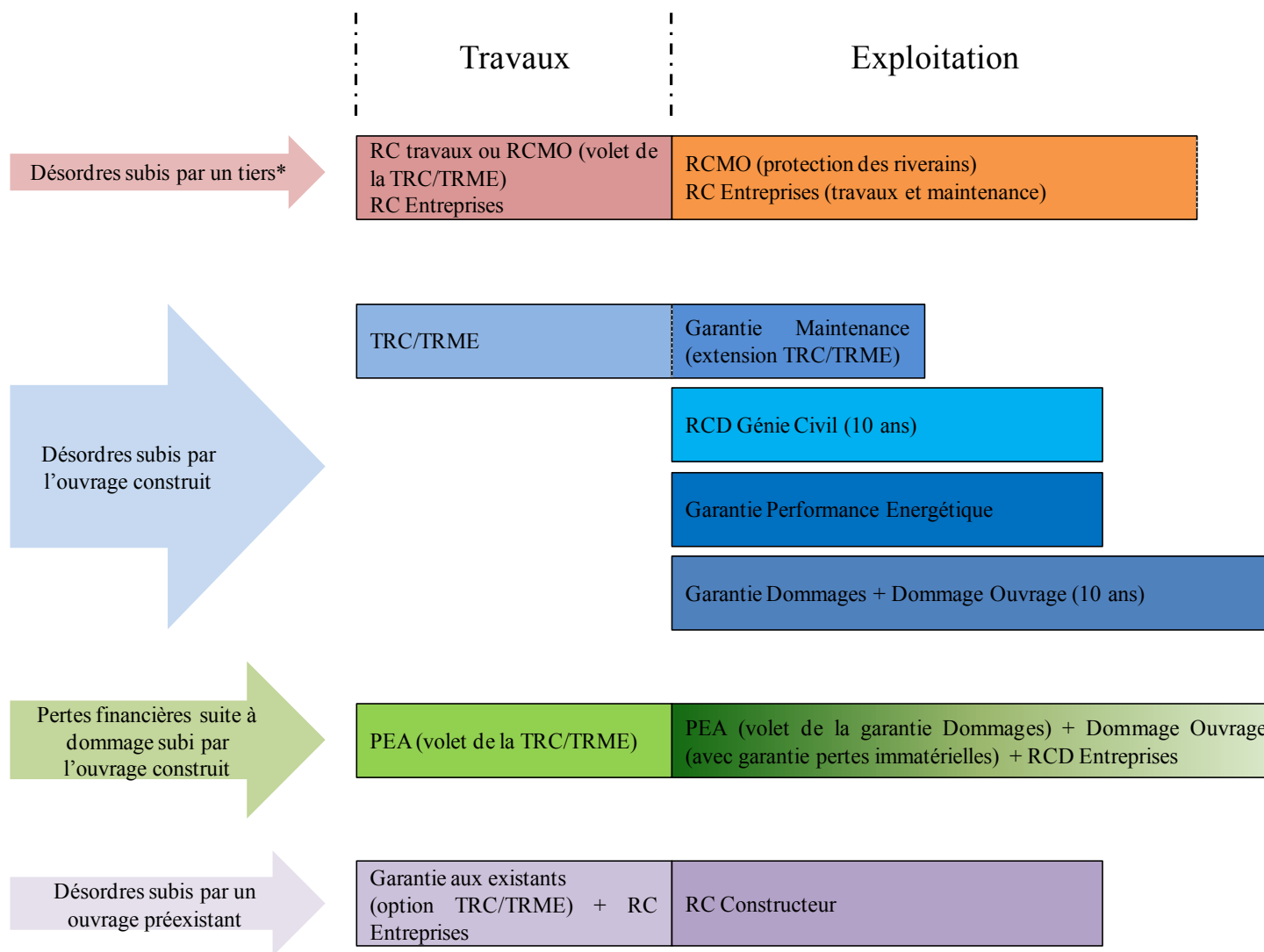
Dans ce cadre, ce n'est pas la seule atteinte à destination qui peut enclencher la garantie et il faudra que toutes les conditions d'usages et d'entretien prises soient considérées comme appropriées.

En l'état, sur la base du texte de loi, pour que la responsabilité de l'entreprise soit recherchée, il faudra donc qu'un grand nombre de conditions aient pu faire l'objet de l'apport de la preuve par les Maîtres d'Ouvrage. Il semblerait donc que le législateur insiste pour que les compagnies d'assurance puissent offrir rapidement la possibilité pour le contractant/exploitant de pouvoir choisir des étendues de polices qui lui offrent des garanties adaptées à ses besoins.

5.3 Approches contractuelles

Les montages contractuels sont les suivants (Figure 18) :

- En cours de travaux :
 - Dommage à l'ouvrage, *intervention de la TRC s'il s'agit de l'ouvrage partie génie civil (ex.: effondrement de parois, rupture des équipements descendus...)* ;
 - Dommage au process, *intervention de la TRME* ;
 - Dommage aux ouvrages préexistants, *intervention de la TRC à condition d'avoir inclus une couverture garantie aux « existants »* ;
 - Dommage à des Tiers, *intervention de la RC travaux de l'entreprise et/ou RC travaux du Maître d'ouvrage (volet de la TRC)*.
- Après réception :
 - Garantie maintenance de la TRC (option pour un ou deux ans), pour le dommage en maintenance visite (lors de la levée des réserves, par exemple), pour le dommage en maintenance étendue du constructeur (défaut de conception, d'exécution et/ou de matériaux) ;
 - Garantie RCD qui couvre en France 10 années, solidité et impropriété à destination, pour le Génie civil (garantie non obligatoire) avec préemption de responsabilité de l'entreprise (1792 du Code Civil, c'est donc à l'entreprise de faire la preuve de l'existence d'une cause étrangère) ;
 - Garantie Dommage aux biens, avec ou non pertes financières exploitation, qui couvre les événements extérieurs (incendie, événements naturels, etc.) sans durée limite tant qu'elle est souscrite ;
 - Garantie performance énergétique qui est encore en devenir avec le texte sur la transition énergétique.



*Tiers = riverains ou autres entreprises (hors constructeurs)

Figure 18 : Montages contractuels dans le cadre des géostructures thermiques

Bibliographie

Abdel-Hadi O. N., Mitchell J. K. (1981). Coupled Heat and Water Flows Around Buried Cables. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **107**(11): pp. 1461-1487.

Arya L.M., Paris J.F. (1981). A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data. *Soil Sci Soc Am J.* **45**: 1023-1030.

Brandl H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, **56**(2): 81-122.

Bourne Webb P., Burlon S., Javid S., Kuerten S. et Loveridge F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and sustainable energy*, **65**: 402-419.

BRGM (2012). Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines - Synthèse bibliographique. Rapport final n° 59387.

Brigaud F. & Vasseur G. (1989). Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. *Geophys. J.*, **98**: 525-542.

Burlon S., Habert J., Suryatriyastuti M.E. et Mroueh H. (2013). Bearing capacity of thermoactive piles. Colloque européen de géothermie EGC 2013.

Burlon S. et Habert J. (2017). Les géostructures énergétiques, Thermomécanique des roches.

Castany G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod, 236 p.

Cekeverac C. et Laloui L. (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **28**: 209-228.

Cote J. & Konrad J. M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Can. Geotech. J.* **42**(2): 443-458.

De Vries D. A. (1961). Thermal Properties of Soils. In *Physics of Plant Environment*. W.R. Van Wijlt. ed. Amsterdam: North-Holland Publishing Co.

Demongodin L. (2015) Communication personnelle.

EPRI (1989). Soil and Rock classification according to thermal conductivity – design of ground-coupled heat pump systems. *Rapport EPRI CU 6482*, 362 pages.

Frank R., & Zhao S.R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **119**: 387-421.

Fromentin A., Pahud D., Jaquier C. & Morath M. (1997). Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme. Rapport final. *Rapport d'étude n°120.104*. Office fédéral de l'énergie, Lausanne, Suisse. 79 p.

- Goto S. and Matsubayashi O. (2009). Relations between the thermal properties and porosity of sediments in the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge. *Earth Planets Space*, **61**: 863–870.
- Habert J. et Burlon S. (2012). Eléments sur le comportement mécanique des fondations géothermiques. JNGG 2012, Bordeaux.
- Habert J. et Burlon S. (2015). Modelling thermo-active diaphragm walls. Second EAGE Workshop on geomechanics and energy, The ground as energy source and storage, 13-15 Octobre 2015.
- Johansen O. (1975). Thermal conductivity of soils. PhD thesis. University of Trondheim, Norway (CRREL Draft Translation 637, July 1977, ADA 044002).
- Kersten M. S. (1949). Thermal Properties of Soils." Bulletin #28. St. Paul: University of Minnesota Engineering Experiment Station.
- Laloui L. et Di Donna A. (2014). Géostructures énergétiques. Lavoisier, 342 p.
- McInnes K. (1981). Thermal conductivities of soils from dry land wheat regions in Easter Washington. MSc thesis. Washington State University. USA.
- Mitchell (1991). Ground Engineer's Reference book, Bell editor. 800 p.
- Pahud, D. (2015). Communication personnelle.
- Reiffsteck P., Couaillier M., Grandjean G. (2014). Validation d'un système de classification thermique des sols. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014, Beauvais, 11 p.
- Reiffsteck P. (2015). Communication personnelle.
- Sauty J.P., Ausseur J.Y. & Menjoz A. (1988). Exploitation thermique du proche sous-sol – manuel pour l'évaluation des projets. *Rapport BRGM-AFME 86-SGN-125-EAU-IRG*, 199 p.
- SIA. (2005). Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance. *SIA D 0190, Zurich, Suisse*. 104 p.
- Skaggs T. H., Arya L. M., Shouse P. J. and Mohanty B. P. (2001). Estimating Particle-Size Distribution from Limited Soil Texture Data. *Soil Sci Soc Am J*. **65**:1038–1044.
- Suryatriyastuti M.E. (2013). Numerical study of the thermo-active piles behavior in cohesionless soils. *Thèse de Génie Civil – Géotechnique*. Lille, Université de Lille 1. 176 p.
- Suryatriyastuti M.E., Burlon S. et Mroueh H. (2015). On the understanding of cyclic interaction mechanisms in a energy pile group. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, **40**(1): 3-24.
- Tarnawski V. R., Leong W. H. (2000). Thermal Conductivity of Soils at Very Low Moisture Content and Moderate Temperatures. *Transport in Porous Media. Kluwer Academic Publishers*. **41**: 137–147.

Tarnawski V. R., Momose T. & Leong W. H. (2009). Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal Conductivity. *Géotechnique* **59**(4): 331–338.

Vasseur G., Brigaud F. & Demongodin L. (1995). Thermal conductivity estimation in sedimentary basins. *Tectonophysics*, **244**: 167-174.

Index des normes citées dans le document

Ces normes sont valables à date de publication de ces recommandations.

ASTM D5334-14: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.

NF EN ISO 17628 : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais géothermiques - Détermination de la conductivité thermique de sol et roche dans les sondes géothermiques.

NF EN 1990/NA : Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures - Annexe nationale à la NF EN 1990: 2003.

NF EN 1997-1 : Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales.

NF EN 1998-5 : Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques.

NF P11-300 : Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

NF P94-011 : Sols : reconnaissance et essais - Description. Identification. Dénomination des sols - Terminologie. Éléments de classification.

NF P94-040 : Sols : reconnaissance et essais - Méthode simplifiée d'identification de la fraction 0/50 mm d'un matériau grenu - Détermination de la granulométrie et de la valeur de bleu.

NF P94-041 : Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide.

NF P94-047 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau - Méthode par calcination.

NF P94-048 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre.

NF P94-050 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

NF P94-051 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

NF P94-052 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration.

NF P94-053 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire - Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.

NF P94-054 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.

NF P94-056 : Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P94-057 : Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.

NF P94-262 : Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes.

NF P94-282 : Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement – Écrans.

NF P94-500 : Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications.

Symboles et unités

		SI	Usuelle
c_p	Capacité thermique massique	J/kg.K	kJ/kg.K
c_v	Capacité thermique volumique	J/m ³ .K	MJ/m ³ .K
D	Diamètre des tubes et des grains	m	mm
E	Module de déformation ou module d'Young	Pa	MPa
$f_{\text{pieu-sol}}$	Relation de mobilisation du frottement axial	Pa	kPa
i	Gradient hydraulique	-	-
K	Perméabilité de Darcy	m/s	m/s
L	Longueur de la fondation	m	m
N	Effort normal	N	kN
$\varnothing$	Diamètre pieu	m	cm
P	Périmètre	m	m
R_{mob}	Résistance mobilisée	Pa	MPa
S	Section	m ²	cm ²
T	Température	K	°C
v_d	Vitesse de Darcy	m/s	m/j
w	Déplacement vertical/tassement	m	mm
α	Coefficient de dilatation thermique longitudinal -	-	-
γ_Q	Coefficients partiels	-	-
Δ	Variation d'une grandeur physique	Unité de la grandeur physique	
ε	Déformation	-	-
λ	Conductivité thermique	W/m.K	W/m.K
ρ	Masse volumique	kg/m ³	kg/m ³
σ	Contraintes	N	kN
ψ	Coefficient de combinaison	-	-

Abréviations

BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
CFMS	Comité Français de Mécanique des Sols
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
DO	Dommage Ouvrage
ELS	Etat Limite de Service
ELU	Etat Limite Ultime
GMI	Géothermie de Minime Importance
HA	Haute Adhérence
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
MO	Maître d'Ouvrage
MOE	Maître d'Œuvre
PAC	Pompe à Chaleur
PEA	Perte d'Exploitation Anticipée
RC	Responsabilité Civile
RCD	Responsabilité Civile Décennale
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGES	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
TRC	Tous Risques Chantier
TRME	Tous Risques Montage et Essai
TRT	Test de Réponse Thermique

Glossaire

Aquifère : formation géologique contenant une nappe (eau) souterraine.

Besoins énergétiques : quantité d'énergie nécessaire au chauffage et au refroidissement.

Capacité portante/Portance : capacité de la fondation à supporter la charge mécanique du bâtiment sus-jacent. Son calcul est détaillé dans les normes d'application françaises NF P94-262 (fondations profondes) et NF P94-282 (écrans de soutènement), relatives à l'Eurocode 7.

Capacité thermique : quantité d'énergie nécessaire à l'augmentation d'une unité de masse (kg) ou de volume (m³) d'un degré.

Charge : force appliquée à un élément de fondation par la structure sus-jacente (ex : le poids propre du bâtiment).

Conductivité thermique : capacité d'un matériau (ex : un sol) à échanger de l'énergie par conduction (grain à grain dans le cas d'un sol).

Contrainte : force par unité de surface (ex : contrainte mécanique liée au poids d'un bâtiment sur la tête d'un pieu). Dans le cadre de la mécanique des milieux continus, une contrainte en compression est comptée positivement et une contrainte en traction est comptée négativement.

Dérive thermique : augmentation ou diminution durable de la température d'un environnement suite à l'utilisation de la géothermie.

Diffusivité thermique : capacité d'un matériau à échanger de l'énergie par conduction lors de phénomènes transitoires.

Domage Ouvrage : Assurance de préfinancement en cas d'atteintes à la structure d'ouvrages de bâtiment ou bien d'impropriété à la destination.

Ecran de soutènement : structure géotechnique permettant, notamment, de maintenir les terrains lors d'un creusement. Elle peut également assurer l'étanchéité de la fouille.

Effort : force extérieure appliquée à un matériau. L'effort peut être d'origine mécanique (ex : poids) ou thermique (ex : dilatation empêchée).

Elancement : rapport entre la longueur et la largeur. Une fondation d'élancement deux implique que sa longueur est deux fois plus grande que sa largeur.

Fluide caloporteur : fluide circulant dans le réseau de tubes échangeurs de chaleur et possédant une capacité thermique élevée.

Géostructure thermique : élément de fondation équipé avec des tubes échangeurs de chaleur afin d'extraire ou d'injecter de l'énergie dans le terrain.

Géothermique minime importance : regroupe toutes les structures géothermiques (sondes, puits, géostructures, etc.) de moins de 500 kW et dont la profondeur est inférieure à 200 m.

Granulométrie : répartition de la taille des grains composant un sol. Elle est déterminée suivant les normes françaises NF P94-056 et NF P94-057.

Justification géotechnique : vérification par le calcul que le dimensionnement géotechnique a été convenablement réalisé. Son calcul est détaillé dans les normes d'application françaises NF P94-262 (fondations profondes) et NF P94-282 (écrans de soutènement), relatives à l'Eurocode 7.

Module de déformation : capacité d'un matériau à se déformer sous la contrainte. Un module faible implique que le matériau va se déformer facilement.

Pompe à Chaleur : système thermodynamique permettant de produire du chaud et/ou du froid grâce au changement d'état d'un fluide réfrigérant.

Panache thermique : zone dans laquelle une variation de température par rapport à l'état initial est visible. Sa forme est dépendante des conditions d'écoulement autour de la source d'énergie.

Perméabilité hydraulique : capacité d'une formation géologique à être traversée par un écoulement d'eau.

Pieu : fondation profonde verticale, souvent circulaire, permettant de transmettre la charge qui lui est appliquée en tête (haut du pieu) au terrain sous la forme de frottement latéral le long de son fût et d'effort en pointe (base du pieu).

Radier : fondation superficielle horizontale, relativement épaisse, recouvrant toute la surface du bâtiment.

Recharge naturelle : remise à l'équilibre thermique du terrain suite à son exploitation géothermique. Elle peut être effectuée par un écoulement d'eau naturel ou par un équilibre entre extraction et injection d'énergie dans le sol dans le temps.

Résistance : capacité d'un matériau à résister à des forces sans rupture mécanique (ex : résistance du terrain, résistance en compression, etc.).

Responsabilité Civile : garantie sur les conséquences pécuniaires de la responsabilité du fait de dommages causés à des Tiers.

Responsabilité Civile Décennale : assurance obligatoire en France pour des pertes ou dommages causés à des Tiers sur une durée de 10 ans.

Ressource géothermique : quantité d'énergie que l'on peut extraire d'un terrain sans affecter durablement sa température.

Rigidité : résistance d'un matériau à la déformation.

Sécurité géotechnique : coefficient correspondant au rapport entre les forces stabilisatrices (ex : portance) et déstabilisatrices (ex : poids). Une sécurité inférieure à 1 implique un désordre dans le massif de sol ou dans la structure.

Sollicitation thermique : application d'un effort à un matériau dû à une variation de sa température.

Stockage saisonnier : principe consistant à faire varier la température d'un milieu durant une saison (ex : chauffer le sol en été) afin d'augmenter son potentiel géothermique pour la saison suivante, tout en conservant un équilibre global annuel.

Terrain : sol, roche ou remblai en place avant la construction.

Test de Réponse Thermique : essai *in situ* consistant à injecter dans le sol de la chaleur, à puissance constante, durant un certain temps (de quelques heures à plusieurs jours) afin d'observer sa réponse. Cet essai permet notamment de déterminer la température initiale du terrain, sa conductivité thermique et sa capacité thermique.

Tous Risques Chantiers : couvre les événements pouvant survenir pendant la durée de chantier atteignant tout ou partie de l'ouvrage.

Tous Risques Montage et Essai : assurance qui couvre les dommages occasionnés aux matériels.

ANNEXE A : Fiche de déclaration type

Dans le cadre d'une démarche de retour d'expérience sur les géostructures thermiques, il est proposé de remplir la fiche de déclaration ci-dessous (Fiche A), puis de la transmettre via le site du CFMS (www.geotechnique.org), afin de mettre ces données à disposition de l'ensemble de la communauté.

Une déclaration annuelle, à l'aide de la fiche B, est préconisée.

Fiche A : déclaration du projet

Identification du projet			
Localisation		Date de mise en service	
Type de bâtiment (R+x, y niveaux de sous-sols)		Fiche remplie par	
Surface chauffée totale		Contact (email)	

Géostructure thermique			
Pieux		Ecran de soutènement	
<i>Généralités</i>		<i>Généralités</i>	
Type (forés tubés, etc.)		Type (paroi moulée, etc.)	
Nombre de pieux		<i>Géométrie</i>	
<i>Géométrie</i>		Longueur (m)	
Diamètre (mm)		Profondeur (m)	
Profondeur min-max (m)		Epaisseur (m)	
Longueur cumulée (m)		<i>Géothermie</i>	
<i>Géothermie</i>		Surface équipée (m²)	
Longueur équipée (m)		Nombre de cages équipées	
Nombre de boucles/pieu		Nombre de boucles/cage	
Géostructures horizontales		Equipement toute hauteur ☐	Fiche mécanique seule ☐
<i>Généralités</i>			Fiche hydraulique seule ☐
Type (radier, etc.)		Remarques	
<i>Géométrie</i>			
Longueur (m)			
Largeur (m)			
Epaisseur (m)			
Profondeur (m)			
<i>Géothermie</i>			
Surface équipée (m²)			

Tubes géothermiques			
Géométrie		Divers	
Longueur totale (m)		Débit (m ³ /h)*	
Diamètre extérieur des tubes (mm)		Concentration en glycol (%)	
Diamètre intérieur des tubes (mm)		Remarques	
Epaisseur des tubes (mm)			

**Ces données sont amenées à évoluer avec le temps et peuvent être suivies pour une meilleure maîtrise du système.*

Pompe à Chaleur géothermique PACg			
Chauffage ☐		Refroidissement ☐	
Température d'entrée à l'évaporateur (°C)*		Température d'entrée à l'évaporateur (°C)*	
Température de sortie au condenseur (°C)*		Température de sortie au condenseur (°C)*	
Puissance chaud Q _c (kW)*		Puissance froid Q _f (kW)*	
Consommation au compresseur W (kW)*		Consommation au compresseur W (kW)*	
COP*		EER*	
Remarques			

**Ces données sont amenées à évoluer avec le temps et peuvent être suivies pour une meilleure maîtrise du système.*

Système géostructure thermique + PACg					
Puissance totale estimée en mode chauffage (kW)*		Durée de fonctionnement annuelle (h)*		Energie annuelle produite en mode chauffage (kWh)*	
Puissance totale estimée en mode refroidissement (kW)*		Durée de fonctionnement annuelle (h)*		Energie annuelle produite en mode refroidissement (kWh)*	
Remarques					

**Ces données sont amenées à évoluer avec le temps et peuvent être suivies pour une meilleure maîtrise du système.*

Besoins du bâtiment à chauffer/refroidir					
Type de chauffage/climatisation					
Système d'appoint (oui/non – Si oui, préciser)					
Puissance de pointe en chaud (kW)*		Besoin annuel en chaud (kWh)*		Quote-part géothermie (%)*	
Puissance de pointe en froid (kW)*		Besoin annuel en froid (kWh)*		Quote-part géothermie (%)*	
Remarques					

**Ces données sont amenées à évoluer avec le temps et peuvent être suivies pour une meilleure maîtrise du système.*

Formations en place					
Formation 1	Géologie		Formation 2	Géologie	
	Type de formation géologique			Type de formation géologique	
	Puissance (m)			Puissance (m)	
	Hydrogéologie			Hydrogéologie	
	Saturation S (%)			Saturation S (%)	
	Perméabilité hydraulique k (m/s)			Perméabilité hydraulique k (m/s)	
	Nappe en écoulement ?			Nappe en écoulement ?	
	Vitesse d'écoulement (m/s)			Vitesse d'écoulement (m/s)	
	Thermique			Thermique	
	Conductivité thermique λ (W/m.K)			Conductivité thermique λ (W/m.K)	
	Capacité thermique volumique c_v (J/m ³ .K)			Capacité thermique volumique c_v (J/m ³ .K)	
	Diffusivité thermique κ (m ² /s)			Diffusivité thermique κ (m ² /s)	

Remarques		Remarques	
------------------	--	------------------	--

Formation 3	Géologie	
	Type de formation géologique	
	Puissance (m)	
	Hydrogéologie	
	Saturation S (%)	
	Perméabilité hydraulique k (m/s)	
	Nappe en écoulement ?	
	Vitesse d'écoulement (m/s)	
	Thermique	
	Conductivité thermique λ (W/m.K)	
	Capacité thermique volumique c_v (J/m ³ .K)	
	Diffusivité thermique κ (m ² /s)	
Remarques		

Formation 4	Géologie	
	Type de formation géologique	
	Puissance (m)	
	Hydrogéologie	
	Saturation S (%)	
	Perméabilité hydraulique k (m/s)	
	Nappe en écoulement ?	
	Vitesse d'écoulement (m/s)	
	Thermique	
	Conductivité thermique λ (W/m.K)	
	Capacité thermique volumique c_v (J/m ³ .K)	
	Diffusivité thermique κ (m ² /s)	
Remarques		

Fiche B : Suivi annuel

Pompe à Chaleur géothermique PACg					
Chauffage ☐			Refroidissement ☐		
Température d'entrée à l'évaporateur (°C)		Température d'entrée à l'évaporateur (°C)			
Température de sortie au condenseur (°C)		Température de sortie au condenseur (°C)			
Puissance chaud Q_c (kW)		Puissance froid Q_f (kW)			
Consommation au compresseur W (kW)		Consommation au compresseur W (kW)			
COP		EER			
Remarques					
Système géostructure thermique + PACg					
Puissance totale estimée en mode chauffage (kW)		Durée de fonctionnement annuelle (h)		Energie annuelle produite en mode chauffage (kWh)	
Puissance totale estimée en mode refroidissement (kW)		Durée de fonctionnement annuelle (h)		Energie annuelle produite en mode refroidissement (kWh)	
Remarques					
Besoins du bâtiment à chauffer/refroidir					
Puissance de pointe en chaud (kW)		Besoin annuel en chaud (kWh)		Quote-part géothermie (%)	
Puissance de pointe en froid (kW)		Besoin annuel en froid (kWh)		Quote-part géothermie (%)	
Remarques					

ANNEXE B : Détermination de la conductivité thermique des sols

On peut distinguer trois approches pour estimer les propriétés thermiques d'un terrain :

- Bibliographique quand aucune mesure *in situ* ou sur prélèvement n'est disponible ;
- Expérimentale en laboratoire à partir d'autres propriétés mesurables sur échantillon ;
- Expérimentale avec des essais *in situ* en grandeur réelle (Test de Réponse Thermique ou TRT).

La conductivité thermique est une grandeur toujours positive. Elle est habituellement exprimée en W/m.K (qui est égale à W/m°C). D'autres unités ont également été utilisées comme les mcal/cm.s.°C, Btu.in/ft².h.°C, Btu/ft.h.°F ou W/°C.cm.

De même, l'inverse de la conductivité thermique, appelée résistivité thermique ρ a été utilisée dans l'étude des sols.

Les facteurs de conversion vers le système métrique (SI) d'unités de mesure sont donnés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Facteurs de conversion de quelques caractéristiques thermiques usuelles

Caractéristique	Symbole	Unité originale	Facteur multiplicatif	Unité SI
Conductivité thermique	λ	mcal/cm.s.°C	0,4184	W/m.K
Conductivité thermique	λ	kcal/m.hr.°C	1,1622	W/m.K
Conductivité thermique	λ	Btu.in/ft².hr.°F	0,1442	W/m.K
Conductivité thermique	λ	Btu/ft.hr.°F	1,731	W/m.K
Conductivité thermique	λ	cal/cm.s.°C	418,4	W/m.K
Pression	P	atm	101,3250	kPa
Energie	E	cal	4,1868	J
Capacité thermique massique	c	cal/g.°C	4186,8	J/kg.K
Température	T	°F	$t_K = (t_F + 459,67) * 5/9$	K
Température	T	°C	$t_K = (t_C + 273,15)$	K

Les paragraphes ci-après présentent quelques méthodes d'estimation fondées sur la mesure de paramètres accessibles au laboratoire.

B.1. Estimation de la conductivité par corrélation

Il existe de nombreux modèles semi-empiriques, couramment utilisés, de détermination de la conductivité thermique. Il s'agit, notamment, des méthodes analytiques de Kersten (1949), de Vries (1961), Johansen (1975) et de Johansen modifiée par Tarnawsky (2000). Une présentation et une comparaison de ces différentes méthodes a été proposée par Reiffsteck (2014).

Pour utiliser ces méthodes et classer les sols (NF P94-011 et NF P11-300), il est nécessaire de connaître :

- les pourcentages des matériaux constitutifs : sable, limon et argile des matériaux (NF P94-040, 41, 56 et 57) ;
- le poids volumique sec et humide (NF P94-053 et 54) ;
- la teneur en eau et les limites d'Atterberg (NF P94-050, 51, 52) ;

- la teneur en silice, en matière organique et en carbonate (NF P94-048, 047 et essais de Diffractométrie aux Rayons X DRX).

B.2. Calcul de la conductivité par approche minéralogique

En considérant un sol comme un assemblage minéral poreux, la conductivité thermique peut être efficacement approchée à partir de trois grandeurs mesurables en laboratoire :

- La composition minéralogique de la phase solide ;
- La porosité totale (n) ;
- La teneur en eau volumique (θ).

De nombreux travaux théoriques et expérimentaux (Brigaud F. & Vasseur G., 1989 ; Vasseur G. *et al*, 1995 ; Piggot A.R & Elsworth D., 1992) ont montré que la conductivité thermique d'un matériau peut être estimée à 10% près au moyen d'un modèle géométrique. En considérant un milieu à trois phases, solide (s), eau (w) et air (a), son expression prend la forme :

$$\lambda = \lambda_w^\theta \cdot \lambda_a^{n-\theta} \cdot \lambda_s^{1-n}$$

La conductivité thermique de la phase solide est donnée de la même façon par la relation :

$$\lambda_s = \prod_i \lambda_i^{x_i}$$

Où λ_i et x_i représentent respectivement la conductivité thermique et la fraction volumique de la phase minérale, avec :

$$\sum_i x_i = 1 - n$$

L'application de cette méthode nécessite bien entendu de disposer d'analyses minéralogiques, de mesures de porosité et de teneur en eau (pour des sols non saturés) sur quelques échantillons de sols intacts. Elle reste simple d'usage et ne nécessite aucun moyen de mesure spécifique (aiguille chauffante, barre divisée, etc.). Par ailleurs, elle est également applicable pour le calcul de la diffusivité thermique (Goto S. & Matsubayashi O., 2009).

B.3. Calcul de la conductivité par test in situ

Concernant les Tests de Réponse Thermique, on se référera à la norme pr NF EN ISO 17628.

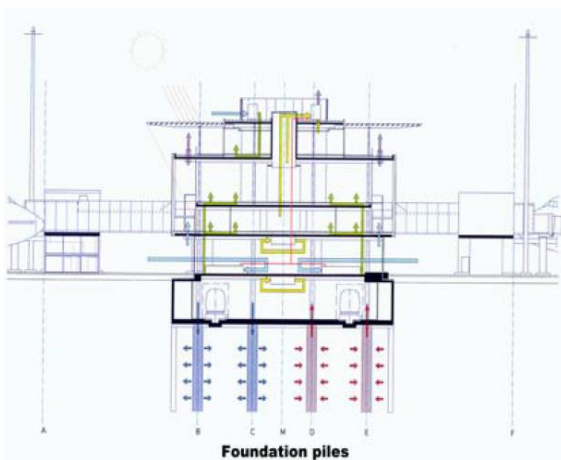
ANNEXE C : Exemple de réalisation : Aéroport de Zürich

Avec l'aimable autorisation de Daniel Pahud.

Dock Midfield: Concept, dimensionnement et performances thermiques mesurées



Dock Midfield (terminal E) – aéroport de Zürich



Terminal pour 26 avions

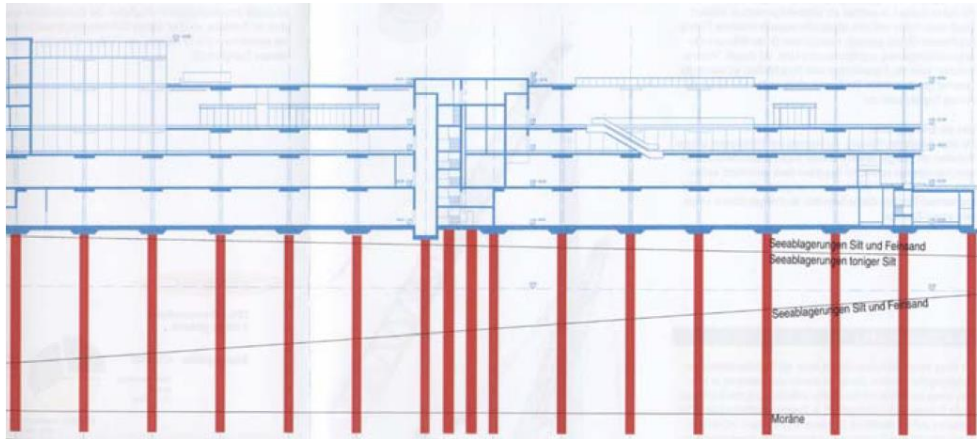
Bâtiment 500x30m

SRE: 58'000 m²

Volume chauffé: 200'000 m³

SIA: 500'000 m³

Terminal E – aéroport de Zürich



Pieux moulés: env. 350 de 30m – gros diamètres 1.5m

3
Dock Midfield

Terminal E – aéroport de Zürich

Planification:
1995 – 2000

Construction:
2000 – 2002

Mise en service:
Sept. 2003

Coût bâtiment:
Env. 329 MCHF

Mesure système pieux
énergétiques:
sept. 2004 – sept. 2006

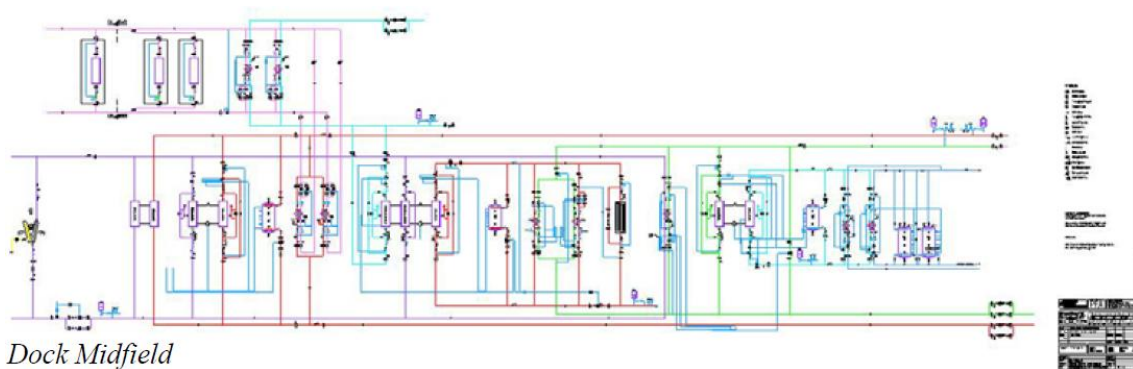


4

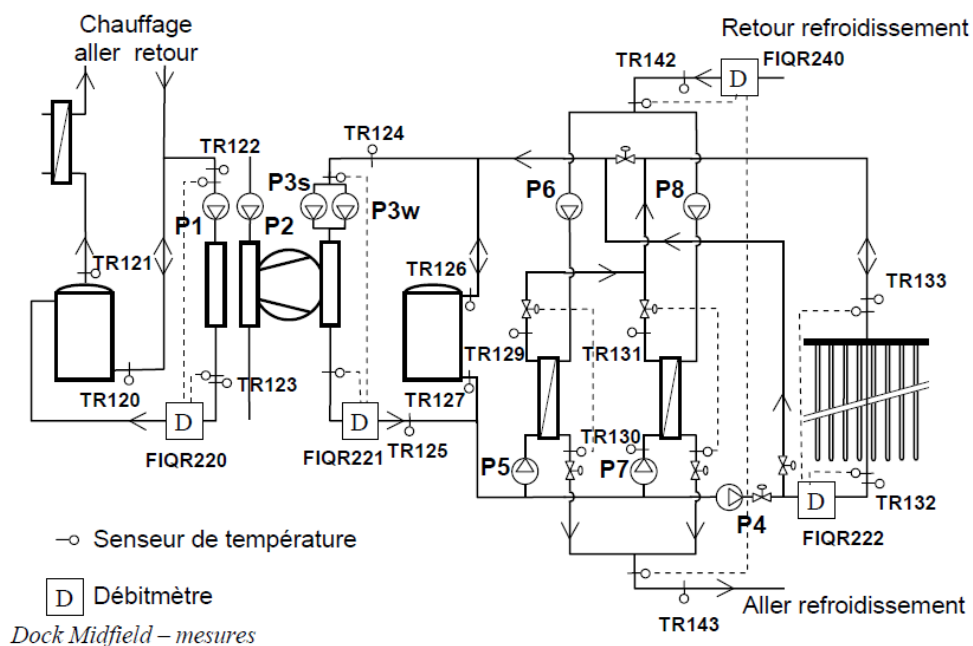
Dock Midfield

Volonté de la part du maître d'ouvrage d'utiliser les pieux dans le concept énergétique du bâtiment

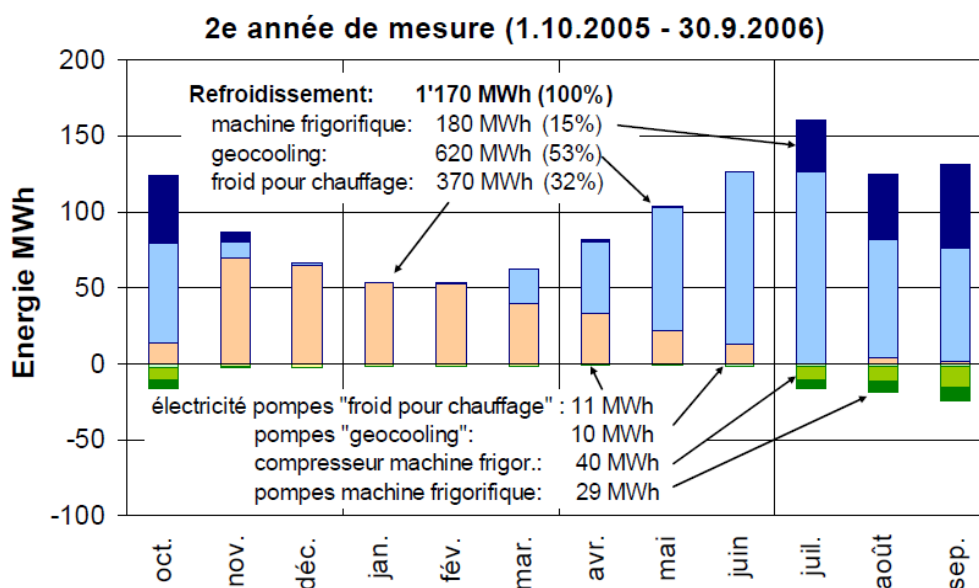
➡ Système bivalent en chauffage et en refroidissement (geocooling)



Points de mesure



Cooling - mesures



Efficacité geocooling: 61

9

Performances thermiques du système

Indices de performance

Coefficient de performance annuel de la PAC (**COPA**)
 Efficacité de refroidissement direct pour le chauffage (**DirCoolHeat**)
 Efficacité de geocooling (**GeoCool**)
 Efficacité annuelle de la machine frigorifique (**EffCOMA**)
 Efficacité globale annuelle du système (**SystEff**)

*) Fraction d'énergie : part d'énergie relative à l'énergie totale fournie par le système couplé aux pieux (chaud + froid)

Mesures	Design
Fraction d'énergie*)	
3.9	65%
33	11%
61	18%
2.7	5%
5.1	100%

Pieux: ratio injecté (cooling) sur extrait (chauffage) 41% 36%

Sans la machine frigorifique, l'efficacité globale du système augmenterait de 5.1 à 5.7

10

Terminal E – observations finales

- Les bonnes performances thermiques du système confirment le bien fondé et la justesse de la procédure de planification suivie
- Efficacité globale du système supérieure à 5
- Temps de remboursement du système estimé à environ 8 ans
- Attention à l'intégration du système dans le concept énergétique du bâtiment
- Attention aux niveaux de température dans les distributions d'énergie
- Attention aux consommations électriques des pompes de circulation

ANNEXE D : Combinaisons d'action

Dans le cas d'un pieu énergétique, l'action thermique Q_{th} est assimilée à une charge variable. Elle peut être, selon les cas :

- une variation d'effort normal, notée ΔN_{th} ;
- une variation de résistance géotechnique mobilisée, notée $\Delta R_{mob,th}$.

Les combinaisons d'action E_d présentées au paragraphe 7.2 de la norme NF P94-262 sont considérées, pour déterminer :

- l'effort normal en tête de pieu, à comparer à la résistance géotechnique ;

$$E_d \leq R_{dGEO}$$
- l'effort normal dans le pieu, à comparer à la résistance des matériaux constitutifs du pieu.

$$E_d \leq R_{dSTR}$$

Ces combinaisons sont rappelées ci-dessous.

- ELU durable et transitoire :

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj,sup} G_{kj,sup} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj,inf} G_{kj,inf} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\}$$

- ELU accidentel :

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{kj,sup} + \sum_{j \geq 1} G_{kj,inf} + A_d (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\}$$

- ELS caractéristique :

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{kj,sup} + \sum_{j \geq 1} G_{kj,inf} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\}$$

- ELS fréquent :

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{kj,sup} + \sum_{j \geq 1} G_{kj,inf} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\}$$

- ELS quasi-permanent :

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{kj,sup} + \sum_{j \geq 1} G_{kj,inf} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\}$$

Ces expressions peuvent généralement être déclinées aux cas de fondations profondes géothermiques soumises uniquement aux sollicitations verticales suivantes :

- des charges permanentes défavorables (pour la portance) notées G^{10} ;
- une charge variable Q_1 et une charge d'accompagnement Q_2 défavorables (pour la portance, *ie* en compression), autres que celle liée à la géothermie ;
- la charge variable liée à la géothermie notée Q_{th} .

Dans ces conditions, et par exemple lors du réchauffement du pieu géothermique ($\Delta T > 0$), la portance du sol est plus critique et l'effort normal dans le pieu est maximal.

Les expressions suivantes peuvent alors être utilisées :

- ELU durable et transitoire¹¹ :
 - réchauffement : le plus défavorable entre :
 - $\gamma_G G + \gamma_Q Q_1 + \gamma_Q \Psi_{0,th} Q_{th}(\Delta T > 0) + \gamma_Q \Psi_{0,2} Q_2^{12}$;
 - $\gamma_G G + \gamma_Q Q_{th}(\Delta T > 0) + \gamma_Q \Psi_{0,1} Q_1 + \gamma_Q \Psi_{0,2} Q_2$;
 - refroidissement : $G + \gamma_Q Q_{th}(\Delta T < 0)$.
- ELS caractéristique :
 - réchauffement : le plus défavorable entre :
 - $G + Q_1 + \Psi_{0,th} Q_{th}(\Delta T > 0) + \Psi_{0,2} Q_2$;
 - $G + Q_{th}(\Delta T > 0) + \Psi_{0,1} Q_1 + \Psi_{0,2} Q_2$;
 - refroidissement : $G + Q_{th}(\Delta T < 0)$.
- ELS quasi-permanent :
 - réchauffement : $G + \Psi_{2,th} Q_{th}(\Delta T > 0) + \Psi_{2,1} Q_1 + \Psi_{2,2} Q_2$;
 - refroidissement : $G + \Psi_{2,th} Q_{th}(\Delta T < 0)$.

10 Les valeurs de G , Q_i et Q_{th} présentées sont les valeurs caractéristiques.

11 Selon la norme NF EN 1990:2005, $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ pour les actions défavorables.

12 Les valeurs des facteurs de combinaison sont données dans le texte et rappelées ici :

- $\Psi_{0,th} = 0,6$;
- $\Psi_{1,th} = 0,5$;
- $\Psi_{2,th} = 0,2$.

ANNEXE E : Exemple de justification de pieux énergétiques

Dans le cadre de la rédaction de ce document, un exercice de prévision a été organisé afin de comparer et de caler les différentes méthodes de calculs.

E.1. Présentation de l'exemple

E.1.1. Localisation du complexe

L'ouvrage étudié dans l'exemple se situe à Sept-Sorts (77). Il s'agit d'un élément d'un complexe de traitement des eaux. Le bâtiment de prétraitement est fondé sur pieux.

E.1.2. Géométrie de l'ouvrage

Le bâtiment de prétraitement a une emprise d'environ 15 m x 40 m.

Il est fondé sur cent deux pieux de diamètre 420 mm réalisés à la tarière creuse. Il contient deux niveaux de radier. Le radier principal se situe à la cote +53,35 m NGF. Sous ce radier, six rangées de seize pieux sont installés, soit une maille de 2,04 m (axe Est-Ouest) par 2,38 m (axe Nord-Sud). De même, le radier du bâtiment annexe situé à +57,15 m NGF est fondé sur six pieux (Figure 19).

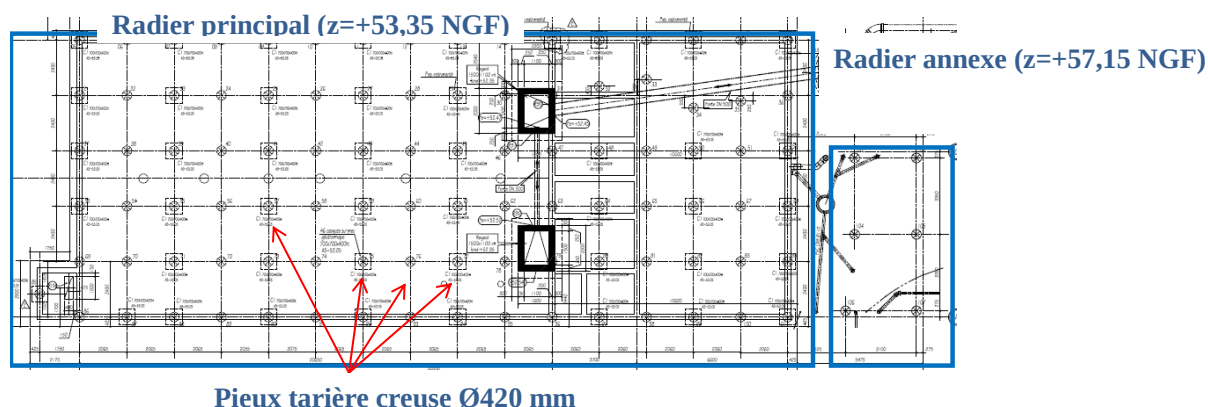


Figure 19 : Implantation des pieux sous le bâtiment de prétraitements

Dans les calculs, les pieux sont considérés ancrés d'au moins 50 cm dans le Calcaire Grossier à la cote +42,35 m NGF, soit des pieux de 11 m de long sous le radier principal et de 15,1 m de long sous le radier annexe.

Il est à noter que tous les pieux de la structure ne sont pas équipés d'échangeurs thermiques. Les calculs sont effectués dans le cas où une rangée de pieux sur deux est constituée de pieux géothermiques (Figure 20), soit quarante-quatre pieux géothermiques sur cent deux.

Les caractéristiques mécaniques des sols rencontrés sous le projet sont résumées ci-dessous (Tableau 11) :

Tableau 11 : Paramètres géotechniques retenus

Géologie	Pression limite nette p_l^* (MPa)	Module pressiométrique E_M (MPa)	Coefficient rhéologique de Ménard α	Cohésion effective c' (kPa)	Angle de frottement interne φ' (°)	Frottement latéral limite q_s (kPa)	Facteur de portance k_p (kPa)
Remblais	0,4	3,8	0,5	0	25	45	1,3
Alluvions modernes	0,5	5	0,5	0	30	50	1,3
Marnes et caillasses altérées	1	11	0,33	5	25	130	1,6
Marnes et caillasses	2	30	0,5	10	25	153	1,6
Calcaire grossier	>5	100	0,5	50	30	192	1,6

E.1.5. Cas de charge

Dans toutes les modélisations, il est considéré trois étapes/phases de modélisation :

- Un chargement mécanique correspondant à la combinaison G+Q de l'ouvrage plein (les bassins du bâtiment sont remplis d'eau) ;
- Un réchauffement de tous les pieux géothermiques de l'ouvrage de +10 °C (d'une température de +10 °C à +20 °C) ;
- Puis un refroidissement de -20 °C de ces mêmes pieux (d'une température de +20 °C à 0 °C).

Les résultats se focalisent sur deux pieux géothermiques :

- Le pieu 21 activé thermiquement. Il se situe sous un voile périphérique de l'ouvrage ;
- Le pieu 27 également activé thermiquement et qui se situe directement sous le radier d'épaisseur 30 cm.

Deux autres pieux sont aussi considérés :

- Le pieu 22 sans activation thermique. Il se situe à proximité du pieu 21 ;
- Le pieu 28 à côté du pieu 27, également sans activation thermique.

Le chargement mécanique correspondant à la combinaison G+Q de l'ouvrage plein en tête de chacun de ces pieux est la suivante (Tableau 12) :

Tableau 12 : Charges mécanique en tête

Pieu	21	22	27	28
Charge mécanique en tête (kN)	430	321	263	257

E.2. Modélisation d'un pieu énergétique

E.2.1. Principe

Le pieu n°21 est étudié. Afin de tenir compte de l'interaction sol-pieu, une modélisation verticale 1D du comportement du pieu en retenant une méthode aux courbes de transfert est réalisée. Le sol est ainsi modélisé par des courbes d'interactions sol-pieu. Les formulations proposées par Frank et Zhao (1982) sont retenues.

E.2.2. Modèle géotechnique et mécanique

Le modèle géotechnique est présenté ci-dessous. Il est nécessaire de préciser le caractère « fin » ou « grenu » des terrains traversés afin de pouvoir choisir les courbes de Frank et Zhao appropriées.

Par ailleurs, concernant la modélisation du pieu :

- Béton : ce matériau est considéré élastique¹³ et son module de déformation est pris égal, selon les cas :
 - Au module à long-terme pour le chargement mécanique, E_{LT} ;
 - Au module de déformation à moyen terme sous chargement thermique, E_{MT} .
- Les aciers sont négligés.

E.2.3. Phasage de chargement et conditions aux limites

Le calcul est mené en deux temps :

- Application de la charge mécanique (module du béton à long terme) correspondant aux charges permanentes. Du fait du caractère particulier de l'ouvrage, deux calculs distincts seront menés, en considérant :
 - Le bassin vide : 296 kN ;
 - Le bassin rempli : 430 kN.
- Application de la charge thermique, de plus ou moins 10°C.

Afin d'apprécier l'influence des conditions aux limites, l'exercice est mené en supposant successivement :

- Pieu libre en tête ;
- Pieu bloqué en tête ;
- Rigidité de la structure en tête issue de la modélisation globale de la structure (et présentée au 0) égale à 1180 MN.m⁻¹.

E.2.4. Résultats

Les éléments sont analysés en regardant distinctement la répartition des efforts en fonction de la profondeur et le déplacement vertical en tête de pieu.

¹³ Si des efforts de traction apparaissent, il est loisible de tenir compte dans la modélisation de la fissuration du béton au-delà de sa limite en traction.

E.2.4.1. Chargement mécanique

E.2.4.1.1. Effort vertical

L'effort vertical sous le seul chargement mécanique est présenté sur la Figure 22, en retenant les deux conditions de chargement en tête.

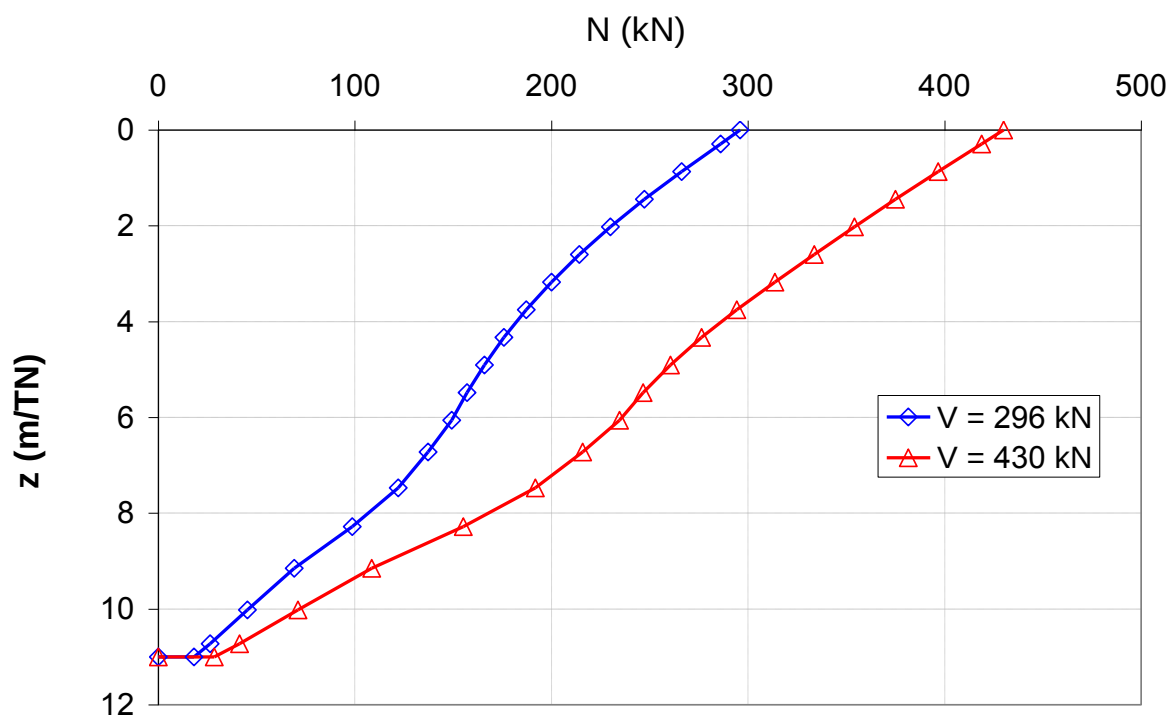


Figure 22 : Effort vertical sous chargement mécanique

E.2.4.1.2. Tassements

- Chargement en tête égal à 296 kN : 1,28 mm¹⁴ ;
- Chargement en tête égal à 430 kN : 1,99 mm.

E.2.4.2. Chargement thermique

Sous chargement thermique, la répartition des efforts verticaux et le tassement en tête de pieu sont ensuite déterminés. Néanmoins, afin d'introduire l'effort vertical dans les justifications, la variation d'effort vertical entre le chargement thermique et le chargement mécanique sera plus spécifiquement étudiée. En parallèle, la résistance additionnelle mobilisée lors du chargement thermique sera présentée.

¹⁴ Le nombre de chiffres représentatifs retenus n'a vocation qu'à permettre la comparaison entre les différents résultats.

E.2.4.2.1. Effort vertical

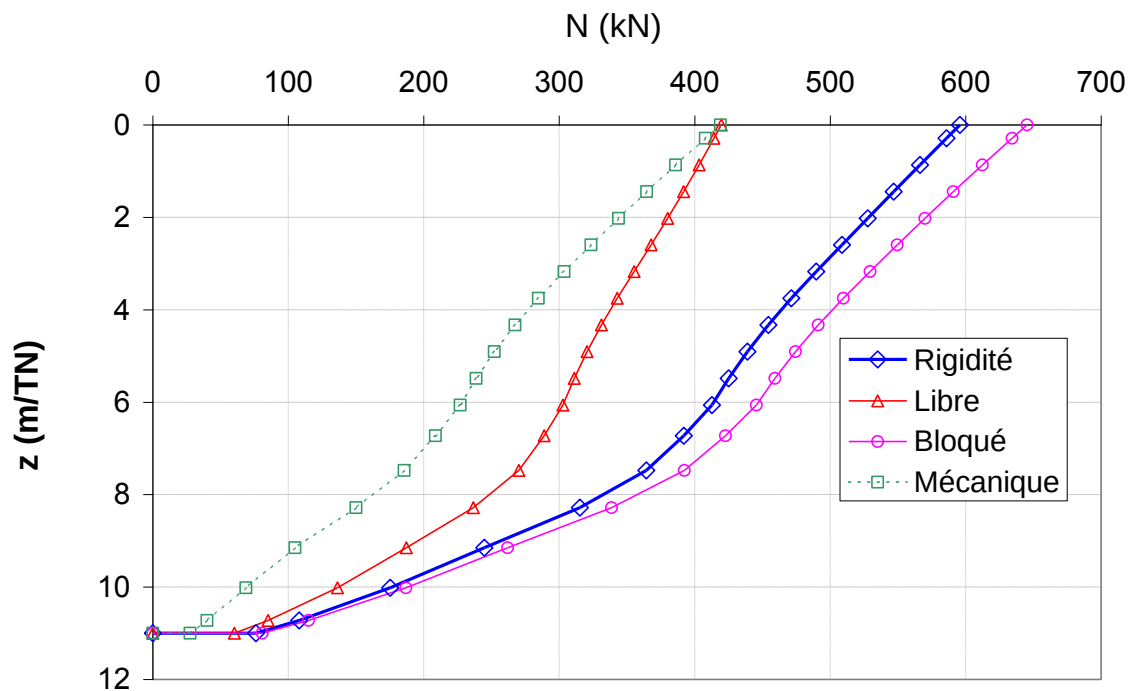


Figure 23 : Effort vertical sous chargement thermique

Sur la Figure 23, l'effort vertical est d'abord présenté uniquement pour le cas du pieu initialement chargé mécaniquement à 430 kN puis réchauffé.

Les données peuvent donc être ensuite présentées en ne retenant que la variation d'effort normal ΔN , comme présenté sur la Figure 24, pour un pieu initialement chargé à 430 kN.

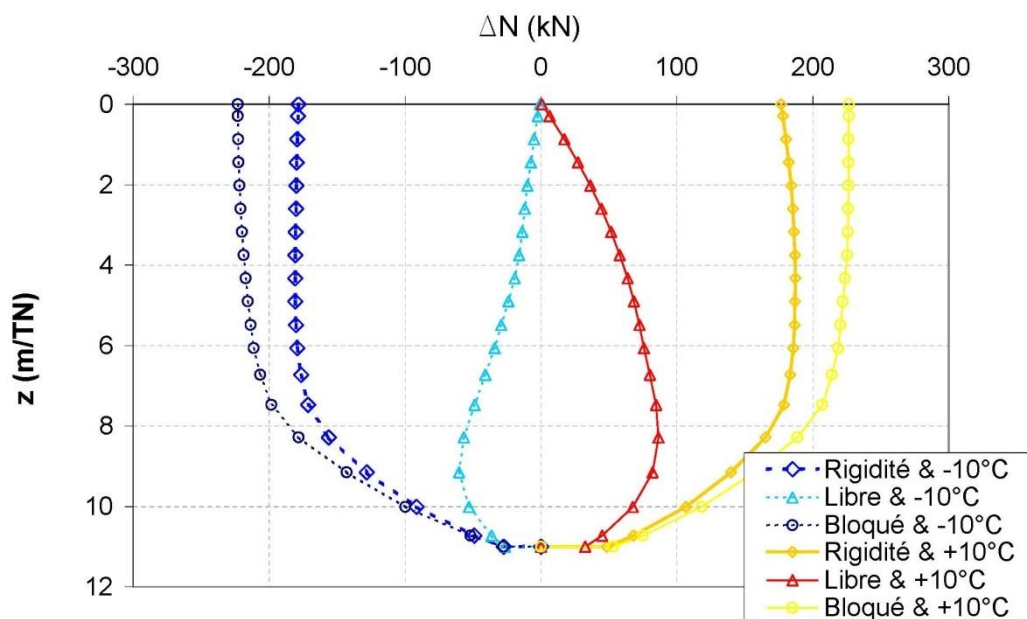


Figure 24 : Variations d'effort normal pour un pieu chargé thermiquement sous une charge initiale mécanique de 430 kN

Les valeurs minimales et maximales de l'effort vertical sont par ailleurs reportées dans les deux tableaux suivants (Tableau 13 &

Tableau 14) :

Tableau 13 : Valeurs minimales des efforts obtenues lors du chargement thermique

$N_{min} \text{ (kN)}$					
$V_{tête} \text{ (kN)}$		296		430	
$\Delta T \text{ (°C)}$		-10°C	+10°C	-10°C	+10°C
Conditions en tête	Libre	-6	51	2	429
	Rigidité calculée	-55	0	-20	251
	Bloqué	-76	71	-34	207

Tableau 14 : Valeurs maximales des efforts obtenues lors du chargement thermique

$N_{max} \text{ (kN)}$					
$V_{tête} \text{ (kN)}$		296		430	
$\Delta T \text{ (°C)}$		-10°C	+10°C	-10°C	+10°C
Conditions en tête	Libre	295	297	429	431
	Rigidité calculée	121	473	251	607
	Bloqué	75	524	207	656

NB : les tractions sont négatives et les compressions positives.

Il peut être noté que certains efforts de traction apparaissent, selon les conditions de rigidité en tête. Néanmoins cet effort reste sensiblement inférieur à la résistance en traction du béton, et il n'y a pas lieu de tenir compte de sa fissuration éventuelle.

E.2.4.2.2. Variation de résistance mobilisée

La variation de résistance mobilisée, égale par ailleurs à la variation d'effort normal en tête, est reportée dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Variation de résistance mobilisée lors du chargement thermique

$\Delta R_{mob} (kN)$					
$V_{tête} (kN)$		296		430	
$\Delta T (°C)$		-10°C	+10°C	-10°C	+10°C
Conditions en tête	Libre	-1			
	Rigidité calculée	-175	177	-179	177
	Bloqué	-221	228	-223	226

E.2.4.2.3. Déplacement vertical de la tête de pieu

Enfin, les déplacements sont présentés pour les différentes conditions en tête dans le Tableau 16, ci-dessous.

Tableau 16 : Déplacements induits par le chargement thermique

$w (mm)$					
$V_{tête} (kN)$		296		430	
$\Delta T (°C)$		-10°C	+10°C	-10°C	+10°C
Conditions en tête	Libre	0,752	-0,659	0,813	-0,659
	Rigidité calculée	0,148	-0,150	0,151	-0,150
	Bloqué	0			

E.2.4.2.4. Analyse

Les calculs menés, faisant intervenir différentes conditions en tête, montrent l'importance de ce paramètre sur les variations d'effort et de déplacement en tête du pieu, mais aussi des efforts le long du pieu, et en particulier de l'effort normal maximal.

E.3.Prise en compte de la structure portée

Pour effectuer la modélisation, trois approches sont considérées :

- Une approche en fourchette où le pieu est considéré libre en tête ou bloqué en tête lors de la phase thermique ;
- Une approche par ressort où la structure est modélisée par une rigidité en tête de chaque pieu en phase thermique ;
- Une approche où la structure est modélisée en tête des pieux, soit à l'aide d'éléments finis, soit à l'aide d'une matrice de rigidité.

E.3.1. Calcul en fourchette

Pour cette approche, deux calculs sont effectués pour chaque pieu géothermique :

- Un calcul où le pieu est bloqué en tête lors des phases thermiques (déplacement nul mais effort maximal) ;
- Un calcul où le pieu est libre en tête lors des phases thermiques (déplacement maximal mais effort nul).

Comme chaque modèle de pieux est indépendant, les pieux non géothermiques ne subissent aucune sollicitation supplémentaire due aux changements de températures.

Les résultats de la Figure 25 et de la Figure 26 montrent l'évolution des pieux 21 et 27 (pieux géothermiques) dans les cas libres en tête et bloqué en tête. Les autres pieux n'évoluent pas dans ce modèle.

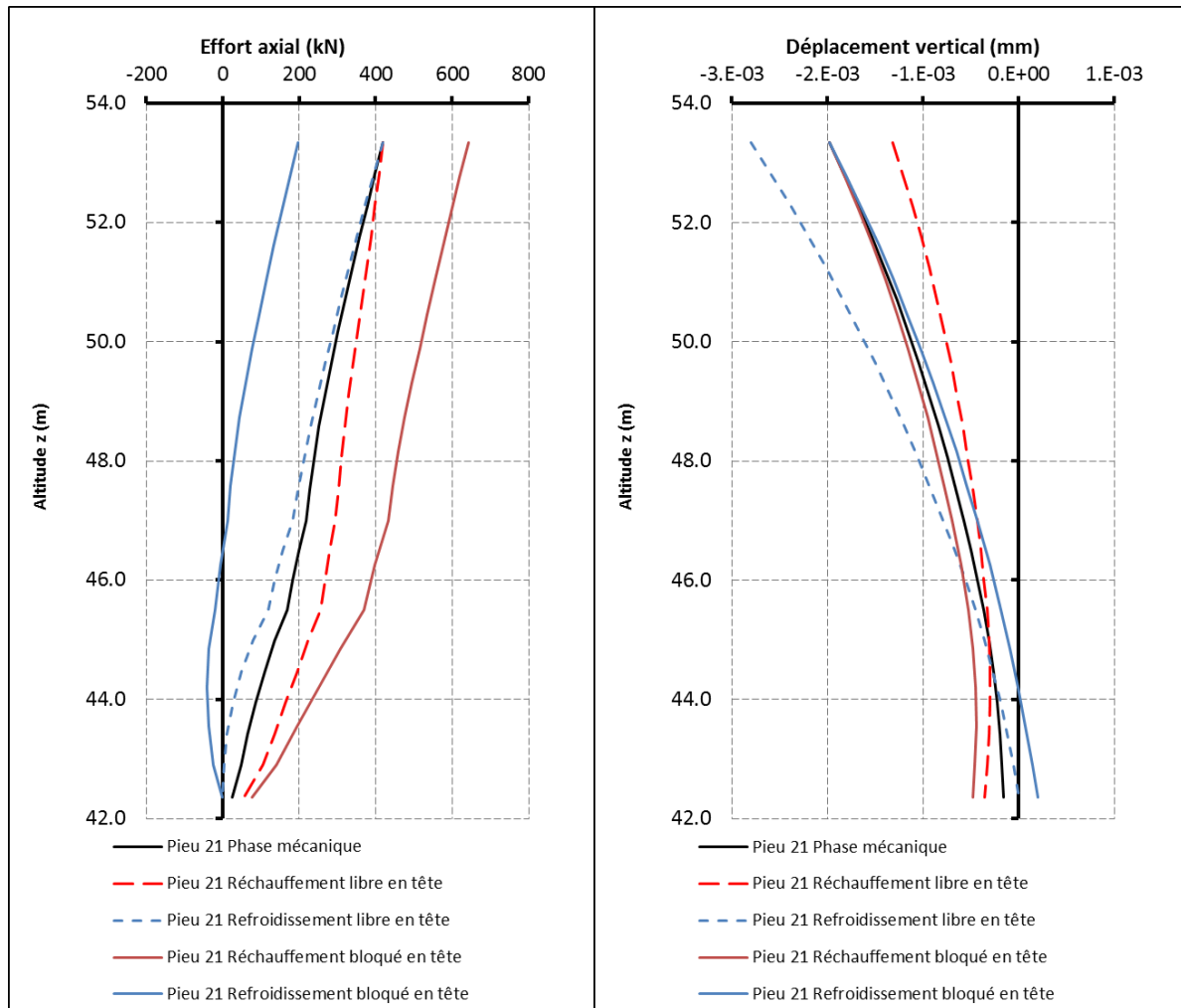


Figure 25 : Déplacement et effort dans le pieu 21 bloqué ou libre en tête

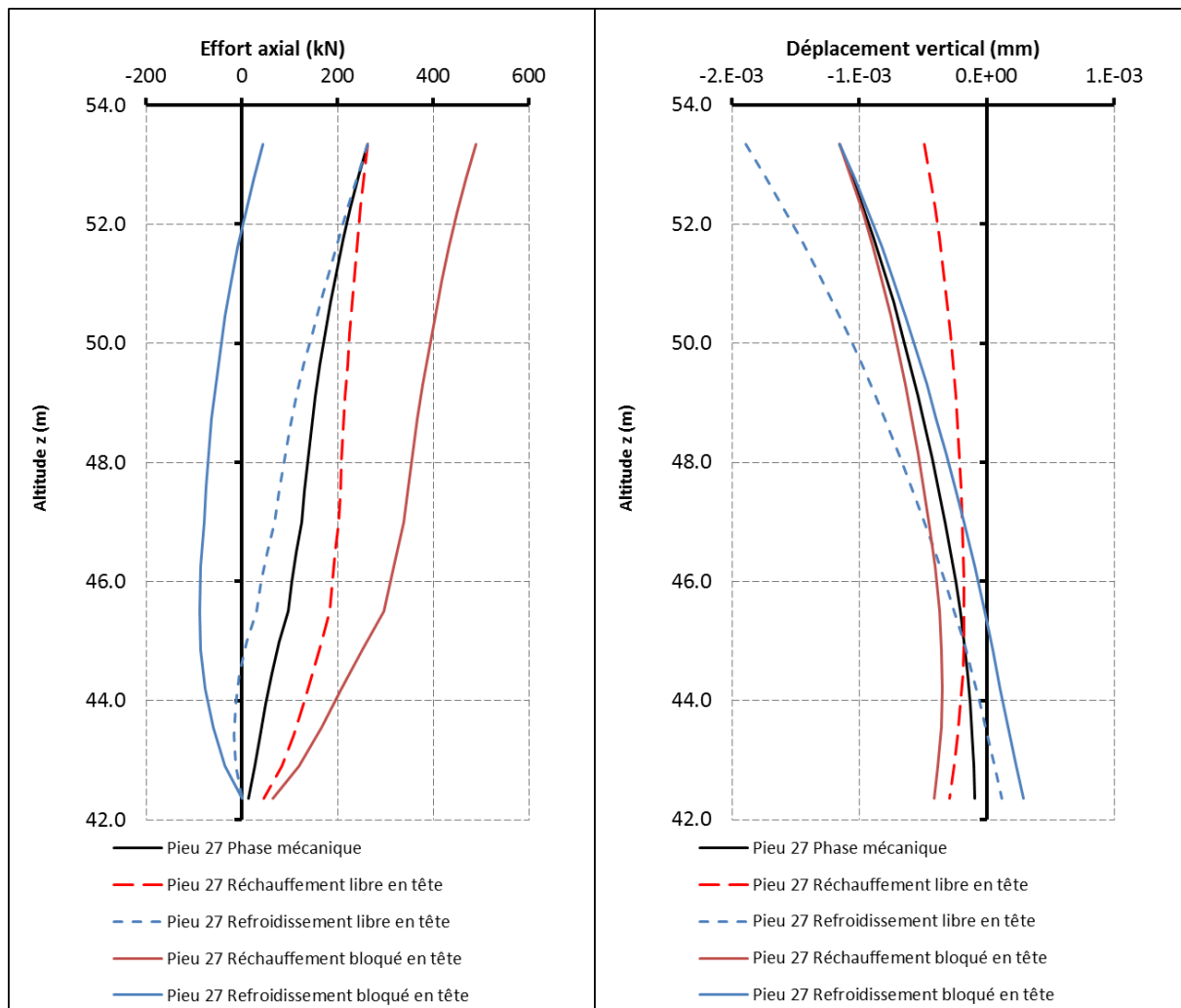


Figure 26 : Déplacement et effort dans le pieu 27 bloqué ou libre en tête

Pour les deux pieux, le supplément d'effort en tête lié au réchauffement est $\Delta N = 225$ kN (pour le modèle de pieu bloqué en tête) et la dilatation des pieux induite par le réchauffement de 10°C est $\Delta u = 0,66$ mm (pour le modèle libre en tête).

E.3.2. Méthode des ressorts

Dans cette méthode, la structure en tête du pieu est représentée par un ressort en tête de chaque pieu dont la rigidité peut être déterminée :

- En estimant par des méthodes analytiques la rigidité des éléments en tête (longrines, cloisons, radiers, etc.) et en tenant compte des autres fondations situées à proximité, et de leur fonctionnement géothermique éventuel ;
- A partir d'un calcul structure aux éléments finis (Calcul ressorts EFS). Dans le modèle, la rigidité au-dessus du pieu 21 situé sous un voile est de $1\,180$ MN/m, la rigidité au-dessus du pieu 27 situé sous un radier (donc plus souple) est de 169 MN/m.

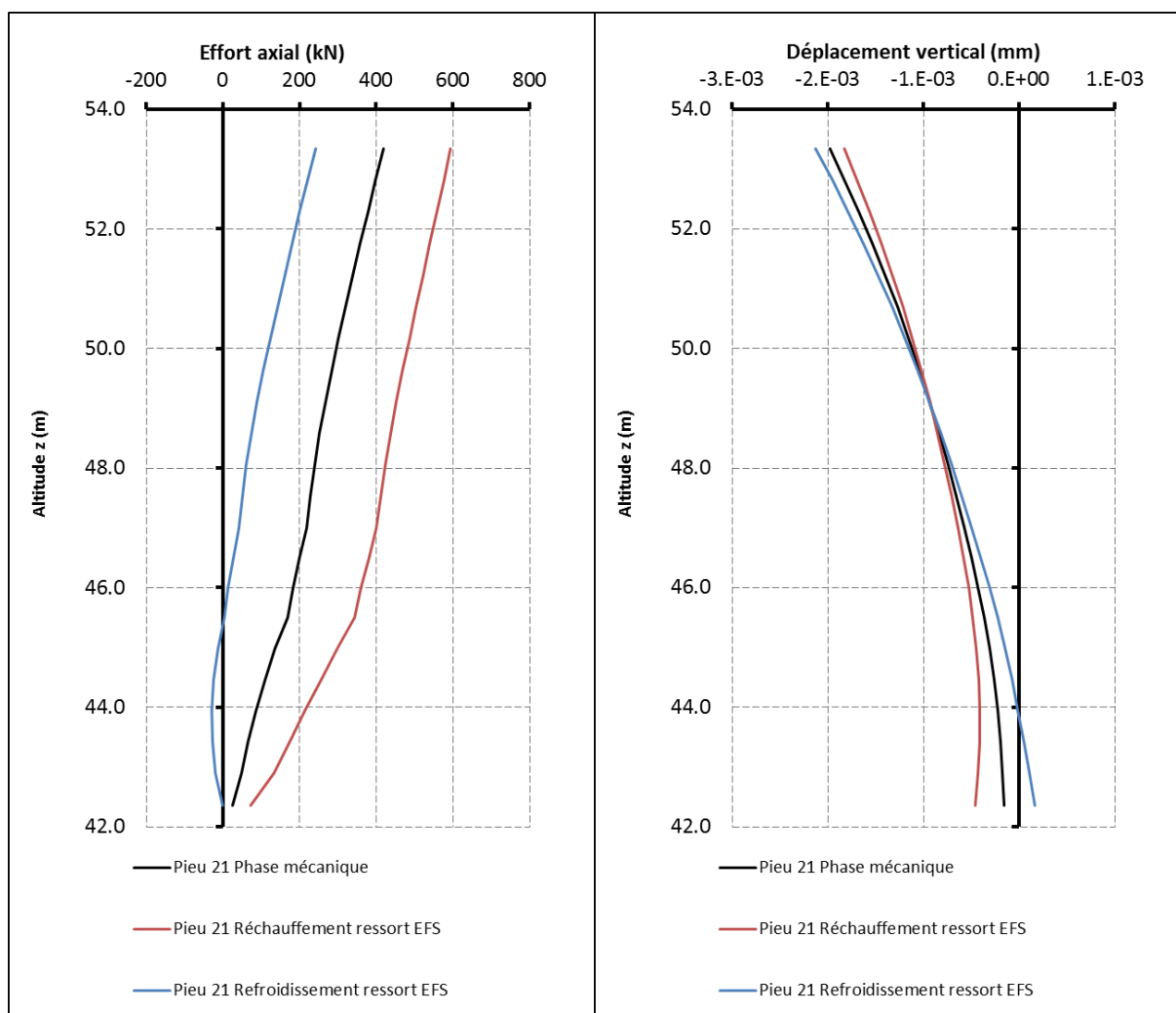


Figure 27 : Déplacement et effort dans le pieu 21 avec rigidité en tête (établi à l'aide d'un calcul éléments finis structure)

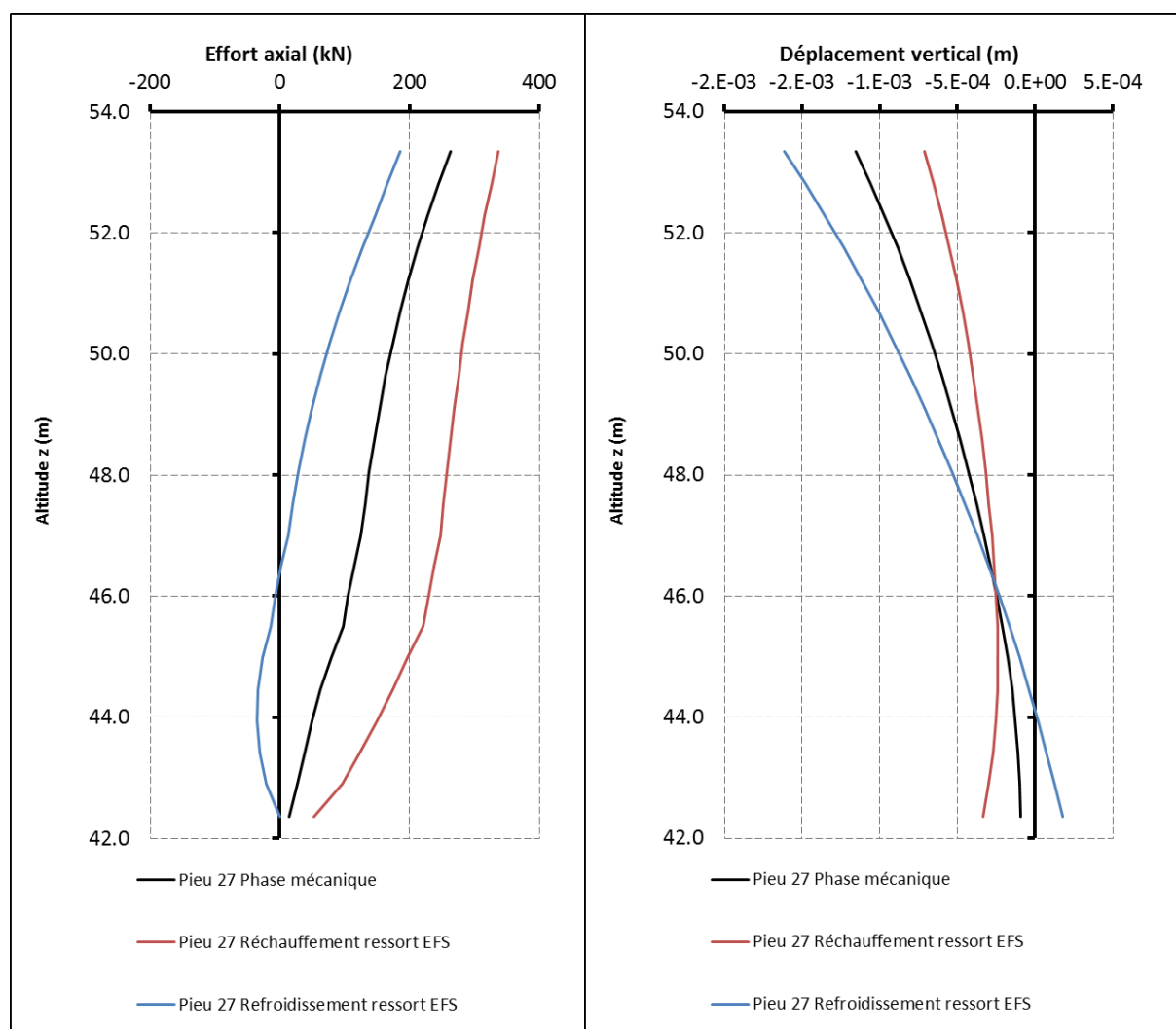


Figure 28 : Déplacement et effort dans le pieu 27 avec rigidité en tête (établi à l'aide d'un calcul éléments finis structure)

Les variations de sollicitations en tête dues au réchauffement du pieu sont résumées dans le Tableau 17 :

Tableau 17 : Variations des sollicitations dues au réchauffement dans le modèle ressort (tirées d'un modèle éléments finis de structure)

Désignation du pieu	Variation d'effort axial dû au réchauffement ΔN (kN)	Variation du déplacement dû au réchauffement Δu (mm)
Pieu 21	176	0,15
Pieu 27	75	0,44

Il est constaté que cette approche diminue fortement les efforts en tête en comparaison du modèle où les pieux sont bloqués en tête.

Les pieux non géothermiques ne sont toujours pas sollicités dans ce modèle.

E.3.3. Calcul avec structure modélisée en tête des pieux

E.3.3.1. Modèle global aux éléments finis

Un modèle complet a été réalisé (Figure 29), où les pieux ont été représentés non pas sous forme de ressorts, mais sous forme de poteaux. Une loi de type Frank et Zhao a été définie en périphérie et en pointe, et un effort thermique a été modélisé. Cependant, du fait des limites du logiciel orienté métier, cette loi ne prend pas en compte le soulèvement dans le cas d'un refroidissement qui abaisse l'effort de pointe. Il n'est également pas possible de définir un module court terme pour le cas thermique. Ainsi, les contraintes obtenues ont été pondérées par le rapport entre le module béton long terme et le module béton court terme. Egalement, les pieux ont été discrétisés en éléments de longueur 1 m. Les courbes présentées ci-dessous pour le modèle MEF présentent donc en apparence des pieux plus courts. Cela n'est en réalité pas le cas.

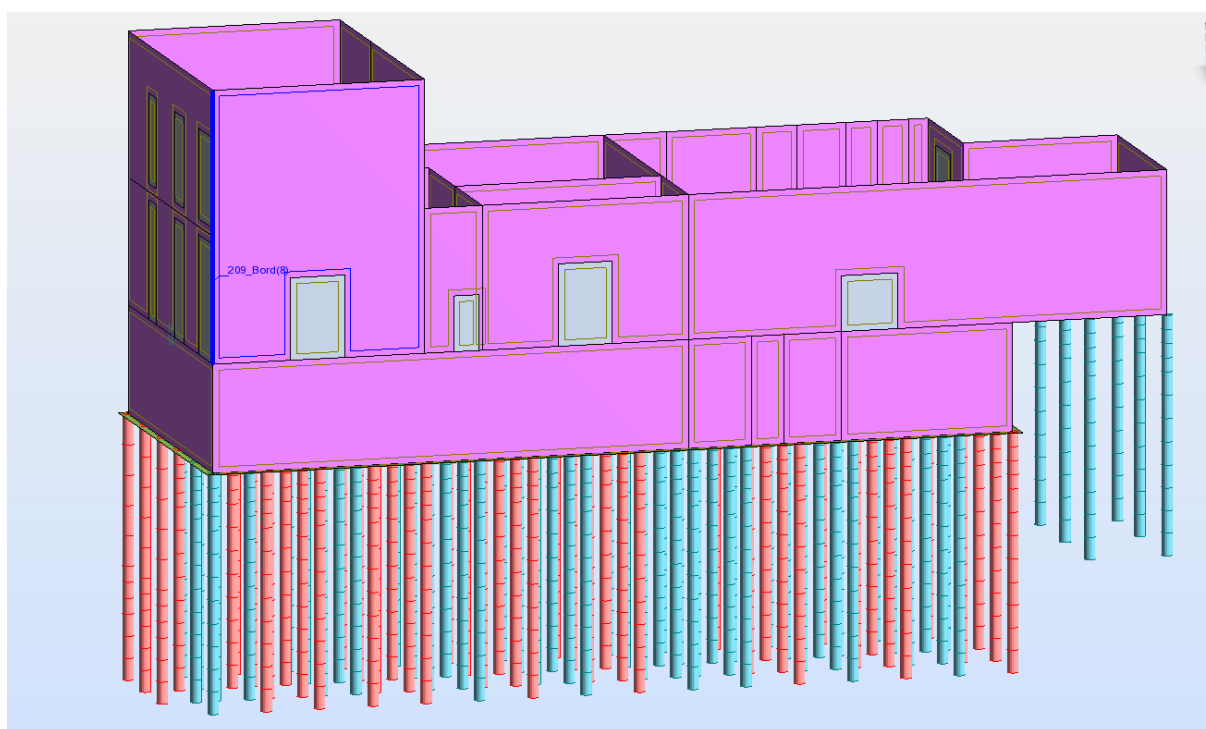


Figure 29 : modèle complet aux éléments finis

Les pieux rosés correspondent aux pieux activés.

Les tableaux ci-dessous montrent l'augmentation (ou la diminution) d'effort axial et de déplacement vertical dues au réchauffement sur les cent deux têtes de pieux du projet :

Tableau 18 : Variation d'effort en tête de pieux en kN pour un réchauffement (avec modèle aux éléments finis)

60	-115	82	-101	94	-91	103	-81	113	-70	-67	121	-70	118	-75	108		
64	-60	65	-65	65	-65	66	-65	66	-44	-54	-58	-52	-28	-24	-81		
69	-65	61	-62	68	-66	63	-64	62	-45	-53	114	-60	77	-41	103		
48	33	32	-56	55	-59	50	-57	48	-42	-55	89	-63	46	-45	70	-37	9
-101	-65	47	-58	54	-57	55	-56	56	-39	-57	84	-63	53	-46	74	-12	-1
-94	61	56	58	63	-93	75	-82	86	-70	-68	95	-70	90	-75	79	-45	-24

Tableau 19 : Variation de déplacement en tête de pieux en mm pour un réchauffement (avec modèle aux éléments finis)

0,38	0,32	0,31	0,28	0,29	0,24	0,26	0,22	0,23	0,19	0,19	0,2	0,19	0,21	0,21	0,25		
0,36	0,16	0,36	0,18	0,36	0,18	0,35	0,18	0,36	0,12	0,14	0,16	0,14	0,08	0,07	0,22		
0,35	0,18	0,37	0,17	0,35	0,18	0,36	0,18	0,37	0,13	0,14	0,23	0,16	0,33	0,11	0,25		
0,36	0,4	0,4	0,16	0,33	0,16	0,35	0,16	0,35	0,12	0,16	0,24	0,18	0,36	0,13	0,29	0,11	-0,03
0,29	0,19	0,36	0,16	0,34	0,16	0,33	0,16	0,33	0,11	0,16	0,25	0,18	0,34	0,13	0,28	0,03	0,01
0,27	0,32	0,33	0,33	0,31	0,27	0,27	0,23	0,24	0,2	0,19	0,22	0,2	0,23	0,22	0,26	0,13	0,07

Les résultats suivants montrent l'évolution des pieux 21 et 27 (pieux géothermiques) (Figure 30 & Figure 31) et des pieux 22 et 28 (pieux non géothermiques) (Figure 32 & Figure 33) :

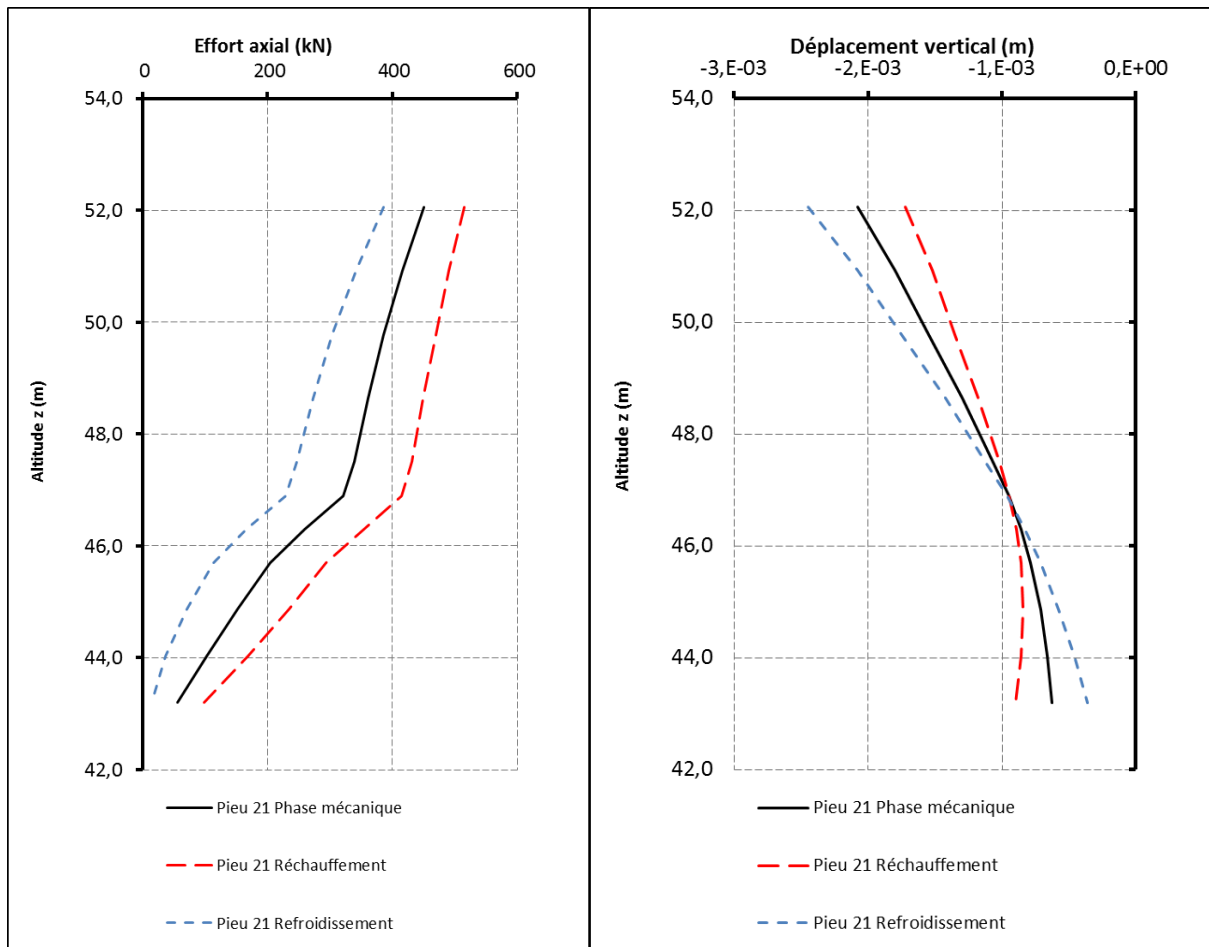


Figure 30 : Déplacement et effort dans le pieu 21 géothermique

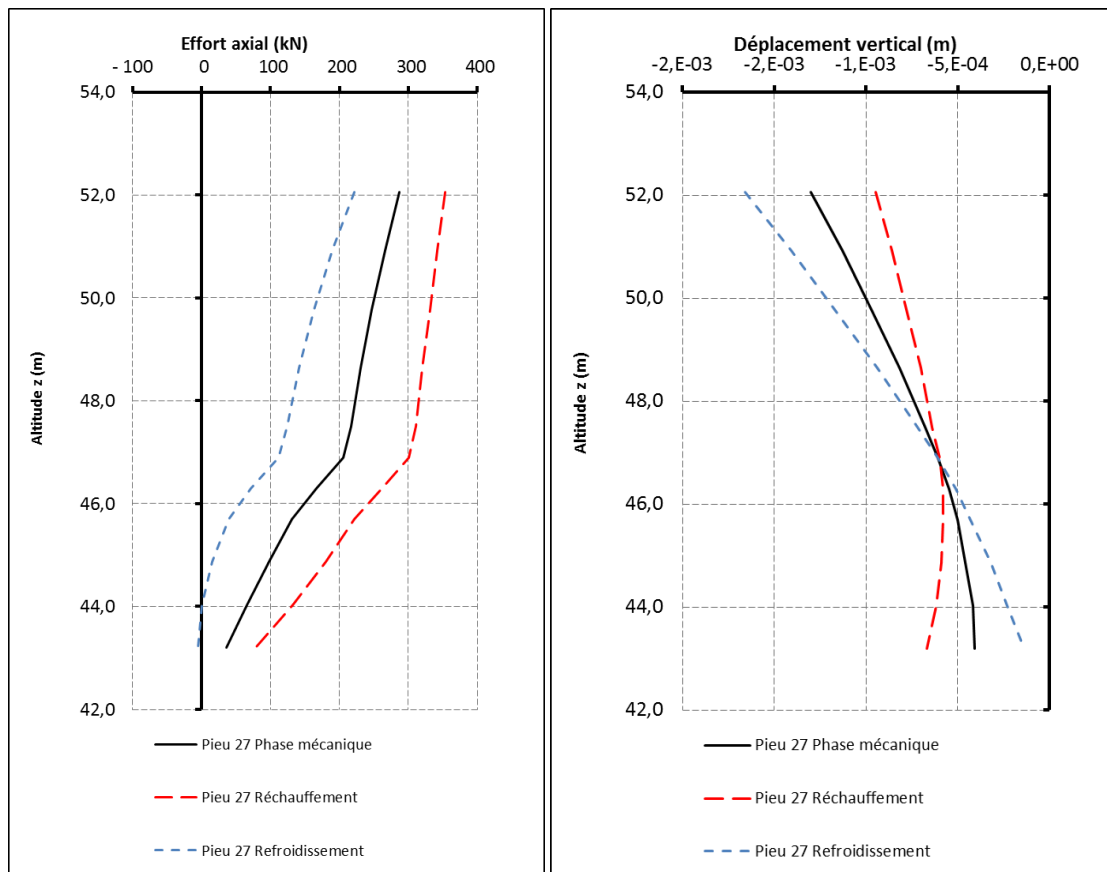


Figure 31 : Déplacement et effort dans le pieu 27 géothermique

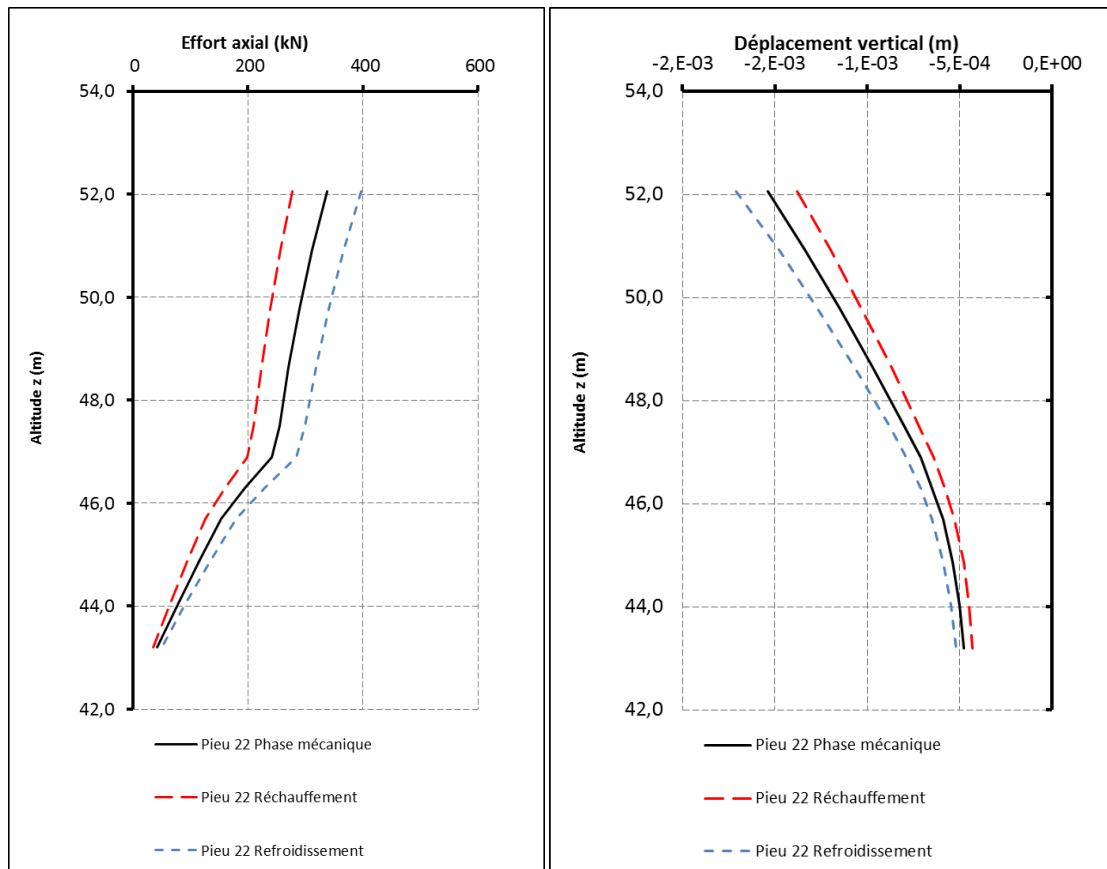


Figure 32 : Déplacement et effort dans le pieu 22 non géothermique

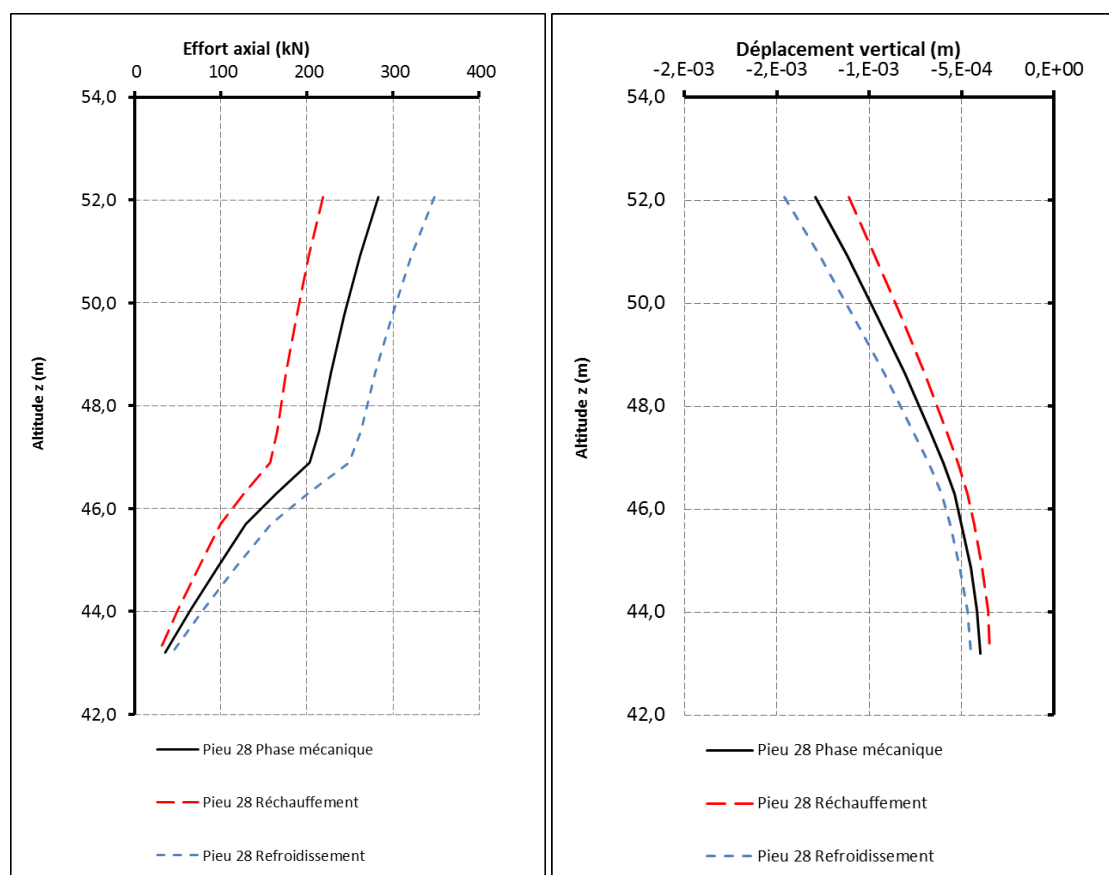


Figure 33 : Déplacement et effort dans le pieu 28 non géothermique

Les sollicitations dans les pieux provoquées par une charge thermique sont aussi modélisées dans les pieux non géothermiques. En effet, lorsque les pieux géothermiques chauffés provoquent un effort supplémentaire de compression ($\Delta N > 0$), les pieux non géothermiques subissent, en compensation, un effort supplémentaire de traction ($\Delta N < 0$) du même ordre.

Les variations des sollicitations en tête dues au réchauffement du pieu sont résumées ci-dessous pour ce modèle global aux éléments finis :

Tableau 20 : Variation des sollicitations dues au réchauffement dans les modèles avec matrice de rigidité

		Modèle global aux éléments finis	
		Variation d'effort axial ΔN (kN)	Variation des déplacements Δu (mm)
Pieux géothermiques	Pieu 21	64	0,38
	Pieu 27	66	0,35
Pieux non géothermiques	Pieu 22	-60	0,16
	Pieu 28	-65	0,18

E.3.3.2. Modèle avec matrice de rigidité

La matrice de rigidité de la structure peut être calculée :

- Soit à l'aide d'un modèle structure simplifié avec des éléments plaques uniquement (matrice plaque), représentant voiles et radiers du bâtiment (Figure 34) ;

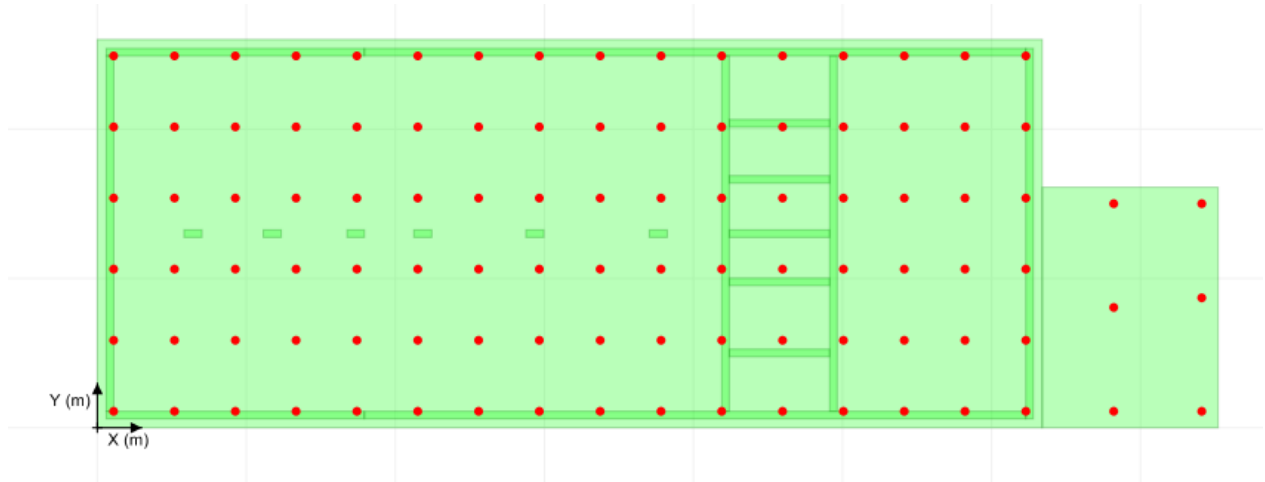


Figure 34 : Modèle structure sous forme d'éléments de plaques à partir duquel est évaluée la matrice de rigidité plaque

- Soit à partir d'un modèle aux éléments finis structure complet (matrice complète, déterminée avec le modèle du point précédent). Il s'agit de l'approche la plus rigoureuse. Pour évaluer cette matrice, il est nécessaire d'effectuer autant de calcul que le nombre de pieux (cent deux pour le cas de Sept-Sorts).

En combinant cette matrice de rigidité aux modèles de pieux, on obtient des sollicitations supplémentaires (dus au réchauffement) en tête de tous les pieux (géothermiques ou non).

Les tableaux ci-dessous (Tableau 21,

Tableau 22, Tableau 23 &

Tableau 24) montrent les augmentations (ou les diminutions) des efforts axiaux et des déplacements verticaux due au réchauffement sur les cent deux têtes de pieux du projet pour les deux matrices de rigidité disponibles (matrice plaque et matrice complète) :

Tableau 21 : Variation d'effort en tête de pieux en kN pour un réchauffement (avec matrice de rigidité plaque)

52	-134	107	-103	121	-98	123	-93	139	-64	-58	152	-78	131	-102	95		
45	-59	57	-56	58	-55	58	-55	57	-34	-41	-52	-59	-23	-25	-120		
53	-54	54	-55	57	-57	55	-57	50	-35	-41	145	-68	62	-42	85		
86	-50	53	-54	57	-56	55	-56	50	-36	-52	147	-81	45	-51	63	-11	3
-102	-49	53	-59	56	-57	57	-56	56	-37	-65	136	-94	50	-56	54	-21	3
-79	120	100	-131	114	-112	129	-100	145	-76	-77	142	-108	112	-145	55	-12	3

Tableau 22 : Variation d'effort en tête de pieux en kN pour un réchauffement (avec matrice de rigidité plaque complète)

51	-119	80	-102	93	-91	104	-81	114	-67	-65	122	-71	115	-80	97		
56	-46	52	-54	54	-53	55	-53	53	-33	-47	-54	-47	-19	-15	-95		
63	-42	51	-50	57	-55	50	-53	46	-36	-48	107	-60	60	-33	84		
78	-40	50	-50	58	-54	50	-53	46	-35	-52	107	-66	43	-39	74	-38	12
-100	-42	51	-54	53	-54	54	-54	52	-33	-57	96	-70	50	-42	76	-9	1
-88	94	89	-104	97	-98	103	-91	112	-79	-79	117	-89	105	-99	79	-47	-19

Tableau 23 : Variation de déplacement en tête de pieux en mm pour un réchauffement (avec matrice de rigidité plaque)

0.51	0.40	0.35	0.31	0.30	0.29	0.30	0.28	0.25	0.19	0.17	0.21	0.23	0.27	0.31	0.38		
0.53	0.17	0.50	0.16	0.49	0.16	0.49	0.16	0.50	0.10	0.12	0.15	0.17	0.07	0.07	0.35		
0.51	0.16	0.50	0.16	0.50	0.16	0.50	0.16	0.51	0.10	0.12	0.24	0.19	0.48	0.12	0.41		
0.41	0.14	0.50	0.15	0.49	0.16	0.49	0.16	0.51	0.10	0.14	0.24	0.23	0.52	0.14	0.47	0.04	-0.01
0.28	0.13	0.49	0.16	0.48	0.15	0.48	0.15	0.48	0.10	0.17	0.27	0.25	0.50	0.15	0.49	0.07	-0.01
0.21	0.31	0.36	0.34	0.32	0.29	0.29	0.26	0.24	0.20	0.20	0.25	0.28	0.33	0.38	0.48	0.04	-0.01

Tableau 24 : Variation de déplacement en tête de pieux en mm pour un réchauffement (avec matrice de rigidité plaque complète)

0.52	0.36	0.43	0.31	0.39	0.27	0.36	0.24	0.33	0.20	0.19	0.30	0.21	0.32	0.24	0.38		
0.50	0.14	0.51	0.16	0.51	0.16	0.50	0.16	0.51	0.10	0.14	0.16	0.14	0.06	0.04	0.28		
0.48	0.12	0.51	0.14	0.49	0.16	0.51	0.15	0.53	0.10	0.14	0.35	0.17	0.49	0.10	0.42		
0.43	0.11	0.51	0.14	0.49	0.15	0.51	0.15	0.52	0.10	0.15	0.35	0.19	0.53	0.11	0.44	0.13	-0.04
0.27	0.11	0.50	0.15	0.49	0.15	0.49	0.15	0.50	0.09	0.16	0.38	0.19	0.50	0.11	0.43	0.03	0.00
0.23	0.38	0.39	0.27	0.37	0.26	0.35	0.24	0.33	0.21	0.21	0.32	0.23	0.35	0.26	0.42	0.15	0.06

Les résultats ci-dessous montrent l'évolution des pieux 21 et 27 (pieux géothermiques) (Figure 35 & Figure 36) et les pieux 22 et 28 (pieux non géothermiques) (Figure 37 & Figure 38) pour les deux matrices de rigidité en tête (matrice plaque et matrice complète).

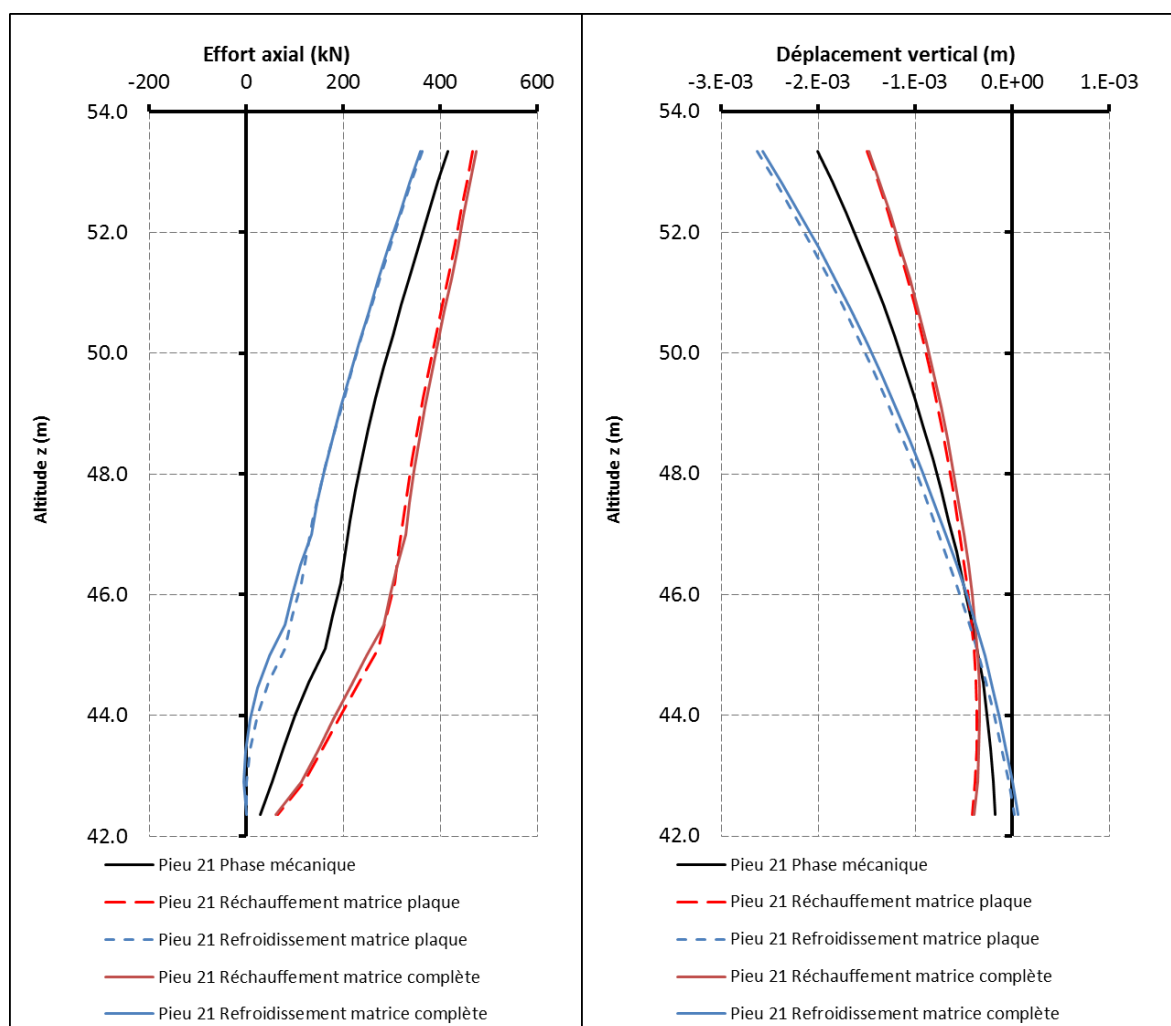


Figure 35 : Déplacement et effort dans le pieu 21 géothermique avec matrices de rigidité en tête (modèle plaque ou modèle structure complet)

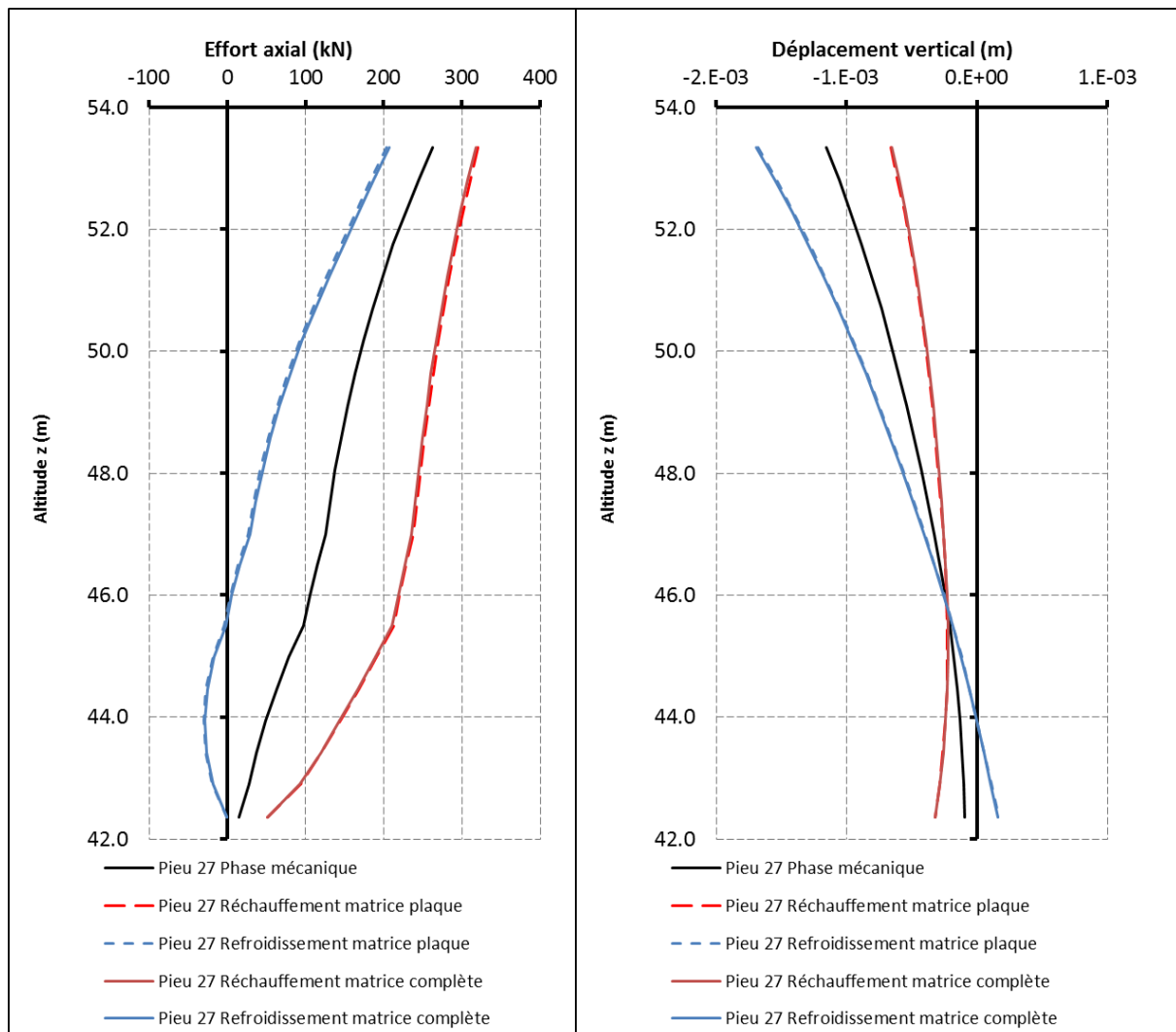


Figure 36 : Déplacement et effort dans le pieu 27 géothermique avec matrices de rigidité en tête (modèle plaque ou modèle structure complet)

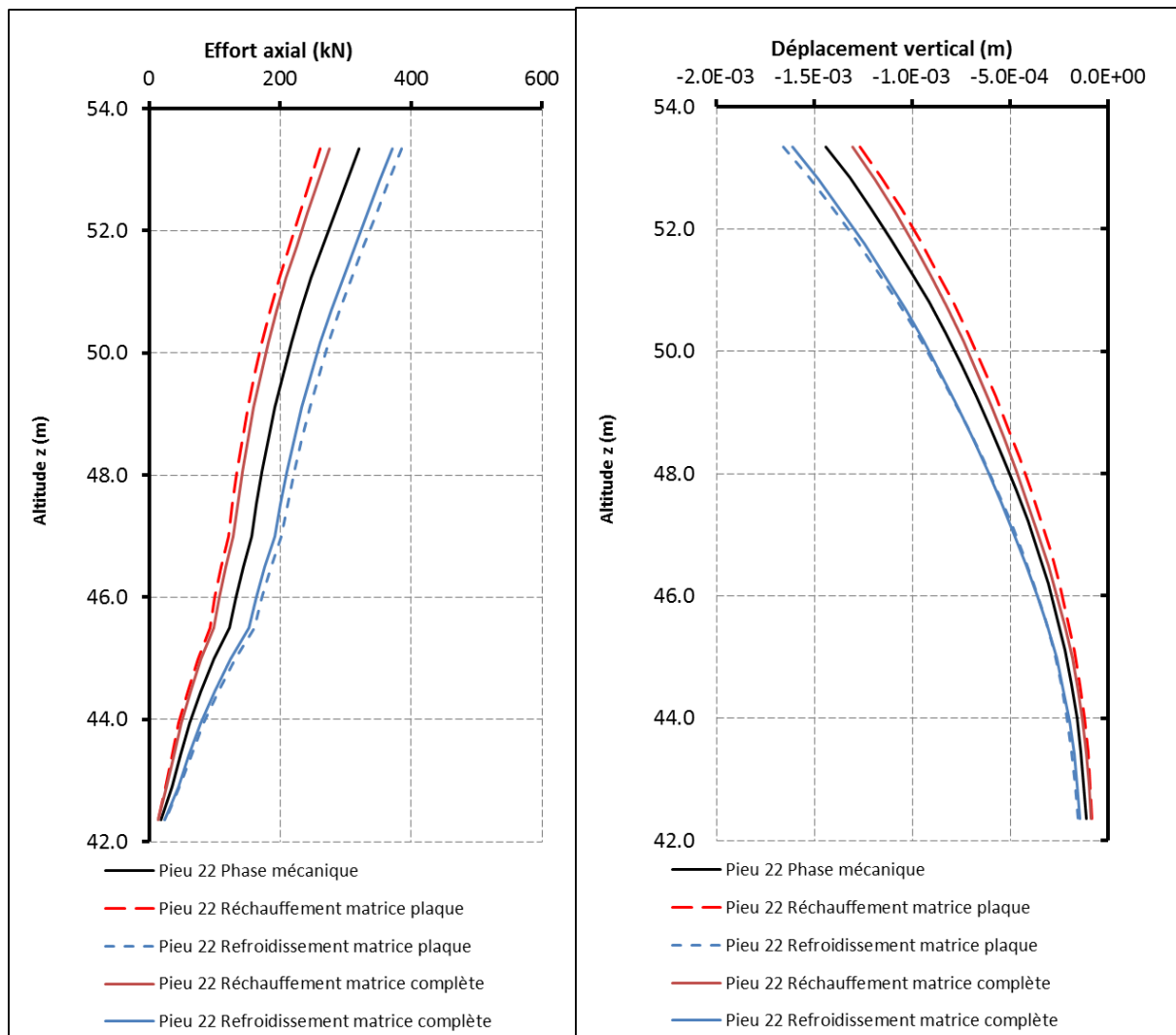


Figure 37 : Déplacement et effort dans le pieu 22 non géothermique avec matrices de rigidité en tête (modèle plaque ou modèle structure complet)

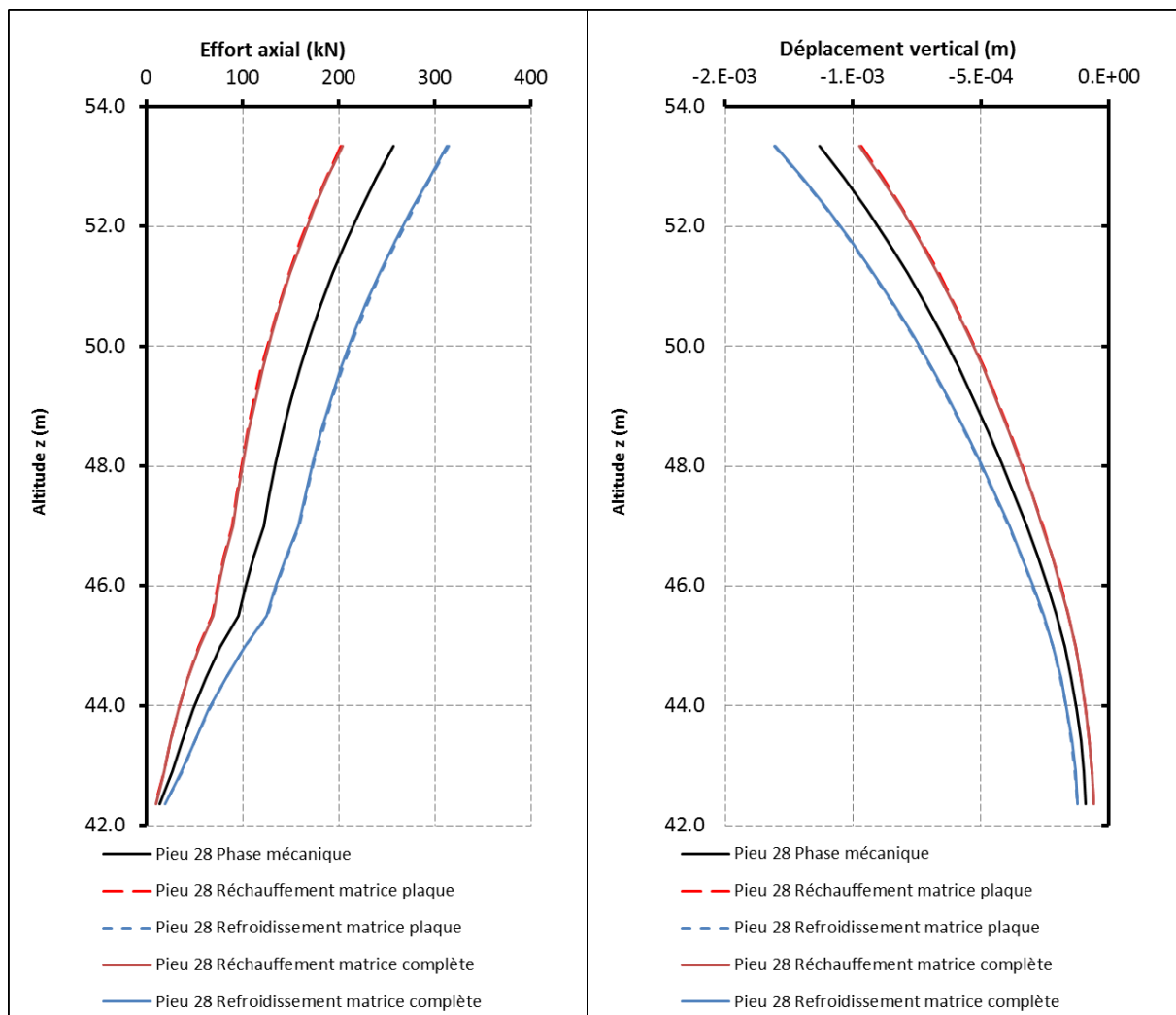


Figure 38 : Déplacement et effort dans le pieu 28 non géothermique avec matrices de rigidité en tête (modèle plaque ou modèle structure complet)

Avec cette approche plus complète, les sollicitations dans les pieux provoquées par une charge thermique sont aussi modélisées dans les pieux non géothermiques. En effet, lorsque les pieux géothermiques chauffés provoquent un effort supplémentaire de compression ($\Delta N > 0$), les pieux non géothermiques adjacents subissent en compensation un effort supplémentaire de traction ($\Delta N < 0$) du même ordre.

Les variations des sollicitations en tête dues au réchauffement du pieu sont résumées dans le Tableau 25 pour les deux matrices de rigidité considérées :

Tableau 25 : Variation des sollicitations dues au réchauffement dans les modèles avec matrice de rigidité

		Modèle avec matrice de rigidité plaque		Modèle avec matrice de rigidité structure complète	
		Variation d'effort axial ΔN (kN)	Variation du déplacement Δu (mm)	Variation d'effort axial ΔN (kN)	Variation du déplacement Δu (mm)
Pieux géothermiques	Pieu 21	52	0,51	56	0,50
	Pieu 27	58	0,49	55	0,50
Pieux non géothermiques	Pieu 22	-59	0,17	-46	0,14
	Pieu 28	-55	0,16	-53	0,16

E.3.3.3. Récapitulatif des résultats en tête par méthode

Tableau 26 : Variation des sollicitations dues au réchauffement dans toutes les approches

			Pieux géothermiques		Pieux non géothermiques	
			Pieu 21	Pieu 27	Pieu 22	Pieu 28
Modèle libre en tête / bloqué en tête		Variation d'effort axial ΔN (kN)	223	226	0	0
		Variation du déplacement Δu (mm)	0,66	0,66	0,00	0,00
Modèle rigidité en tête	Obtenue à partir de calculs structure	Variation d'effort axial ΔN (kN)	176	75	0	0
		Variation du déplacement Δu (mm)	0,15	0,44	0,00	0,00
Modèle avec structure modélisée en tête des pieux	Modèle global aux éléments finis	Variation d'effort axial ΔN (kN)	64	66	-60	-65
		Variation du déplacement Δu (mm)	0,38	0,35	0,16	0,18
	Modèle avec matrice de rigidité à partir d'un modèle structure en plaque	Variation d'effort axial ΔN (kN)	52	58	-59	-55
		Variation du déplacement Δu (mm)	0,51	0,49	0,17	0,16
	Modèle avec matrice de rigidité à partir d'un modèle structure aux éléments finis	Variation d'effort axial ΔN (kN)	56	55	-46	-53
		Variation du déplacement Δu (mm)	0,50	0,50	0,14	0,16

Les approches où le pieu est étudié sans interaction avec les autres pieux (modèle libre en tête/bloqué en tête et modèle rigidité en tête) tendent à surestimer les sollicitations et ne peuvent estimer les sollicitations dans les pieux non géothermiques. Au contraire, des approches plus complètes prennent en compte l'interaction avec la structure et aussi les pieux avoisinants mais sont plus longues à mettre en place.

E.4. Justifications

Pour mener les justifications seule la modélisation tenant compte de la raideur calculée seront retenues.

E.4.1. Résistance géotechnique

Tableau 27 : Calcul de résistance géotechnique d'un pieu énergétique

		$V_{d,max} \text{ (kN)}$	$V_{d,min} \text{ (kN)}$	
Chargement	Mécanique	Thermique		
		+10°C	-10°C	
		$1,35 G_{max}$	$1,35 G_{max} + 1,5 \Delta R_{mob, th} \quad G_{min} + 1,5 \Delta R_{mob, th}$	
ELU durable et transitoire	$V_d \text{ (kN)}$	581	846	34
		<		
	$R_{c,d} \text{ (kN)}$	1751		
		G_{max}	$G_{max} + \Delta R_{mob, th}$	$G_{min} + \Delta R_{mob, th}$
ELS caractéristique	$V_d \text{ (kN)}$	430	607	121
		<		
	$R_{c,d} \text{ (kN)}$	1363		
		G_{max}	$G_{max} + \psi/2 \Delta R_{mob, th}$	$G_{min} + \psi/2 \Delta R_{mob, th}$
ELS quasi-permanent	$V_d \text{ (kN)}$	430	465	261
		<		
	$R_{c,d} \text{ (kN)}$	1067		

NB : G_{max} = bassin plein et G_{min} = bassin vide

L'effort de calcul retenu pour les justifications n'est jamais négatif, il n'est donc pas nécessaire de vérifier la résistance en traction géotechnique du pieu.

E.4.2. Résistance structurale

E.4.2.1. Justification du pieu

Pour déterminer les efforts à l'ELU, il y a lieu de considérer les différentes combinaisons précédentes. Les diagrammes d'effort pondéré sont présentés sur la Figure 39 :

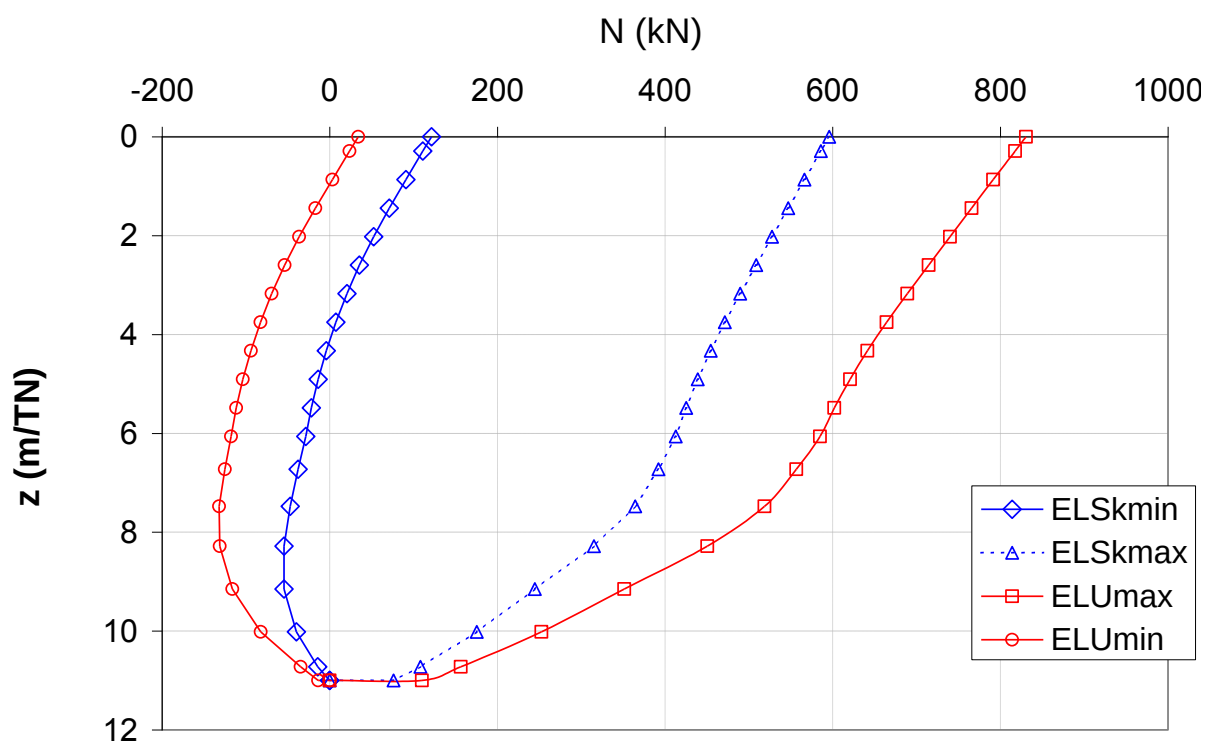


Figure 39 : Diagramme des efforts pondérés

Les valeurs extrêmes sont finalement reportées dans le Tableau 28 :

Tableau 28 : Valeurs extrêmes des efforts pondérés

	<i>Mécanique</i>		<i>Thermique</i>	
	<i>ELU</i>	<i>ELS caractéristique</i>	<i>ELU</i>	<i>ELS caractéristique</i>
N_{max} (kN)	581	430	846	607
N_{min} (kN)	-	-	-132	-55

A l'ELS caractéristique, la contrainte maximale en compression (pour un pieu de 0,42 m de diamètre) est égale à 4,3 MPa et reste inférieure à la contrainte admissible, calculée de façon analogue à la contrainte admissible pour les pieux classiques, de l'ordre de 6,8 MPa en absence de contrôle renforcé de l'intégrité du pieu.

En traction l'effort vertical maximal de calcul est égal à 132 kN à l'ELU. Cet effort est repris par les armatures longitudinales de la cage.

E.4.2.2. Efforts dans le radier

E.4.2.2.1. Dalle portée

Pour un radier de type dalle portée sur longrine, les moments sont supposés vérifiés si $\varepsilon_{th}^z < L/1000$, avec L portée entre longrines.

E.4.2.2.2. Plancher champignon

Si le radier est de type planché champignon, trois solutions se présentent pour déterminer les moments complémentaires : modèle aux éléments finis complet, théorie des poutres ou méthode des raideurs.

E.4.2.2.3. Réalisation d'un modèle aux éléments finis complet

Il est possible d'extraire directement les valeurs de moments depuis le modèle (Figure 40) :

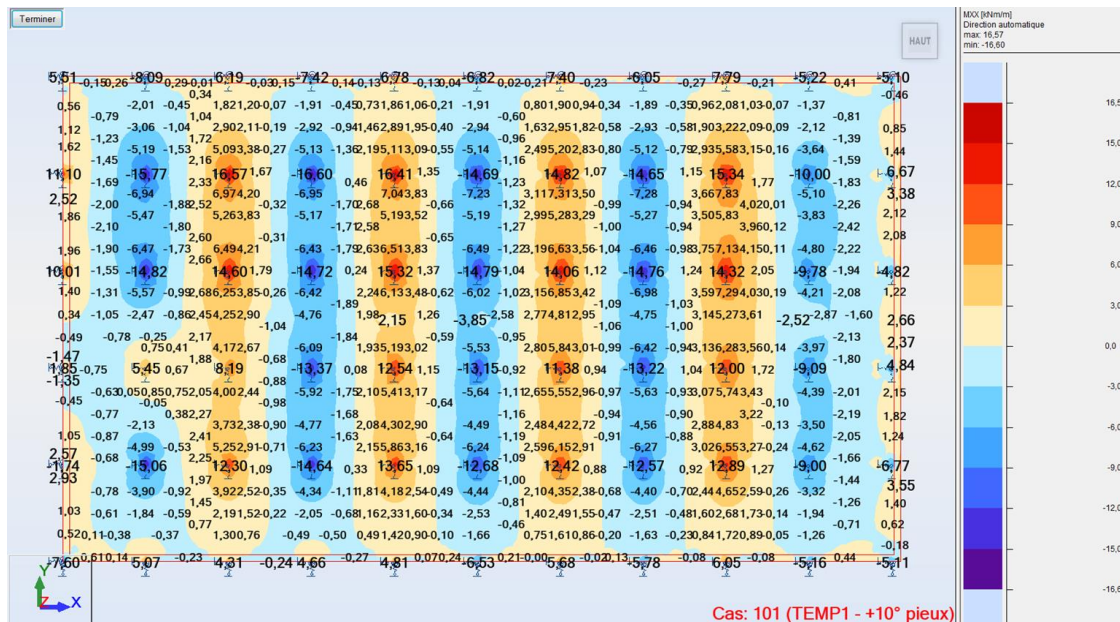


Figure 40 : modèle aux éléments finis complet

Il est à noter qu'une variation de température $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ donne des résultats strictement opposés.

Ces valeurs de moment ne sont ici pas pondérées par $\psi_0 = 0,6$.

E.4.2.2.4. Analyse simplifiée selon la théorie des poutres

Ce cas peut être réalisé quand l'implantation des pieux géothermiques suit un critère de régularité (Figure 41).

Par exemple :

X	0	X	0	X	0	X	0	X
X	0	X	0	X	0	X	0	X
X	0	X	0	X	0	X	0	X
X	0	X	0	X	0	X	0	X
X	0	X	0	X	0	X	0	X

Figure 41 : critère de régularité du positionnement des pieux énergétiques

Où X désigne un pieu non activé, et 0 un pieu activé. L'entraxe entre pieux est pris égal, dans l'exemple, à 2 m.

Les pieux activés subissent les charges définies dans la Figure 41, soit une charge thermique additionnelle $F_{th} = 200 \text{ kN}$ au niveau des pieux activés.

Nous pouvons alors simplifier le modèle par la poutre suivante (Figure 42) :

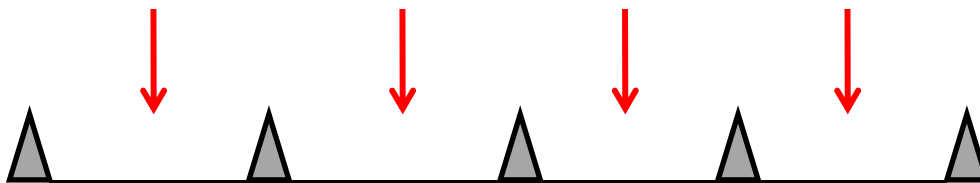


Figure 42 : modèle simplifié sous forme d'une poutre

Nous aboutissons alors au diagramme des moments suivant (Figure 43) :

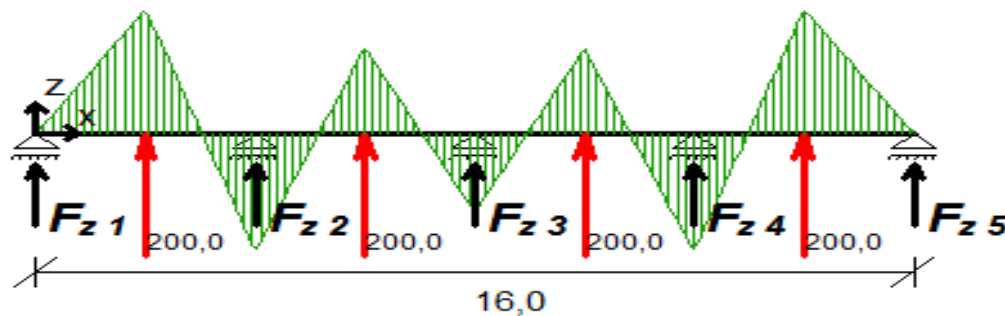


Figure 43 : diagramme des moments du modèle simplifié de la théorie des poutres

Conformément à l'EN 1992-1-1 §5.3.2.2, il est possible d'écarter le moment sur une distance de $2*d$ (d : épaisseur du bras de levier) autour des pieux.

L'exemple précédent aboutit à (Figure 44) :

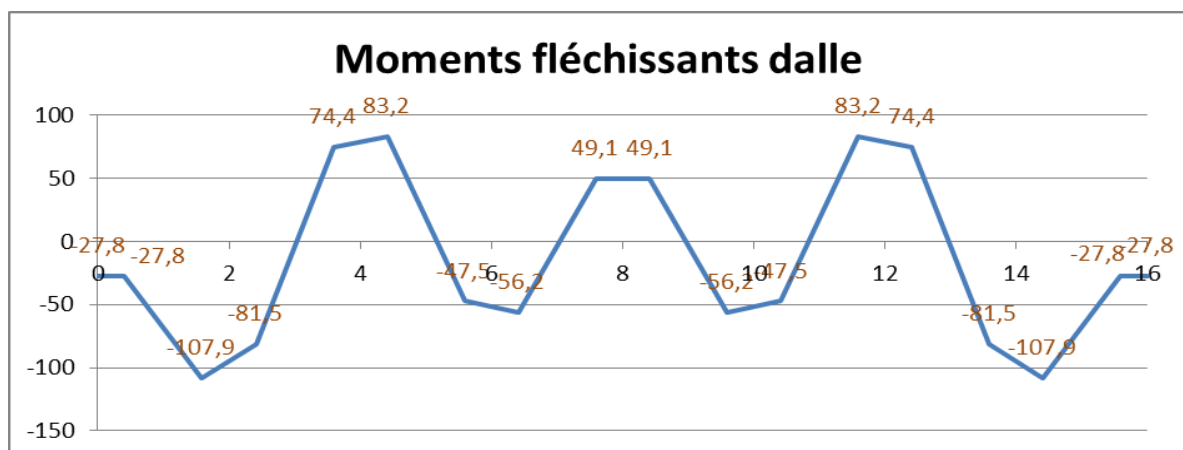


Figure 44 : Moments fléchissants du modèle simplifié de la théorie des poutres

Les résultats obtenus sur le bord de la structure sont non représentatifs, et sont négligés.

Cette approche est défavorable, car les pieux activés servent également d'appuis, négligés ici. Afin de pondérer ce point, les moments ainsi obtenus sont pondérés par l'inverse de l'entraxe entre pieux.

- $M_{th,non\ activé} = 24,6 \text{ kN.m}$ en tête des pieux non activés ;
- $M_{th,activé} = 28,1 \text{ kN.m}$ en tête des pieux activés.

E.4.2.2.5. Analyse simplifiée selon la méthode des raideurs

L'approche simplifiée précédente ne donnant pas de résultats viables, une autre approche a été utilisée en considérant les appuis comme des appuis élastiques et non des appuis rigides. La raideur verticale donnée a été $K=E*S/l$.

Le Tableau 29 représente les données d'entrée :

Tableau 29 : Données d'entrée du modèle simplifié de la méthode des raideurs

Charge n°	x	F_z	M_r	K_z	C_r
1	1,00	200,00	0,00	1,59E05	00,00E00
2	5,00	200,00	0,00	1,59E05	00,00E00
3	9,00	200,00	0,00	1,59E05	00,00E00
4	3,00	0,00	0,00	1,59E05	00,00E00
5	7,00	0,00	0,00	1,59E05	00,00E00

Nous avons modélisé au niveau des pieux subissant une charge thermique une charge de 200 kN. Nous avons rajouté les appuis non activés. Les espacements correspondent au cas réel.

Nous avons représenté cinq pieux afin de négliger les effets de bords. Ces pieux étant situés sous voile, les moments générés sont plus faibles. La dalle a été représentée avec son épaisseur et son module d'Young réels.

Nous obtenons les résultats suivants :

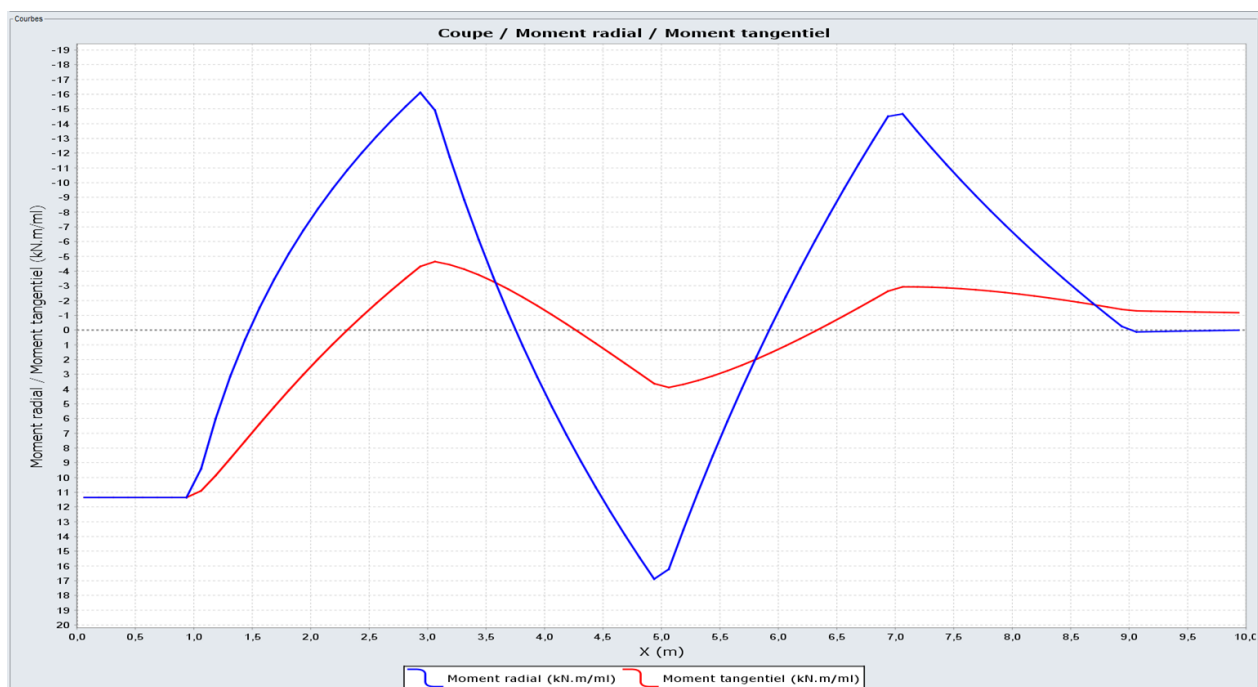


Figure 45 : résultats du modèle simplifié selon la méthode des raideurs

Ces actions sont déjà pondérées par $\psi_0 = 0,6$ (le cas de charge de 200 kN correspond à un cas déjà pondéré). Les efforts correspondent de façon bien plus précise aux sollicitations telles que calculées par la méthode des éléments finis.

E.4.3. Déplacements

Un déplacement de l'ordre de 0,15 mm a été calculé. Pour tenir compte du report de charge sur les pieux non géothermiques situés à proximité, un déplacement différentiel double est retenu. Etant donné l'espacement entre les pieux, égal au minimum à 2,065 m, la rotation relative reste bien inférieure à 1/500 et est jugée acceptable.

E.4.4. Caractère cyclique du chargement thermique

Pour finir, et pour tenir compte du caractère cyclique du chargement géothermique, les états de chargement obtenus pour chacun des chargements étudiés sont reportés dans un diagramme de stabilité cyclique (Figure 46).

La démarche consiste à reporter le rapport entre les deux grandeurs suivantes :

- d'une part le chargement moyen, ici le chargement mécanique V_{mec} et la résistance caractéristique en compression $R_{c,k}$
- d'autre part le chargement complémentaire thermique (dont le caractère cyclique est étudié) ΔV_{th} et la résistance caractéristique en compression $R_{c,k}$.

Les états de chargements ainsi obtenus restent fortement au-dessous des courbes limites, reportées ici pour 10 et 1000 cycles. Il est ainsi montré qu'il n'y a pas lieu de tenir compte du caractère cyclique du chargement dans les différentes justifications.

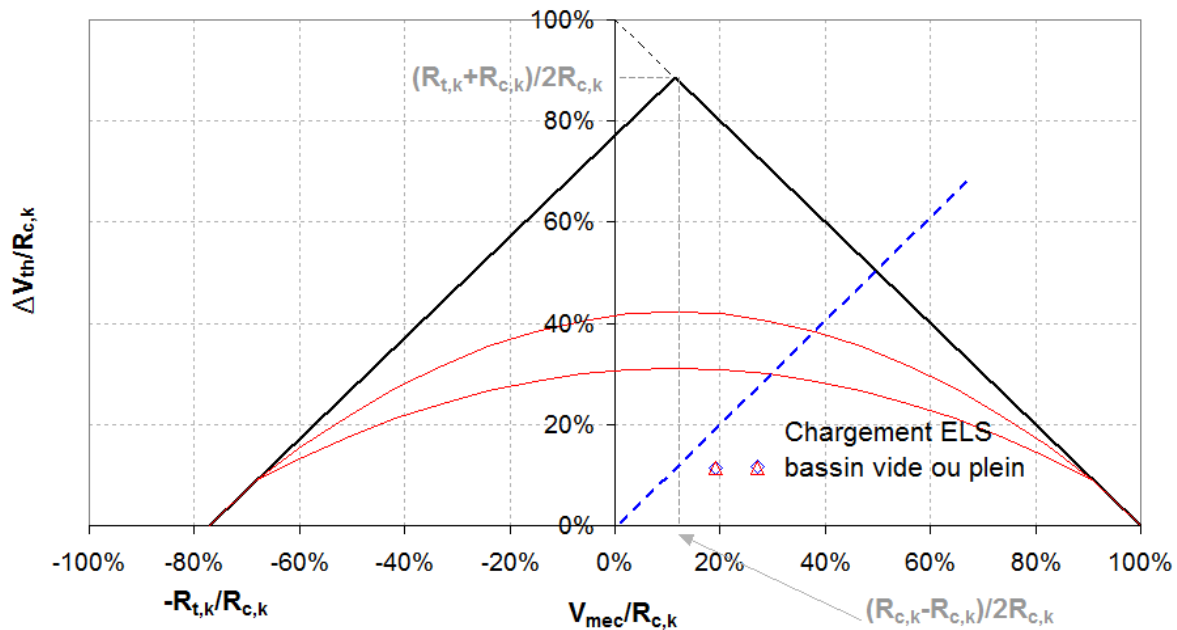


Figure 46 : Diagramme de stabilité cyclique

La position des points sous la droite en pointillés inclinée à 45° indique l'absence de chargement alterné (traction/compression).

ANNEXE F : Equipements de base des pieux et des parois moulées énergétiques

Dans cette annexe sont présentés les principaux équipements de base usuels d'une opération de géostructure thermique.

- Tubes PEHD dimensions courantes (diamètre*épaisseur) 20*1.9mm ou 25*2.3mm



Figure 47 : Tubes échangeurs en PEHD (Géothermie-Professionnelle/Pinto)

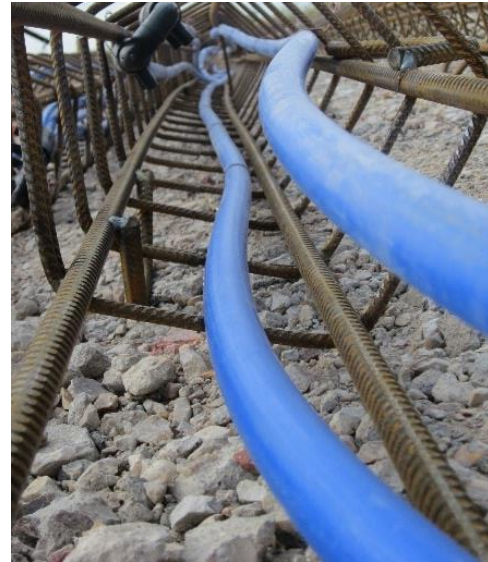


Figure 49 : Pieu énergétique (Géothermie-Professionnelle/Pinto)



Figure 48 : Pieux énergétiques de petit diamètre (Géothermie-Professionnelle/Pinto)



Figure 50 : pieu énergétique de petit diamètre (Géothermie-Professionnelle/Pinto)

NB : mises à part les chutes, il faut éviter de stocker les tubes directement sur le sol sans prévoir de protection contre les coupures et/ou l'entrée de débris dans les tubes.

- Raccord thermo-soudé



Figure 51 : Raccord thermo-soudé (Géothermie-Professionnelle/Pinto)

NB : Ce raccord thermo-soudé est également mis en avant car ses dimensions ne permettent pas un bétonnage de qualité.

- Equipement de contrôle



Figure 52 : manomètre de contrôle (Géothermie-Professionnelle/Pinto)

- Exemples de géostructures thermiques



Figure 53 : tête de pieux (Géothermie-Professionnelle/Pinto)



Figure 54 : tête de pieux (Géothermie-Professionnelle/Pinto)



Figure 55 : paroi moulée équipée de tubes géothermiques (Géothermie-Professionnelle/SYSTR)



Figure 56 : paroi moulée équipée de tubes géothermiques (Géothermie-Professionnelle/SYSTR)