

GEOSTRUCTURES THERMIQUES : TOUS LES ELEMENTS DE STRUCTURES SONT-ILS BONS A EQUIPER ?

THERMAL GEOSTRUCTURES : ARE ALL STRUCTURAL ELEMENTS FIT FOR PURPOSE ?

Lionel DEMONGODIN¹, Quentin BEAUMONT¹

¹ Egis Géotechnique – Le Carat, Lyon, France

RÉSUMÉ – Utiliser l'énergie thermique du sol pour alimenter des constructions ou des infrastructures de transport via la construction et l'équipement des fondations est une démarche écologique en évolution. Quel est l'intérêt en termes de performances énergétiques ? Présentation d'une évaluation technique réalisée à l'aide d'une modélisation numérique simplifiée.

ABSTRACT – Using thermal energy of the soil to supply buildings or transport infrastructures through construction and equipment of foundations is an ecological approach, still evolving. What is the advantage in terms of energetic performance ? Presentation of a technical evaluation carried out using a simplified numerical modeling.

1. Introduction

La géothermie de très basse température connaît un essor nouveau avec le développement de la filière des géostructures thermiques. Le principe consiste à tirer profit de l'opportunité énergétique offerte par la construction de fondations en interactions avec le sol au moyen d'échangeurs thermiques. L'énergie captée peut être utilisée pour couvrir des besoins en chaud et en froid du projet concerné ou de bâtiments voisins.

Trois types de géostructures thermiques sont classiquement distingués : les pieux, les parois moulées et les radiers. Les tunnels sont potentiellement intéressants par leurs surfaces d'échange avec le sol mais sont encore très peu étudiés, du moins en France.

Les opérations sur radier sont assez répandues. Celles sur pieux sont historiquement les plus courantes et les mieux maîtrisées. Les réalisations sur parois moulées sont plus rares et encore récentes.

Le premier projet d'expérimentation en France date de 2014 et concerne des stations de la ligne B du métro de Rennes. D'autres projets, notamment sur les stations du grand Paris Express, sont en cours de réalisation ou de réflexion. La particularité de ce type d'ouvrages est de présenter une structure en H où le radier est encastré entre des éléments verticaux de paroi moulée (Figure 1). Dans le détail, trois composantes sont différenciées : la section en paroi moulée au-dessus du radier (mur) dont seule la face extérieure est au contact du terrain, la section en paroi moulée sous le radier (fiche) dont les deux faces sont au contact du terrain, et le radier dont seule la sous-face est au contact du terrain.

Dans la gamme de température usuelle de la filière (0-30°C), le comportement thermique du système sol-structure est gouverné par la conduction, liée à l'existence d'un gradient thermique initié par le fonctionnement même du dispositif géothermique, et l'advection liée à l'écoulement d'une nappe. Considérant que l'écoulement conditionne en partie le rendement attendu de l'installation, ces considérations renvoient à des situations contrastées : les parois moulées sont immergées dans un flux d'eau alors que le radier est hydrauliquement confiné entre celles-ci. Dans une logique d'optimisation technique et financière, peut alors se poser la question de l'intérêt d'équiper le radier et les parois.

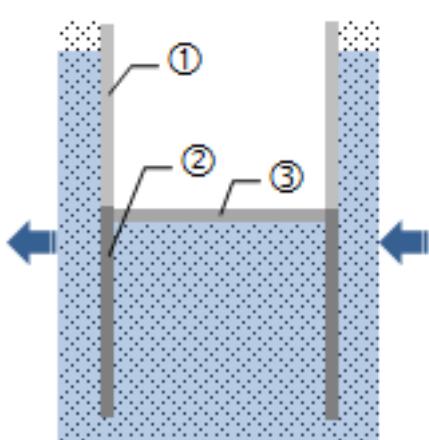


Figure 1. Eléments de structure thermiquement activable : 1 - mur ; 2 - fiche ; 3 - radier

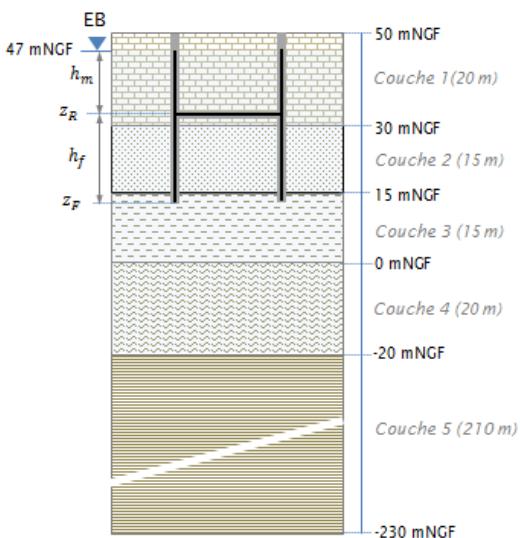


Figure 2. Vue coupe du modèle géologique général

2. Démarche et hypothèses

Il est modélisé un ouvrage en interaction avec un environnement dont les conditions hydrogéologiques et thermiques peuvent être contrôlées afin d'examiner différentes hypothèses de configuration, d'environnement et de fonctionnement. L'asymétrie du problème liée à la direction d'écoulement et aux perturbations du champ de vitesse au voisinage de l'ouvrage et donc du champ de température, impose une approche 3D et de surcroît numérique en l'absence de solution analytique connue.

Le modèle retenu considère un couplage des mécanismes de transfert de chaleur par conduction et advection. Il permet de représenter les structures finement pour matérialiser l'ouvrage dans des proportions réalistes (notamment épaisseurs des parois et du radier).

Des hypothèses simplificatrices sont par ailleurs admises pour s'affranchir de considérations techniques jugées peu pertinentes compte tenu de l'objectif de l'étude.

Les simulations sont réalisées avec le code de calcul MARTHE v7.5 (BRGM).

2.1. Modèle de terrain et géométrie de l'ouvrage

Le modèle considéré se compose de 5 couches (Figure 2). Les couches 1 à 4 ont respectivement une épaisseur de 20, 15, 15 et 20 m. La couche 5 forme à la fois le substratum hydrogéologique et les épontes thermiques inférieures du système (épaisseur de 210 m). Bien qu'imperméable, elle participe au transfert de chaleur par conduction.

Dans le plan, la dimension de l'ouvrage est de 50 x 24 m, soit un périmètre extérieur de 148 m. L'épaisseur des parois moulées et du radier est respectivement de 1 et 2 m. Le périmètre intérieur de l'ouvrage est de 140 m.

Les parois moulées (PM) ne sont activées qu'au droit des sections situées sous le niveau médian de la nappe EB. L'équipement au droit de terrains souvent ou toujours désaturés ne présente pas d'intérêt en raison du caractère isolant de l'air. Le terrain naturel est pris à 50 m et le niveau EB à 47 m. Les parois moulées sont ancrées de 2 m dans la couche 3, soit à la cote $z_F = 13$ m. La hauteur de paroi thermiquement activable est de 34 m. La position de l'arase supérieure du radier (z_R) définit la hauteur du mur ($h_m = EB - z_R$) et de la fiche ($h_f = z_R - z_F$) des parois moulées.

2.2. Extension, conditions aux limites et initiales

Le domaine modélisé s'étend sur 0,5 x 0,5 km, centré sur l'ouvrage. Ces dimensions sont choisies de sorte à s'affranchir de toute interférence calculatoire entre les conditions aux limites et la zone d'influence hydrogéologique de l'ouvrage. Le maillage est de 10 x 10 m aux angles du domaine et se réduit à 1 x 1 m autour de l'ouvrage (maillage écossais).

Les conditions limites hydrogéologiques sont imposées sur toutes les frontières du modèle, et ajustées pour obtenir la direction et le gradient d'écoulement voulus (régime permanent). Une condition de température constante à 15°C est imposée sur la limite hydraulique amont du modèle, et une température initiale de 15°C est fixée sur l'ensemble du domaine. L'enceinte de l'ouvrage est supposée adiabatique.

2.3. Scénario d'exploitation du système géothermique

Le scénario de référence retenu correspond aux besoins saisonniers d'un bâtiment tertiaire et considère une alternance de cycles de production de chaud (cycle hiver : 6 mois/an) et de froid (cycle été : 4 mois/an) entrecoupée de périodes d'arrêt (1 mois) aux intersaisons. Par simplicité, le système est supposé fonctionner en tout ou rien, c'est-à-dire sans modulation de température, avec 30°C imposés instantanément et dans tout le volume des éléments de structure activés en période estivale (production de froid et rejet chaud) et 2°C en période hivernale (production de chaud et rejet froid), soit +15°C et -13°C par rapport à la température initiale de la nappe.

Le scénario est discrétisé selon un pas mensuel sur 30 ans de fonctionnement afin de rendre compte du comportement du système sur le long terme.

2.4. Programme de simulations

L'objectif du programme est d'examiner le rendement énergétique des éléments de structure sous différentes conditions hydrauliques, thermiques, de géométrie ou encore d'exploitation. La notion de rendement renvoie ici à la puissance thermique échangée par un élément de structure avec le sol, exprimée en W/m².

L'approche paramétrique permet de balayer un grand nombre de cas pour en dégager des tendances claires.

La simulation de référence correspond au paramétrage du Tableau 1. Le radier est activé et placé à 20 m/TN (soit à 30 m d'altitude). Les surfaces d'échanges avec le sol sont reportées dans le Tableau 1.

Le gradient hydraulique est fixé à 3‰ et s'inscrit dans la gamme de valeurs courante pour des aquifères de surface. L'écoulement est orienté NE-SO, à 45° par rapport à l'axe d'allongement N-S de l'ouvrage. Les différents cas de simulations sont décrits dans le Tableau 2.

Tableau 1. Paramètres du modèle de référence

Couche / structure	K (m.s ⁻¹)	λ_m (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	$\rho_m c_m$ (J.m ⁻³ .K ⁻¹)	$d_m = \lambda_m / \rho_m c_m$ (m ² .s ⁻¹)
1	2.10 ⁻⁵	2,67	1,93. 10 ⁶	1,38.10 ⁻⁶
2	1.10 ⁻⁴	2,22	1,98 10 ⁶	1,12.10 ⁻⁶
3	1.10 ⁻⁶	3,12	2,12 10 ⁶	1,47.10 ⁻⁶
4	5.10 ⁻⁵	3,22	2,04 10 ⁶	1,58.10 ⁻⁶
5	1.10 ⁻¹⁰	1,41	1,91 10 ⁶	7,39.10 ⁻⁷
PM (béton)	1.10 ⁻⁸	1,57	2,30 10 ⁶	6,83.10 ⁻⁷
Radier (béton)	1.10 ⁻⁸	1,57	2,30 10 ⁶	6,83.10 ⁻⁷

Position radier (z_R)	Hauteur mur PM (H_m)	Hauteur fiche PM (H_f)	Surface d'échange avec le sol			
			Mur PM	Fiche ext. PM	Fiche int. PM	Radier
+30 m	17 m	17 m	2516 m ²	2660 m ²	2100 m ²	1056 m ²

Tableau 2. Description des simulations

N°	Description	Objectif / commentaire
A	cf. Tableau 1	Cas de référence (avec radier activé)
B	Radier inactif	Impact du radier sur le rendement des parois moulées équipées
C1 / C2	$z_R = +24$ m ou + 17 m	Sensibilité à la position relative du radier
D1 / D2	(K ₁ ,...,K ₄) x 10 ou / 10	Sensibilité au modèle de perméabilité général
E1 / E2	(λ_{m1} , ..., λ_{m4}) x 0.75 ou x 1.25	Sensibilité aux paramètres thermiques
F1 / F2	6E - 1R - 4E - 1R ou 6E - 6R	Sensibilité au scénario d'exploitation

3. Résultats et discussion

3.1. Cas de référence

L'essentiel de la perturbation thermique se déploie dans un périmètre d'environ 20 m autour de l'ouvrage. L'effet est peu perceptible au-delà de 50 m, le terrain étant très proche de sa température initiale (Figure 3). L'évolution des profils aux différentes dates montre l'absence de dérive thermique significative qui suggérerait un déséquilibre entre les phases d'exploitation hiver/été. Le comportement est similaire dans les couches 1,2 et 4.

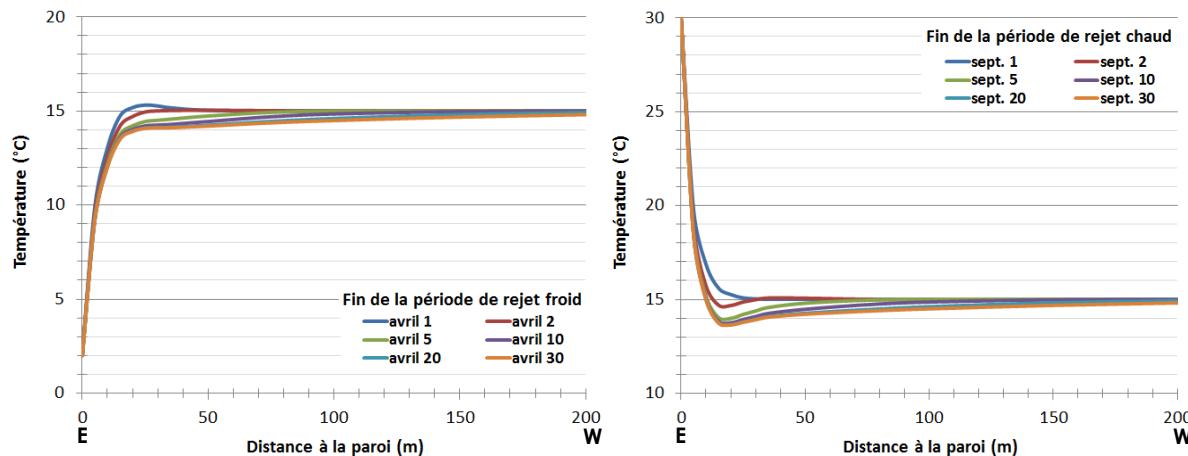


Figure 3. Cas de référence : profil de température à différentes dates (couche 2)

L'anomalie thermique présente une certaine dissymétrie entre l'Est (amont) et l'Ouest (aval) qui résulte de l'effet de l'écoulement, autrement dit de la composante advective. La bulle froide observée en septembre (Figure 4) est un reliquat du cycle hivernal, témoignant du caractère transitoire des phénomènes et de la capacité du système à fonctionner aussi par effet de stockage / déstockage d'énergie.

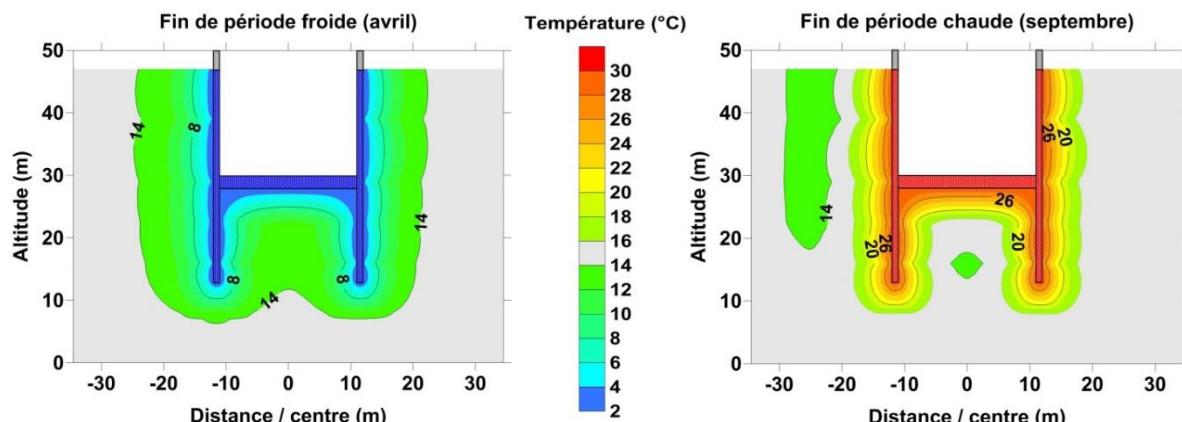


Figure 4. Cas de référence : vue en coupe du champ de température à $t = 30$ ans

Le bilan thermique (Tableau 3 et Figure 5) montre que les performances et les puissances énergétiques diminuent sensiblement au cours du temps et tendent vers une valeur asymptotique qui n'est pas atteinte. L'effet est particulièrement marqué entre le 1^{er} et 2^{ème} mois d'un cycle. Les rendements à 1 et 30 ans de fonctionnement diffèrent peu, confirmant l'absence de dérive thermique. Le mur de PM a un rendement plus important que la fiche extérieure et intérieure, principalement en raison du modèle de conductivité, la couche 1 étant la plus conductrice. Enfin, le rendement du radier est 4 à 6 fois plus faible que celui des PM. En termes de puissance, il représente seulement 4% de la puissance moyenne totale pour environ 13% de la surface d'échange.

Les puissances moyennes extraites sur la durée de chaque cycle à $t = 30$ ans sont de -109 kW en mode de production de froid et de 77 kW pour le chaud.

Les comportements observés, comme les ordres de grandeur calculés, rejoignent les résultats de modélisation obtenus par d'autres auteurs avec des approches numériques similaires et sensiblement plus complexes.

Tableau 3. Cas de référence : rendements (W/m^2) des éléments de structures

Structure	Cycle été			Cycle hiver			Moy. annuelle	Moy. 1 ^{ère} année
	Max	Moy.	Min	Max	Moy.	Min		
Radier	4.7	3.9	3.2	3.7	2.7	2.1	3.2	3.2
PM mur	26.6	17.2	11.2	22.8	12.0	7.0	14.1	14.5
PM fiche ext.	23.3	15.1	10.1	20.2	10.9	6.8	12.6	12.9
PM fiche int.	17.0	10.4	6.2	14.7	7.1	3.6	8.4	8.7
Total (8332 m ²)	20.3	13.1	8.6	17.5	9.3	5.4	10.8	11.1

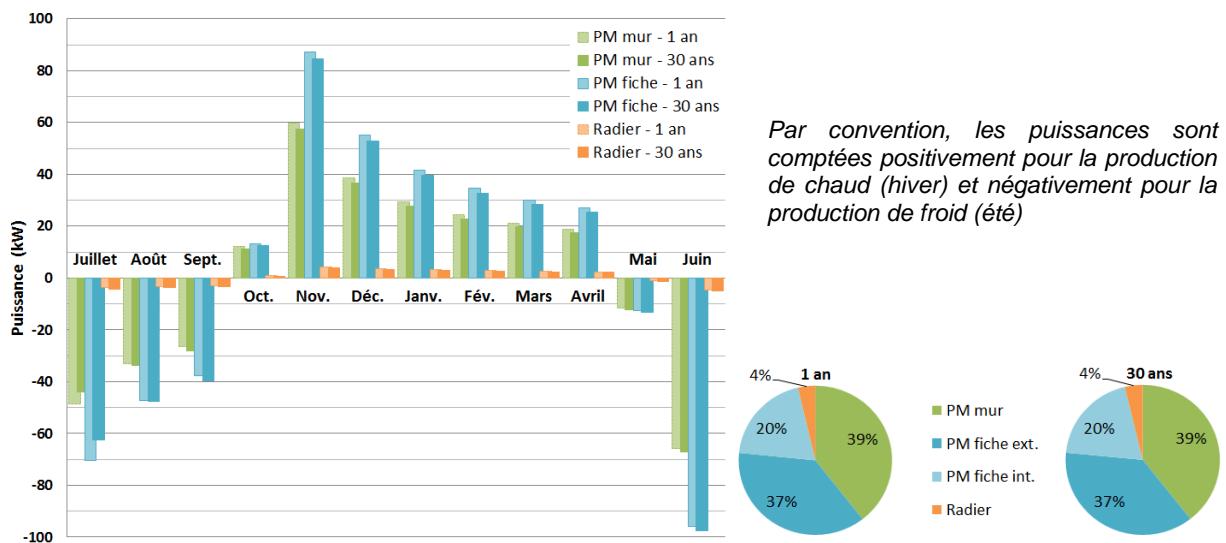


Figure 5. Cas de référence : puissances échangées des éléments de structures avec le milieu

3.2. Analyse de sensibilité

3.2.1. Cas B : radier non actif

L'activation du radier n'affecte que les performances de la fiche intérieure et de manière très marginale (moins de 3% en moyenne), donc sans incidence significative sur les rendements des PM. Par contre elle dégrade sensiblement le rendement global moyen avec pour conséquence un gain très faible (quelques watts) sur la puissance globale de l'ouvrage malgré l'augmentation de la surface d'échange.

L'activation du radier présente donc peu d'intérêt d'autant qu'elle impliquerait un investissement au m² analogue à celui des PM.

Tableau 4. Cas B, sans radier : variations des rendements des éléments de structures par rapport au cas de référence

Structure	Cycle été			Cycle hiver			Moy. annuelle
	Max	Moy.	Min	Max	Moy.	Min	
Radier	-	-	-	-	-	-	-
PM mur	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PM fiche ext.	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
PM fiche int.	+1%	+3%	+6%	0%	+3%	+8%	+3%
Total (7276 m ²)	+12%	+11%	+10%	+11%	+11%	+11%	+11%

3.2.2. Cas C1/C2 : position du radier

L'objectif est d'examiner si la position du radier modifie son rendement, notamment lorsqu'il se rapproche de la couche d'ancrage des PM pour bénéficier de conditions advectives plus favorables. Les surfaces d'échanges du mur et de la fiche sont alors redistribuées rendant l'analyse assez complexe.

Néanmoins, en considérant les puissances moyennes il ressort que l'abaissement du radier ne joue pas significativement sur ses performances. Les variations sont sensibles en termes de rendement mais n'ont pas d'effet sensible sur la contribution énergétique du radier au global. L'augmentation de l'efficacité des échanges du radier détériore celles des PM de la fiche (Tableau 5). Par ailleurs, on observe dans les 2 cas une amélioration du rendement global moyen (2 à 3%) et une baisse de la puissance totale (-8 à -20%). Ces tendances apparemment contradictoires s'expliquent par la diminution des surfaces d'échange.

Tableau 5. Cas C1/C2 : variations des rendements des éléments de structures / cas de référence

Structure	Cas	Cycle été			Cycle hiver			Moy. annuelle
		Max	Moy.	Min	Max	Moy.	Min	
Radier	C1	+43%	+36%	+34%	+46%	+41%	+29%	+41%
	C2	-13%	+3%	+19%	-14%	+11%	+38%	+6%
PM mur	C1	<+1%	0%	+1%	<+1%	+1%	+1%	<+1%
	C2	<+1%	0%	+1%	+1%	+2%	+3%	<+1%
PM fiche ext.	C1	-9%	-9%	-9%	-8%	-8%	-7%	-9%
	C2	-46%	-42%	-34%	-47%	-40%	-29%	-40%
PM fiche int.	C1	-8%	-12%	-16%	-7%	-11%	-17%	-11%
	C2	-87%	-79%	-65%	-88%	-75%	-60%	-79%
Total (7492 m ²)	C1	+2%	+2%	+2%	+2%	+2%	+4%	+2%
Total (6512 m ²)	C2	<+1%	+3%	+6%	0%	+4%	+11%	+3%

3.2.3. Cas D1/D2 : modèle de perméabilité

Une augmentation des perméabilités d'un facteur 10 entraîne une nette croissance des performances. L'effet est 6 à 7 fois plus impactant qu'une baisse d'un facteur 10 (effet non linéaire). Dans les gammes faibles, la conduction est le mécanisme dominant des transferts de chaleur. La diminution des vitesses d'écoulement et donc du transfert de chaleur par advection rend ce mécanisme minoritaire. A l'inverse, dans les gammes élevées, les transferts de chaleur par advection deviennent prépondérants.

Ce phénomène est d'autant plus marqué que la perméabilité du milieu en liaison direct avec la structure thermiquement active est forte.

Le confinement hydraulique du radier entre les fiches explique la non-proportionnalité des puissances moyennes échangées par les PM extérieures et les PM intérieures / radier : celui-ci est moins sensible à une modification générale des vitesses d'écoulement.

Tableau 6. Cas D1/D2 : variations des rendements des éléments de structures / cas de référence

Structure	Cas	Cycle été			Cycle hiver			Moy. annuelle
		Max	Moy.	Min	Max	Moy.	Min	
Radier	D1	-2%	0%	0%	-3%	0%	-5%	0%
	D2	+4%	+5%	+6%	+8%	+7%	+5%	+6%
PM mur	D1	-9%	-8%	-5%	-11%	-8%	-7%	-8%
	D2	+53%	+46%	+42%	+58%	+54%	+57%	+50%
PM fiche ext.	D1	-24%	-24%	-24%	-26%	-26%	-28%	-25%
	D2	+142%	+160%	+201%	+150%	+188%	+265%	+174%
PM fiche int.	D1	<-1%	0%	0%	-1%	-1%	-3%	0%
	D2	+4%	+5%	+6%	+5%	+7%	+11%	+6%
Total (8332 m ²)	D1	-12%	-11%	-12%	-14%	-14%	-13%	-12%
Total (6512 m ²)	D2	+74%	+79%	+93%	+79%	+92%	+131%	+86%

3.2.4. Cas E1/E2 : modèle de conductivité

La conductivité thermique est un paramètre difficilement accessible à l'échelle d'une géostructure. La technique de mesure la plus répandue est celle du TRT, mais elle ne donne qu'une valeur globale des terrains. Elle est par conséquent souvent approchée à partir d'une description lithologique avec une incertitude de l'ordre de $\pm 25\%$.

Il ressort des résultats des tests (variation de $\pm 25\%$) que la conductivité a un effet non linéaire sur les performances et que les incertitudes sur la conductivité thermique du milieu ne sont pas un facteur limitant quant à l'équipement des structures, au regard des faibles variations sur les performances énergétiques.

Tableau 7. Cas E1/E2 : variations des rendements des éléments de structures / cas de référence

Structure	Cas	Cycle été			Cycle hiver			Moy. annuelle
		Max	Moy.	Min	Max	Moy.	Min	
Radier	E1	-13%	-10%	-9%	-14%	-7%	-10%	-13%
	E2	+9%	+8%	+6%	+11%	+7%	0%	+6%
PM mur	E1	-9%	-10%	-12%	-9%	-11%	-13%	-11%
	E2	+8%	+9%	+11%	+7%	+9%	+11%	+9%
PM fiche ext.	E1	-7%	-8%	-9%	-7%	-8%	-9%	-8%
	E2	+6%	+7%	+7%	+5%	+6%	+7%	+6%
PM fiche int.	E1	-11%	-11%	-11%	-11%	-11%	-14%	-11%
	E2	+8%	+9%	+10%	+8%	+10%	+11%	+10%
Total (8332 m ²)		-9%	-9%	-10%	-9%	-10%	-9%	-9%
		E1	+7%	+8%	+8%	+7%	+8%	+9%
		E2	+8%	+8%	+8%	+8%	+9%	+8%

3.2.5. Cas F1/F2 : scénario d'exploitation

Le rendement énergétique d'une géostructure décroît très sensiblement au cours du temps pour un mode de production donné (chaud ou froid). Les conditions d'exploitation qui répondent aux besoins énergétiques du projet sont donc une donnée d'entrée fondamentale pour apprécier la faisabilité et la viabilité d'une géostructure thermique.

Dans le cas d'une exploitation déséquilibrée en production froid (cas F1, Figure 6), le rendement moyen chute de 30% dès la 1^{ère} année et de 68% la 30^{ème}, mais sans être encore stabilisé, témoignant d'une surexploitation et d'une dérive thermique rapide et continue. La perte d'efficacité est plus marquée au niveau du radier où le système se congestionne plus et plus rapidement du fait du confinement hydraulique. L'absence de recharge thermique (alternance chaud/froid) est très pénalisante et les capacités de recharge naturelle du système sont très insuffisantes.

Même dans le cas d'une exploitation avec une période d'arrêt de 50% du temps (cas F2) le rendement global de l'installation subit une baisse relative encore importante.

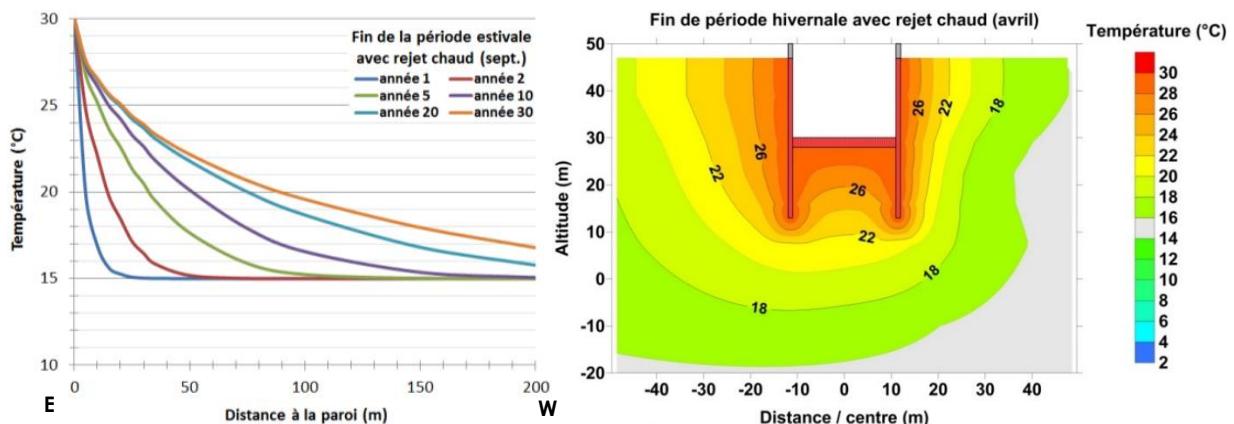


Figure 6. Cas F1 : température - profil à différentes dates (couche 2) et vue en coupe à $t = 30$ ans

L'impact thermique sur le milieu et la nappe devient également alors très important et remet en cause l'intérêt même d'activer la géostructure. Son exploitation doit être équilibrée (alternance cycles chaud/froid ou périodes d'arrêt fréquentes) pour jouer sur la capacité de stockage d'énergie du milieu.

Tableau 8. Cas F1/F2 : variations des rendements des éléments de structures / cas de référence

Structure	Cas	Cycle été			Moy. annuelle	Moy. 1 ^{ère} année
		Max	Moy.	Min		
Radier	F1	-85%	-85%	-84%	-81%	-25%
	F2	-57%	-62%	-66%	-53%	-13%
PM mur	F1	-75%	-75%	-71%	-70%	-30%
	F2	-49%	-56%	-56%	-46%	-8%
PM fiche ext.	F1	-69%	-64%	-55%	-57%	-26%
	F2	-45%	-49%	-45%	-39%	-7%
PM fiche int.	F1	-82%	-83%	-82%	-79%	-38%
	F2	-54%	-62%	-66%	-52%	-13%
Total (8332 m ²)		-75%	-73%	-69%	-68%	-30%
	F2	-49%	-54%	-53%	-44%	-9%

4. Conclusions

Les tests effectués, valables pour le cas étudié sous le logiciel MARTHE, permettent de sortir les tendances suivantes :

- L'équipement du radier présente peu d'intérêt énergétique et donc économique par rapport à l'équipement des parois moulées, et quelle que soit sa position relative. L'activation du radier peut néanmoins se justifier si l'objectif est de franchir un taux de couverture d'un besoin énergétique donné ;
- Les rendements sont bien plus sensibles aux conditions hydrogéologiques (au sens de la vitesse de Darcy) qu'aux paramètres thermiques (conductivité et diffusivité). Cette tendance découle avant tout de la très forte variabilité des perméabilités ;
- Le rendement est étroitement lié aux conditions d'exploitation. Pour un cycle de production donné, la performance se dégrade toujours avec le temps et peut rapidement atteindre une valeur résiduelle qui compromet l'intérêt même de l'investissement. L'enjeu est donc de trouver le meilleur compromis entre la couverture d'un besoin énergétique et la capacité de stockage et de régénération naturelle du milieu.

Il ressort de ces considérations que la conception et le dimensionnement d'un projet de géostructure thermique doit faire l'objet d'une étude contextualisée en intégrant les incertitudes sur les paramètres tout en recherchant la solution technique (et financière) la mieux adaptée pour répondre au besoin énergétique identifié. C'est une approche relativement complexe qui nécessite d'une part de disposer de données fiable et suffisante, d'autre part de définir une stratégie énergétique claire sans perdre de vue que les besoins (en chaud et ou en froid) ne pourront être totalement et toujours couverts.

Enfin, l'approche numérique développée ici considère des hypothèses simplificatrices dont la validité générale reste à vérifier par confrontation avec des outils numériques tels que FEFLOW ou COMSOL qui permettraient notamment de représenter explicitement le fonctionnement des boucles géothermiques noyées dans le béton des structures.

5. Références bibliographiques

L. DEMONGODIN, D. BOULET, Q. BEAUMONT, 2017. Géostructures thermiques : tous les éléments de structures sont-ils bons à équiper ? Revue Tunnels et Espaces souterrains n° 260, Avril/Mai/Juin 2017, Paris, France.

CFMS / SYNTÉC INGENIERIE / SOFFONS-FNTP, 2017. Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques.