

## SUPSI

Istituto sostenibilità applicata all'ambiente costruito

Campus Trevano, CH-6952 Canobbio  
T +41 (0)58 666 63 51, F +41 (0)58 666 63 49

isaac@supsi.ch, www.isaac.supsi.ch  
N. IVA 425.112



OGGETTO

## Site de la caserne des Vernets à Genève

---

TITOLO

## Etude du potentiel géothermique pour le chauffage du site avec un champ de sondes géothermiques

---

COMMITTENTE

Fondation Hans Wilsdorf Rolex SA  
c/o atelier d'architecture Brodbeck-Roulet SA  
12, rue du Pont-Neuf  
CH - 1227 Carouge

---

ESTENSORE DEL RAPPORTO

Prof. Dr. Daniel Pahud, SUPSI – DACD – ISAAC  
Ing. Marco Belliardi, SUPSI – DACD – ISAAC

---

DOCUMENTI

Rapport d'étude

---

LUOGO E DATA

Trevano, 07.09.2011

## **Table des matières**

<b>1. Introduction – objectif de l'étude</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Paramètres pour la simulation du système</b> .....	<b>4</b>
2.1. Besoins thermiques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire .....	4
2.2. Rejets thermiques .....	5
2.3. Température de distribution .....	8
2.4. Pompe à chaleur (PAC) .....	8
2.5. Sondes géothermiques .....	9
2.6. Interface terrain - structure .....	11
2.7. Propriétés thermiques du terrain .....	11
2.8. Températures limites du fluide dans le circuit des sondes.....	11
<b>3. Résultats des simulations – phase 1</b> .....	<b>13</b>
3.1. Dimensionnement du champ de sondes géothermiques .....	13
3.2. Influence de la recharge thermique du terrain.....	14
3.3. Puissance et disponibilité des rejets thermiques.....	17
3.4. Potentiel de recharge des rejets thermiques.....	18
3.5. Potentiel géothermique du nouveau site des Vernets.....	20
3.6. Remarques – phase 1 .....	20
<b>4. Résultats des simulations – phase 2</b> .....	<b>21</b>
4.1. Chauffage du site de la caserne des Vernets en valorisant des rejets en bande .....	22
4.2. Chauffage du site de la caserne des Vernets en valorisant les rejets Rolex .....	24
4.3. Potentiel de chauffage du site de la caserne des Vernets avec des rejets en bande .....	26
<b>5. Résultats des simulations – phase 3</b> .....	<b>28</b>
5.1. Potentiel avec 718 sondes géothermiques .....	29
5.2. Potentiel avec 437 sondes géothermiques .....	30
<b>6. Conclusion</b> .....	<b>31</b>
<b>7. Glossaire</b> .....	<b>33</b>

## 1. Introduction – objectif de l'étude

Dans le cadre d'une étude de développement du site de la caserne des Vernets à Genève, un concept énergétique doit être développé et validé pour permettre de satisfaire les exigences énergétiques de ce nouveau quartier. Il abritera des immeubles bas et hauts pour des habitations familiales, la faculté de physique de l'université de Genève et des logements pour étudiants.

L'ISAAC de la SUPSI a été mandaté par la Fondation Hans Wilsdorf SA pour étudier une option géothermique. Il s'agit d'évaluer le potentiel thermique d'un stockage de chaleur souterrain formé par un champ de sondes géothermiques pour le chauffage des bâtiments du nouveau quartier.

Une des caractéristiques de ce projet est l'asymétrie très forte entre les besoins de refroidissement et de chauffage du site. Un centre informatique devra être refroidi avec une puissance de refroidissement constante d'environ 2'000 kW. Dans le voisinage du quartier des rejets thermiques sont également disponibles avec une puissance thermique encore plus importante. En revanche, les besoins thermiques de chauffage sont beaucoup moins importants. Même si la puissance de pointe se situe à environ 3'000 kW, l'énergie thermique annuelle pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des bâtiments reste beaucoup plus faible que l'énergie annuelle de refroidissement pour l'évacuation des rejets thermiques. En effet, en supposant une durée typique de fonctionnement de 2'000 heures annuelles, les besoins thermiques de chauffage se montent à environ 6'000 MWh/a. On peut les comparer à une énergie de refroidissement de 16'000 MWh/a pour l'évacuation des rejets thermiques (en se basant sur 8'000 heures de fonctionnement par an).

L'objectif principal de l'étude se résume à évaluer la faisabilité technique et le pré-dimensionnement d'un champ de sondes géothermiques pour le chauffage des nouveaux bâtiments du site. Une partie des rejets thermiques estivaux pourra être valorisée pour la recharge du champ de sondes, le reste étant dissipé dans les eaux de l'Arve. Le potentiel offert par l'option géothermique sera également évalué en supposant une utilisation totale des surfaces disponibles du site pour l'implémentation des sondes géothermiques.

L'étude est articulée en trois phases successives :

- phase 1 : étude du potentiel de stockage saisonnier d'un champ de sondes géothermiques pour le chauffage des nouveaux bâtiments du site de la caserne des Vernets. Le dimensionnement du système est obtenu en optimisant l'espacement entre les sondes et leur nombre. Les caractéristiques de la recharge thermique du terrain, nécessaires au bon fonctionnement du système, sont établies. Deux variantes de système sont considérées : « eau et antigel » ou « eau pure » dans le circuit des sondes géothermiques.

Il ressort de la première phase que les rejets thermiques de Rolex, s'ils sont ajoutés aux rejets de bande déjà existants, ne permettent pas d'améliorer le dimensionnement du système. Ce résultat a conduit à la deuxième phase du projet :

- phase 2 : la recharge thermique du terrain est réalisée soit par des rejets thermiques de bande, soit par les rejets thermiques de Rolex. La variante de système « eau pure » est choisie pour l'analyse.

- phase 3 : le potentiel de chauffage de la parcelle des Vernets est évalué dans la situation où le maximum de sondes géothermiques sont posées. Les besoins thermiques du nouveau site de la caserne des Vernets sont utilisés comme référence unitaire pour la demande de chaleur qui peut potentiellement être satisfaite.

L'étude se base sur les documents et les informations suivantes :

- géologie et propriétés thermiques du terrain : rapport Test de réponse thermique du terrain de Swiss Geo testing, 9 mai 2011 ;
- rejets thermiques disponibles dans le quartier : rapport Projet Rolex-Vernets, phase D : boucle d'anergie de Amstein + Walthert, 12 janvier 2011 ;
- développement du site des Vernets, besoins thermiques et concept énergétique : collaboration étroite avec le bureau RG Riedweg & Gendre SA et l'Atelier d'architecture Brodbeck-Roulet SA.

Le programme de calcul PILESIM2 est utilisé pour effectuer les simulations de l'installation géothermique.

## 2. Paramètres pour la simulation du système

Dans ce chapitre les hypothèses et les paramètres de calcul sont exposés.

Les paramètres de simulation doivent permettre de caractériser du point de vue thermique le système afin de pouvoir simuler son fonctionnement et déterminer ses performances thermiques. Les principaux groupes de paramètres concernent en premier lieu la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement, les dimensions, les propriétés et la disposition des sondes géothermiques, ainsi que les propriétés thermiques du terrain.

### 2.1. Besoins thermiques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

Les énergies annuelles de chauffage et d'eau chaude sanitaire, ainsi que les puissances de pointe à couvrir, ont été estimées par le bureau RG Riedweg & Gendre SA. Elles sont basées sur 110'000 m<sup>2</sup> de surface de logement et 51'000 m<sup>2</sup> de surface pour l'université.

Les valeurs obtenues des puissances thermiques de pointe et des énergies annuelles de chaleur sont les suivantes :

Puissance maximum nécessaire pour le chauffage des locaux:	2'400 kW
Besoin annuel d'énergie pour le chauffage des locaux :	4'350 MWh/a
Puissance maximum nécessaire pour l'eau chaude sanitaire (ECS) :	600 kW
Besoin annuel d'énergie pour l'ECS :	2'600 MWh/a

#### 2.1.1. Phase 1 de l'étude :

La période de chauffage s'étend sur 6 mois, du mois d'octobre au mois de mars inclus. Le reste de l'année, il est important de pouvoir recharger le terrain. Ce sont les rejets thermiques qui permettront de le faire. Dans la phase 1 de l'étude, le potentiel des sondes géothermiques est

étudié pour leur capacité de stockage saisonnier dans le terrain. C'est la raison pour laquelle l'eau chaude sanitaire n'est considérée que pendant les 6 mois de chauffage. Le reste de l'année, on suppose que l'eau chaude sanitaire est entièrement couverte par la valorisation des rejets thermiques sans passer par les sondes. En conséquence, le besoin d'énergie pour l'ECS couvert par l'installation géothermique est diminué de moitié.

Phase 1 : énergie annuelle d'ECS couverte par l'installation géothermique : 1'300 MWh/a

### **2.1.2. Phase 2 de l'étude :**

Dans la phase 2 de l'étude, la totalité des besoins thermiques du nouveau site des Vernets sont considérés. Autrement dit les besoins d'eau chaude sont pris en compte toute l'année. Leur simultanéité avec des rejets thermiques signifie une valorisation directe de ces derniers par une pompe à chaleur.

Phase 2 : énergie annuelle d'ECS couverte par l'installation géothermique : 2'600 MWh/a

### **2.1.3. Phase 3 de l'étude :**

Dans la phase 3 de l'étude, en plus de la totalité des besoins thermiques du nouveau site des Vernets, des rejets thermiques en bande sont considérés toute l'année (cf. section 2.2). Ces derniers sont donc valorisés directement, lorsqu'il y a concomitance avec des besoins de chauffage ou d'eau chaude sanitaire, ou indirectement, en étant stocké dans le terrain.

## **2.2. Rejets thermiques**

Dans le voisinage du quartier les rejets thermiques de l'Hôtel de Police se montent à 2'000 kW en permanence. Des rejets de 3'360 kW sont également disponibles en été de début juin à fin août en provenance du bâtiment Rolex. D'autre part le server de l'université prévu sur le site de la caserne des Vernets aura des rejets thermiques estimés à 2'000 kW en permanence. Ils seront transportés dans un réseau d'énergie dont la température sera de l'ordre de 20 – 25 °C.

Quand les rejets thermiques ne peuvent pas être valorisés et doivent être dissipés dans l'environnement, ils peuvent être envoyés dans le circuit des sondes géothermiques pour la recharge thermique du terrain.

Dans les phases 1 et 2, on considère que les rejets thermiques sont disponibles pour les sondes du mois d'avril à septembre, donc en dehors de la période de chauffage.

Dans la phase 1 de l'étude il sont fixés à 2'000 kW, sauf pendant les mois de juin à août, durant lesquels les rejets de Rolex sont additionnés. Ce sont les rejets thermiques qui sont disponibles actuellement.

Des profils annuels en valeurs horaires des demandes de chauffage, d'eau chaude et de refroidissement ont été créés pour PILESIM2 sur la base des valeurs météorologiques. Les profils de base des puissances horaires de chaleur (chauffage et ECS) et de refroidissement (rejets thermiques), utilisés pour les simulations, sont montrés dans le graphique 2-1. Ils permettent de reproduire les puissances de pointe et les énergies annuelles estimées.

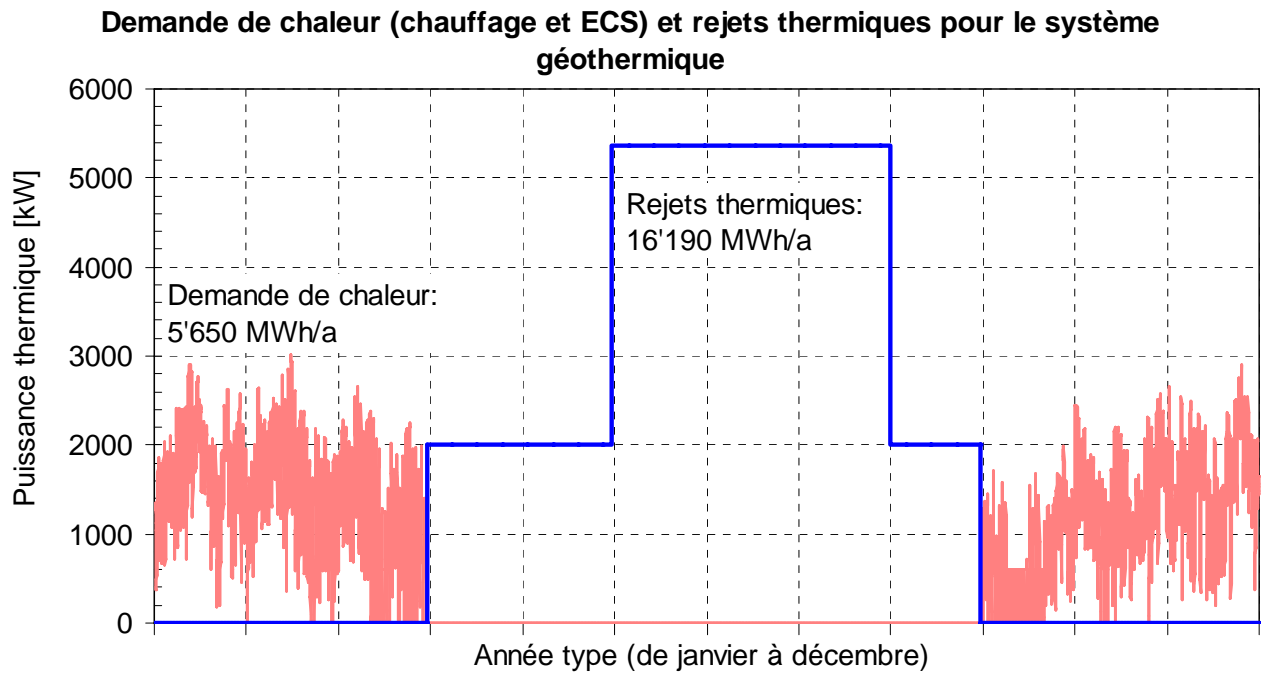


Figure 2-1 Evolutions annuelles des puissances de chauffage et des rejets thermiques en valeurs horaires pour la phase 1 de l'étude.

Dans la phase 2 de l'étude, les rejets thermiques sont soit les rejets de bande, soit les rejets de Rolex. Ils sont montrés dans les figures 2-2 et 2-3. La demande de chaleur considère cette fois la totalité des besoins d'eau chaude sanitaire.

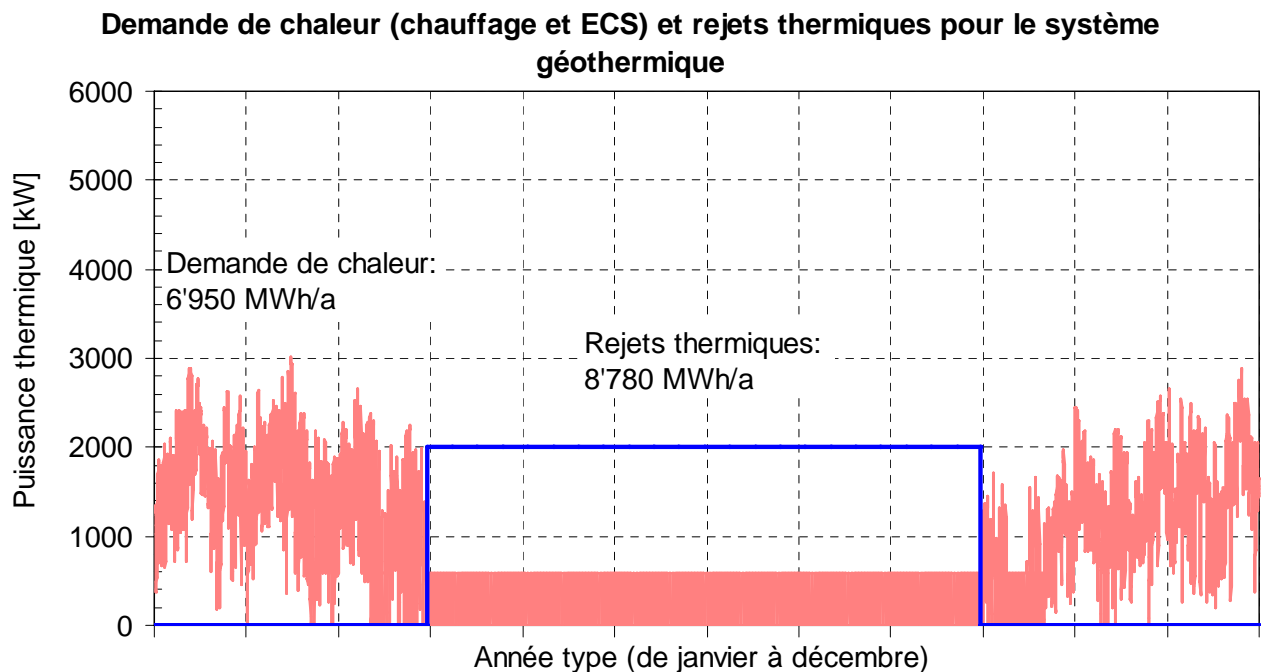


Figure 2-2 Evolutions annuelles des puissances de chauffage et des rejets thermiques en valeurs horaires pour la phase 2 de l'étude – variante rejets thermiques de bande.

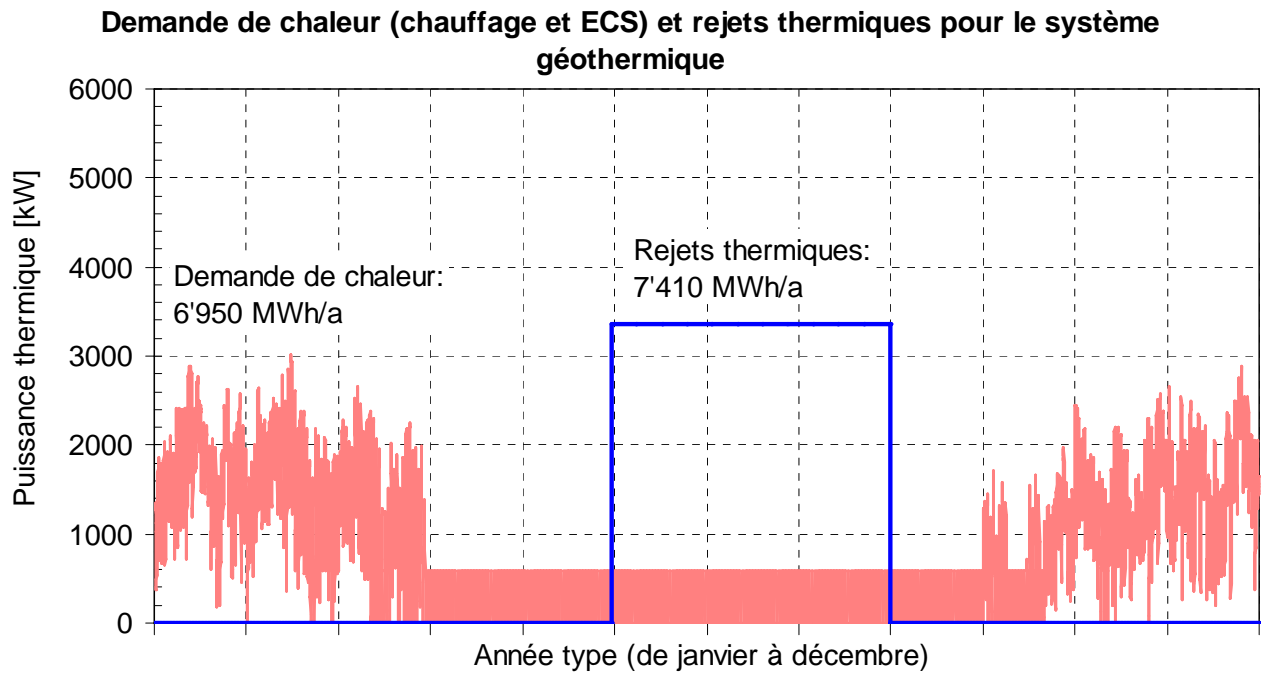


Figure 2-3 Evolutions annuelles des puissances de chauffage et des rejets thermiques en valeurs horaires pour la phase 2 de l'étude – variante rejets thermiques de Rolex.

Dans la phase 3 de l'étude, la bande des rejets thermiques est considérée sur toute l'année.

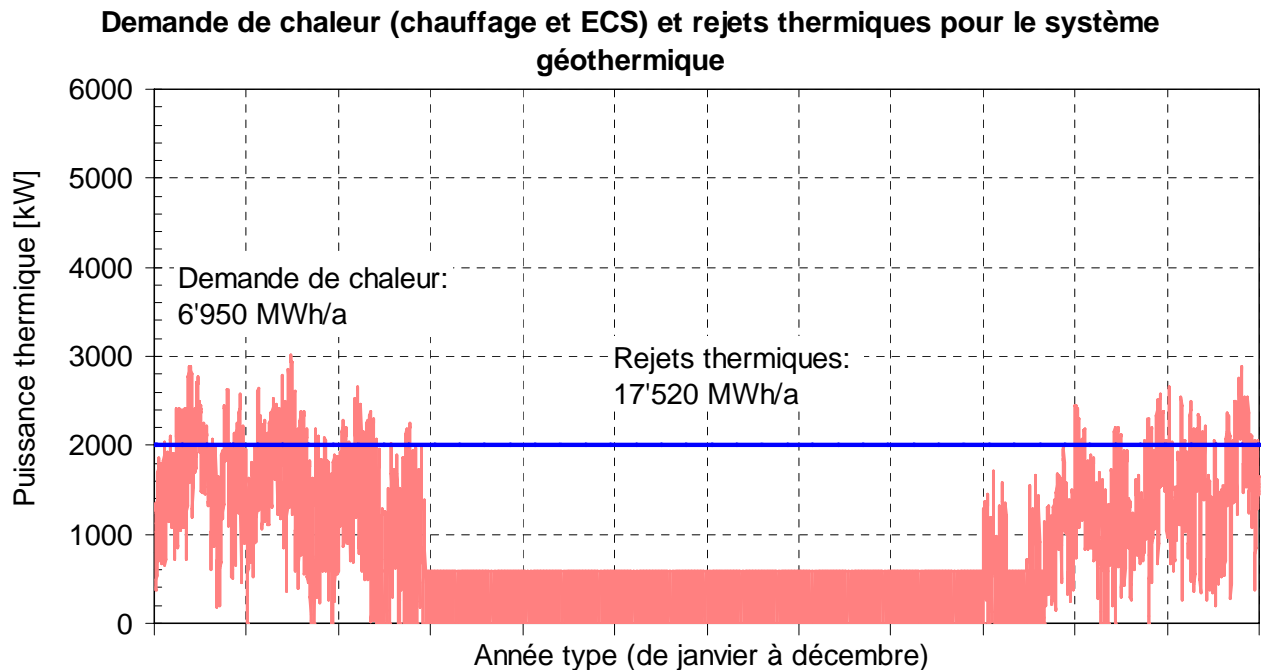


Figure 2-4 Evolutions annuelles des puissances de chauffage et des rejets thermiques en valeurs horaires pour la phase 3 de l'étude – rejets thermiques en bande toute l'année.

### 2.3. Température de distribution

Les températures de distribution de l'énergie thermique influencent fortement le coefficient de performance (COP) des pompes à chaleur. Comme le COP est fixé à une valeur constante dans les simulations, l'effet des températures de distribution est intégré dans la valeur moyenne attendue du COP (cf. section suivante).

La température des rejets thermiques, quant à elle, influence très fortement la recharge thermique du terrain. Dans le rapport « Projet Rolex-Vernets, phase D : boucle d'anergie », la température du fluide qui transporte les rejets thermiques ne sera pas inférieure à 20°C.

Dans le cas de référence, on suppose que le fluide utilisé pour l'évacuation des rejets thermiques est refroidi de 24 à 20°C. Ces températures sont appelées respectivement « température de retour des rejets thermiques » (TrR) et « température aller des rejets thermiques » (TaR). Comme un échangeur de chaleur doit séparer le circuit des sondes du circuit des rejets thermiques, les températures du fluide caloporteur dans le circuit des sondes seront encore plus basses.

La chute de température dans l'échangeur de chaleur est fixée à 2 K. Cela signifie que la température de sortie du circuit des sondes ne pourra pas dépasser la valeur maximum de 18°C pour obtenir une température de 20°C du côté du circuit des rejets thermiques. La figure 2-5 permet de représenter les niveaux de température de part et d'autre de l'échangeur de chaleur. Les résultats des simulations ont montré que ces températures sont trop basses pour permettre une recharge suffisante du champ de sondes.

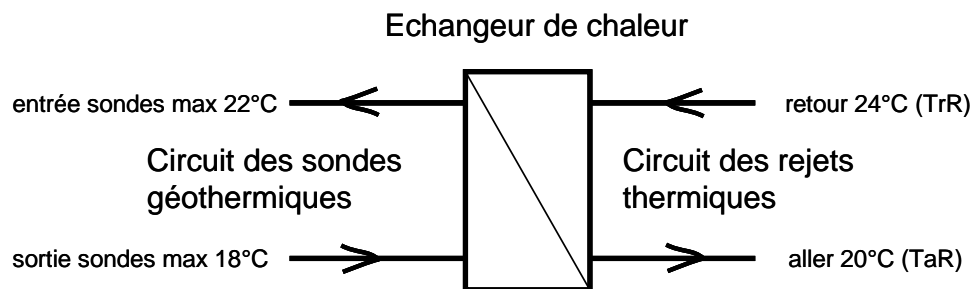


Figure 2-5 Températures maximum dans le circuit des sondes géothermiques pour assurer une température aller de 20°C dans le circuit des rejets thermiques.

### 2.4. Pompe à chaleur (PAC)

Le coefficient de performance (COP) est influencé par la température de travail de la PAC. Il est plus élevé pour le chauffage (jusqu'à 5) que pour l'eau chaude sanitaire (environ 3). Par simplicité, un coefficient de performance constant de 4 est attribué à la PAC :

Coefficient de performance de la pompe à chaleur: 4 – (fixé constant)

La puissance de la PAC doit permettre de satisfaire la totalité des besoins de chaleur et correspond à 3'000 kW.



## 2.5. Sondes géothermiques

Il est possible de réaliser des sondes géothermiques de 300 m sur le site. Une sonde en double-U a été posée pour faire un test de réponse géothermique. Les résultats du test, outre à déterminer les paramètres thermiques locaux du terrain (cf. section suivante), permettent de caractériser les propriétés de transfert de chaleur de la sonde.

La résistance thermique effective de la sonde ( $R_b^*$ ) est recalculée dans les conditions du test en prenant les caractéristiques géométriques et thermiques des composants de la sonde. L'écartement moyen des tubes en U dans le forage est ajusté pour obtenir la résistance thermique effective du test de réponse. Une valeur habituelle et raisonnable est obtenue, qui correspond à un jeu de 8 mm entre le diamètre du forage (136 mm) et la largeur moyenne occupée par un tube en U (128 mm, distance mesurée entre 2 tubes opposés, depuis les bords extérieurs).

Dans les figures 2-6 et 2-7, la résistance thermique effective de la sonde est montrée en fonction du débit traversant la sonde, respectivement pour de l'eau pure et pour un mélange d'eau et d'éthylèneglycol.

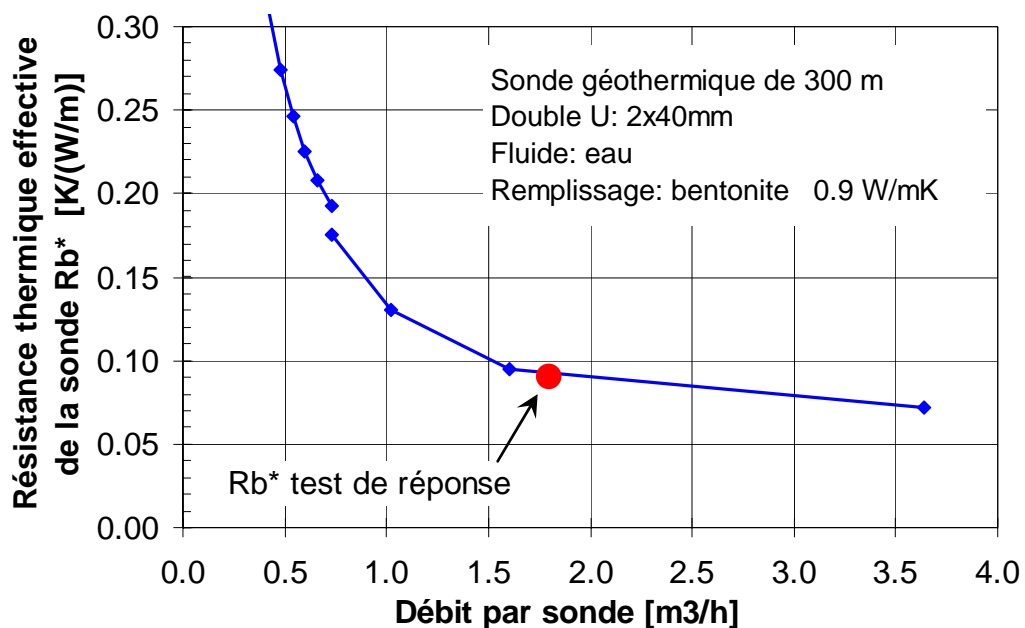


Figure 2-6 Résistance thermique effective de la sonde en fonction du débit de fluide qui la traverse. Le fluide caloporteur est de l'eau pure comme dans le test de réponse. La valeur obtenue pour la sonde test est indiquée par le point dans le graphe.

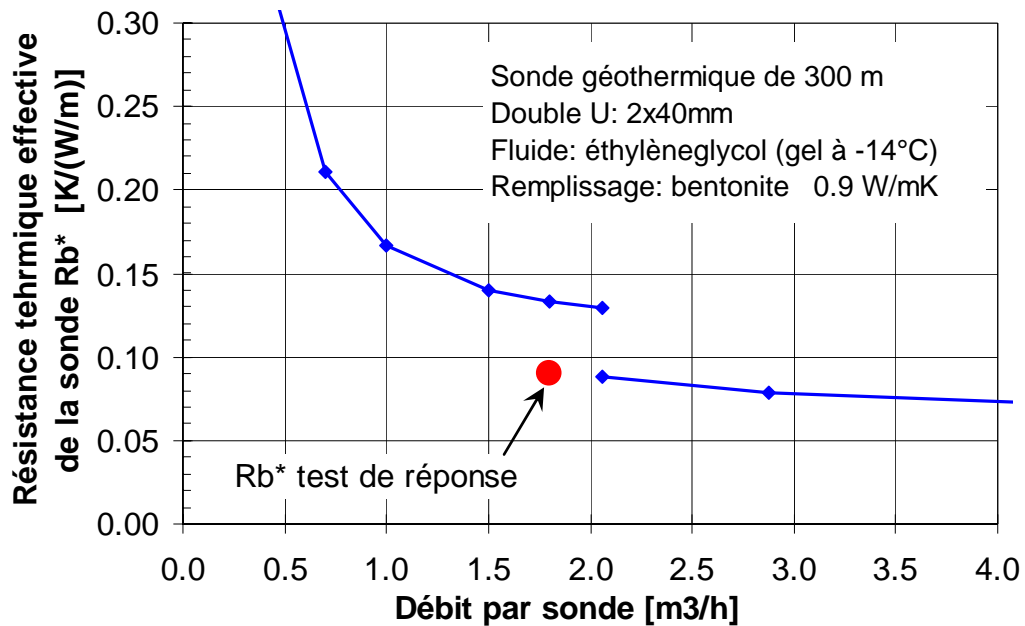


Figure 2-7 Résistance thermique effective de la sonde en fonction du débit de fluide qui la traverse. Le fluide caloporteur est un mélange d'eau et d'éthylèneglycol. Le saut est lié au régime d'écoulement, qui passe de laminaire à non laminaire dans les tubes.

Avec de l'eau pure comme fluide caloporteur, il suffit que le débit soit supérieur à 0.7 m<sup>3</sup>/h pour que le régime d'écoulement ne soit pas laminaire. Mais un débit supérieur à 1.5 m<sup>3</sup>/h est recommandé, ceci pour limiter les effets négatifs des transferts de chaleur internes dans la sonde, qui se répercutent par une augmentation de la résistance thermique effective. Cette dernière a tendance à devenir toujours plus élevée à mesure que le débit diminue.

Avec un mélange d'eau et d'antigel, le passage de laminaire à non laminaire se fait à un débit plus élevé, calculé à 2.1 m<sup>3</sup>/h pour une concentration d'éthylèneglycol de 25%. Il est donc recommandé, dans ce cas, de ne pas avoir un débit de fluide inférieur à 2.1 m<sup>3</sup>/h par sonde.

Les calculs effectués pour une sonde en double-U avec des tubes de 50 mm montrent des caractéristiques semblables. La différence principale provient du débit minimum pour obtenir un régime d'écoulement non laminaire dans la sonde. Le débit doit être supérieur à 0.9 m<sup>3</sup>/h pour de l'eau pure et à 2.6 m<sup>3</sup>/h pour un mélange d'eau et d'éthylèneglycol concentré à 25%.

Dans le programme PILESIM2, la résistance thermique effective ( $R_b^*$ ) est calculée en fonction de la résistance thermique locale ( $R_b$ ) de la sonde, de sa résistance thermique interne ( $R_a$ ), du débit ( $Q$ ) traversant la sonde et de sa longueur ( $H$ ). Avec un débit de fluide supérieur à 2.1 m<sup>3</sup>/h, les valeurs de  $R_b$  et  $R_a$  sont les mêmes indépendamment du type de fluide, que ce soit de l'eau pure ou un mélange d'eau et d'antigel. Il est important, dans les deux cas, que le régime d'écoulement ne soit pas laminaire.

Les valeurs des paramètres retenus pour les simulations sont donc les suivantes :

• Nombre de sondes	à déterminer
• Longueur active d'une sonde (H)	300 m
• Diamètre d'une sonde	0.136 m
• Type de sonde	double-U
• Diamètre extérieur/intérieur tubes en polyéthylène	40 / 32 mm
• Débit de fluide par sonde géothermique (Q)	2.1 m <sup>3</sup> /h
• Résistance thermique R <sub>b</sub> d'une sonde (régime non laminaire)	0.07 K/(W/m)
• Résistance thermique interne R <sub>a</sub> d'une sonde (non laminaire)	0.30 K/(W/m)
• Surface disponible (sans l'emprise des bâtiments)	28'000 m <sup>2</sup>
• Espacement moyen entre les sondes	à déterminer

Si par exemple on adopte un espacement de 10m, le nombre maximum de sondes se monte à 280.

## 2.6. Interface terrain - structure

Comme il n'est pas prévu de placer les sondes sous les bâtiments, elles se trouveront à l'extérieur ou sous des infrastructures comme des garages. Toutes les variantes se réfèrent à une température en surface qui correspond à la température extérieure. La longueur des connexions horizontales qui relient les sondes aux distributeurs est fixée à zéro, afin de ne pas prendre en compte leur effet positif dans le dimensionnement.

## 2.7. Propriétés thermiques du terrain

Les propriétés thermiques du terrain et sa température initiale ont été déterminées in situ avec un test de réponse géothermique exécuté par Swiss Geo Testing Sàrl sur la sonde de 300m.

Les caractéristiques du terrain adoptées pour la simulation sont élaborées sur la base des résultats du test de réponse:

• Conductivité thermique du terrain	2.3 W/mK
• Capacité thermique volumétrique du terrain	2.3 MJ/m <sup>3</sup> K
• Température initiale du terrain vers la surface	12.1 °C
• Gradient de température géothermique moyen	30 K/km

## 2.8. Températures limites du fluide dans le circuit des sondes

La température du fluide caloporteur circulant dans le circuit des sondes doit rester à l'intérieur de limites prescrites, aussi bien pour le fonctionnement du système à court terme (1 an) qu'à long terme (50 ans).

La valeur minimum tolérée ( $T_{min}$ ) dépend de la variante simulée. Si le fluide caloporteur est un mélange d'eau et d'antigel, la température du fluide est limitée à  $0^{\circ}\text{C}$ , de façon à éviter tout risque de gel des infrastructures qui sont placées au-dessus des sondes (chemins, garages ou autre).

Dans la variante où de l'eau pure est utilisée, la température minimum est conditionnée par la valeur minimum que les pompes à chaleur peuvent tolérer à la sortie de leur évaporateurs. Une valeur minimum de  $+4^{\circ}\text{C}$  est fixée.

La température maximum est conditionnée par le niveau de température des rejets thermiques. Celui-ci est défini par la température aller dans le réseau des rejets thermiques ( $T_{aR}$ ). Il est fixé à  $20^{\circ}\text{C}$  pour le cas de référence (cf. section 2.3).

Les limites de température doivent être vérifiées sur un horizon temporel de 50 ans, comme indiqué dans la norme SIA 384/6 :2010.

Le système optimal doit permettre de satisfaire les limites de température avec le nombre minimum de sondes géothermiques. Le concept de système doit favoriser un bon COP, de façon à valoriser au mieux la ressource géothermique.

### 3. Résultats des simulations – phase 1

Les simulations ont été exécutées de façon à dimensionner la longueur totale des sondes nécessaires pour le chauffage du nouveau site de la caserne des Vernets. Les besoins thermiques à satisfaire sont montrés dans la figure 2-1 du chapitre 2.

Deux variantes de base sont considérées :

- « eau et antigel » dans le circuit des sondes géothermiques ;
- « eau pure » dans le circuit des sondes géothermiques.

Les simulations ont été exécutées de façon à explorer la sensibilité du dimensionnement à :

- l'espacement entre les sondes ;
- le niveau de température des rejets thermiques ;
- la puissance et la disponibilité dans le temps des rejets thermiques.

Finalement le potentiel de chauffage du champ des sondes géothermiques est évalué dans la situation où la totalité de la surface disponible est occupée par les sondes.

#### 3.1. Dimensionnement du champ de sondes géothermiques

Les simulations débutent en octobre, ce qui signifie que le terrain est d'abord refroidi pour satisfaire les besoins de chauffage du premier hiver avant d'être rechargé par les rejets thermiques. Toutes les simulations ont été faites avec un débit de 2.1 m<sup>3</sup>/h par sonde.

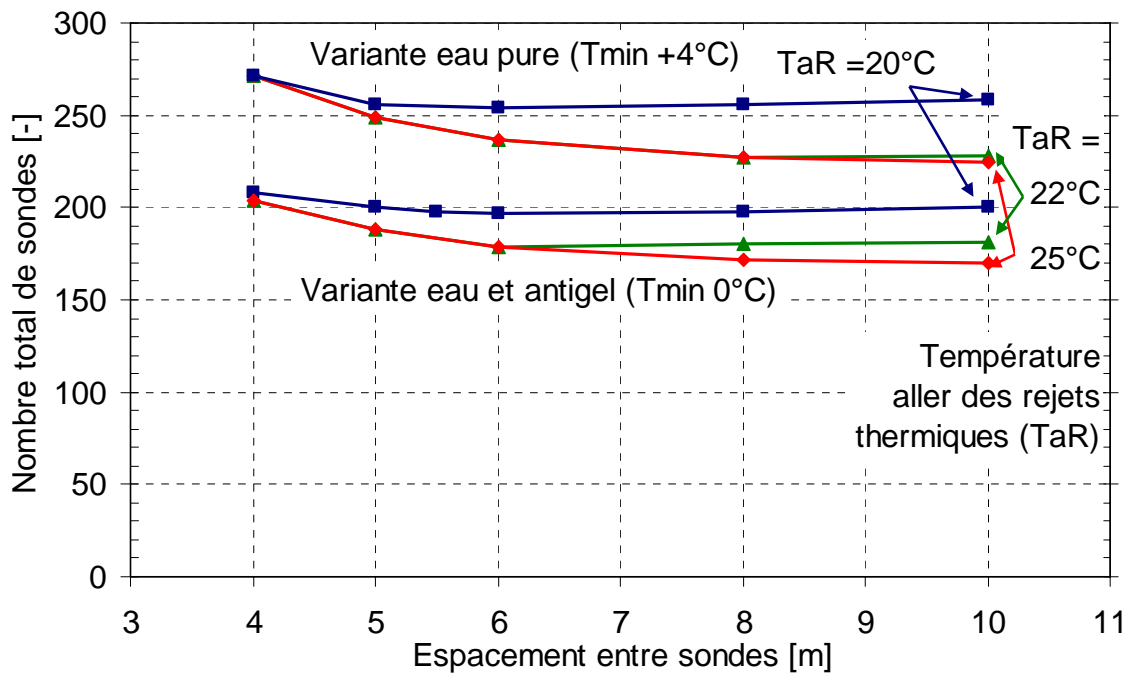


Figure 3-1 Nombre de sondes de 300m nécessaires pour satisfaire les besoins thermiques du nouveau site de la caserne des Vernets. Le nombre de sondes est représenté en fonction de leur espacement et de la température des rejets thermiques pour les variantes « eau et antigel » et « eau pure ».

### 3.2. Influence de la recharge thermique du terrain

Le taux de recharge du terrain est déterminé par la température des rejets thermiques et aussi par l'espacement entre les sondes. Il existe une température, appelée température minimum des rejets thermiques, qui permet, pour un espacement donné, d'avoir la longueur minimum des sondes nécessaires.

L'influence de la recharge est analysée avec la variante « eau et antigel ».

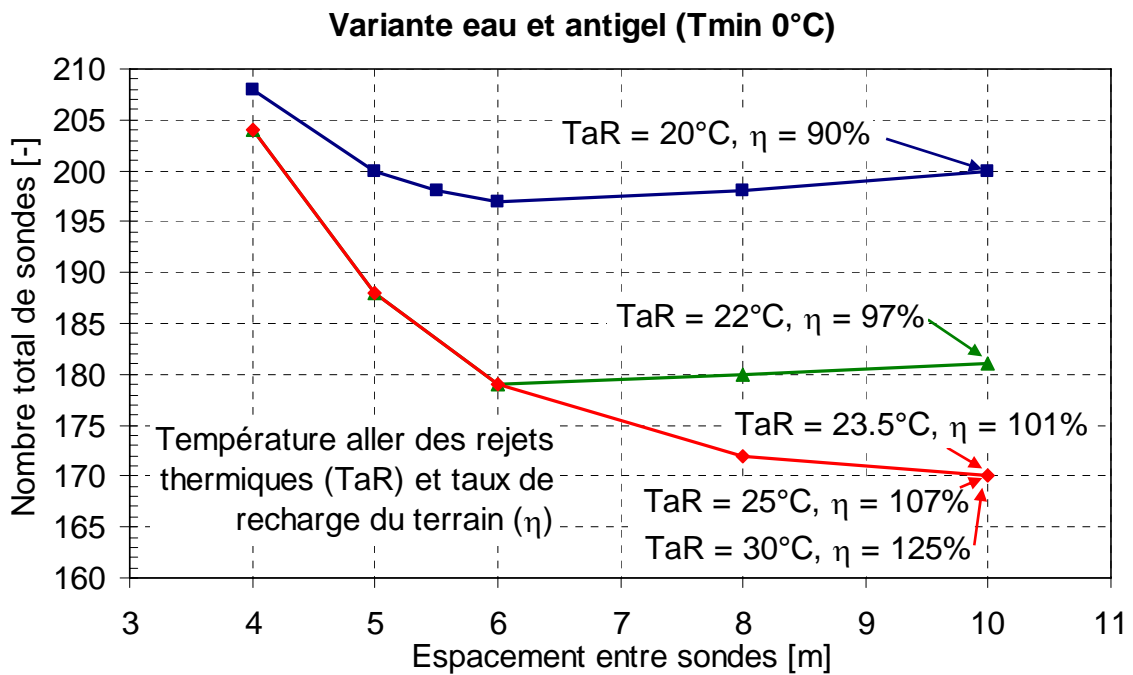


Figure 3-2 La température des rejets thermiques (TaR), et donc le taux de recharge du terrain (η), permet de diminuer le nombre de sondes si ce dernier augmente tout en restant inférieur à 100%. Pour un taux de recharge supérieur, le nombre de sondes ne diminue pas davantage car le dimensionnement est conditionné par le premier hiver.

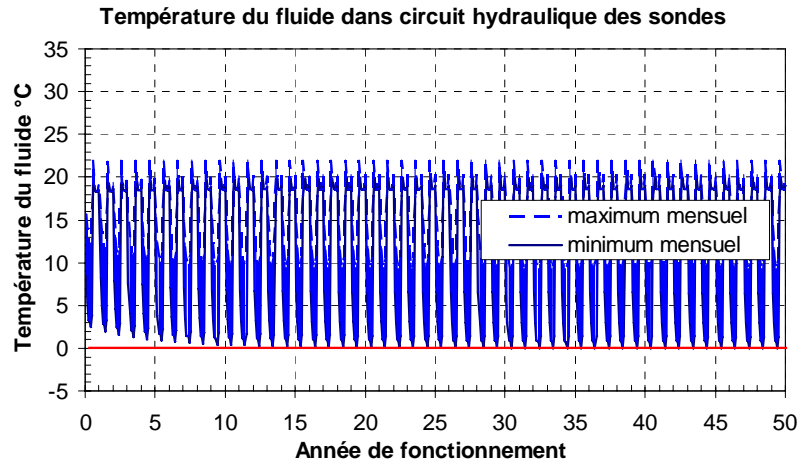


Figure 3-3a : Variante « eau et antigel », espacement de 10m, température des rejets thermique: **20°C** – taux de recharge du terrain: **90%**. Le dimensionnement est conditionné par les effets à court terme et à long terme.

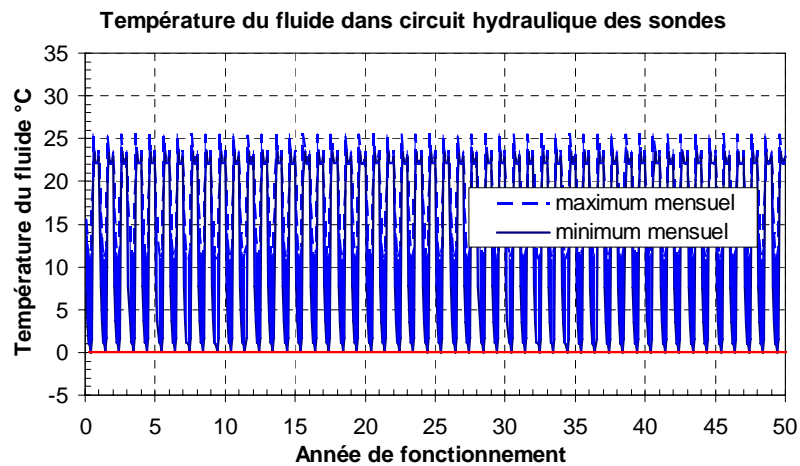


Figure 3-3b : Variante « eau et antigel », espacement de 10m, température des rejets thermique: **23.5°C** – taux de recharge du terrain: **101%**. Le dimensionnement est conditionné par les effets à court terme seulement.

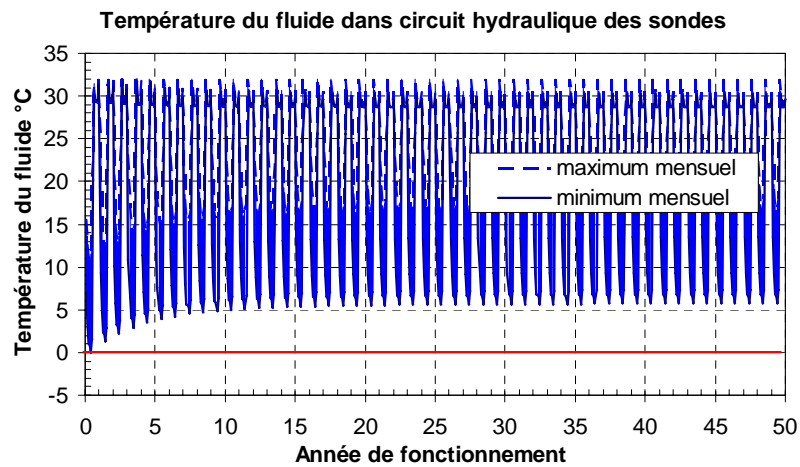


Figure 3-3c : Variante « eau et antigel », espacement de 10m, température des rejets thermiques: **30°C** – taux de recharge du terrain: **125%**. Le dimensionnement est conditionné par les effets à court terme seulement.

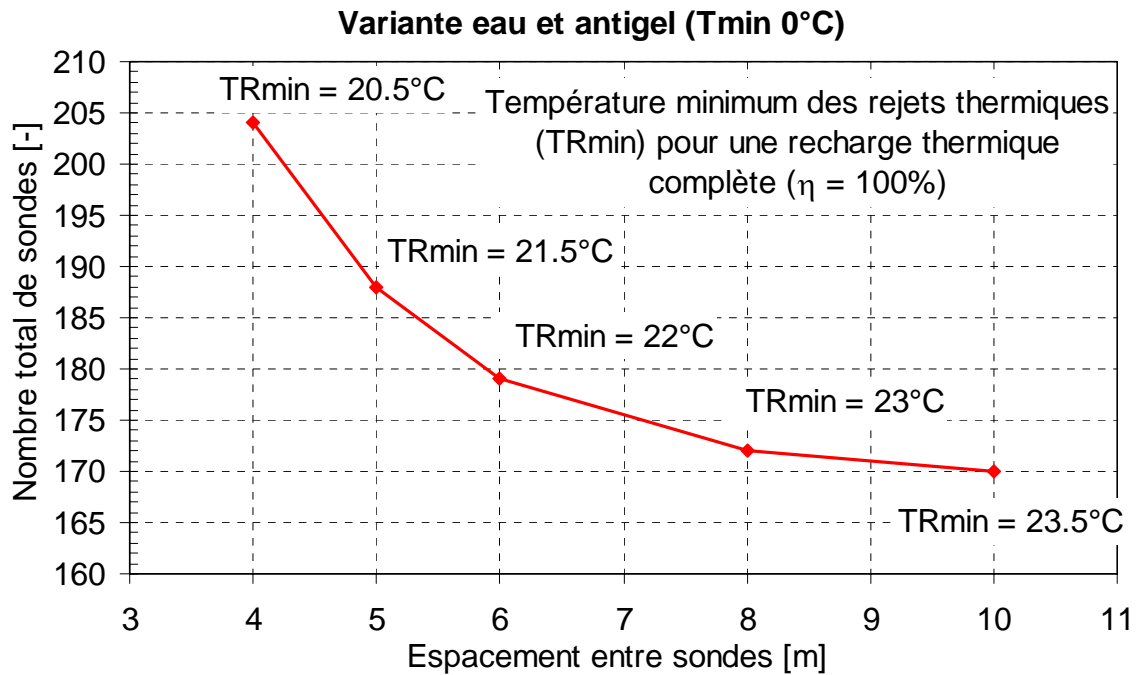


Figure 3-4 Nombre de sondes en fonction de leur espacement pour la variante « eau et antigel ». La température minimum des rejets thermiques est celle qui permet de recharger complètement le terrain.

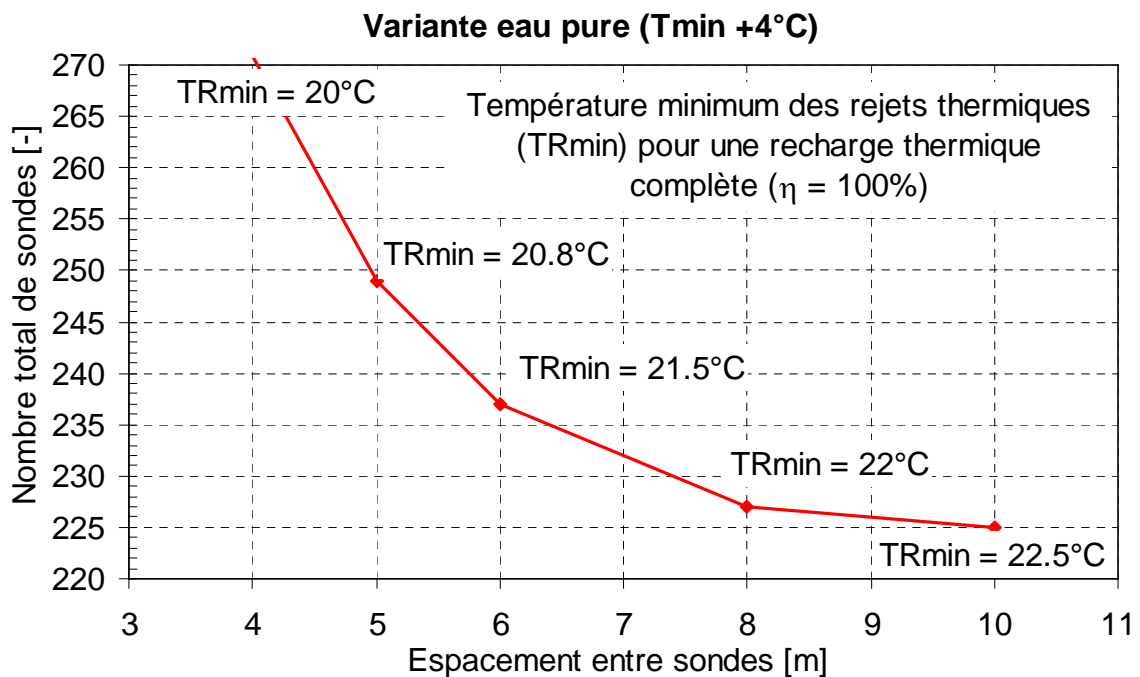


Figure 3-5 Nombre de sondes en fonction de leur espacement pour la variante « eau pure ». La température minimum des rejets thermiques est celle qui permet de recharger complètement le terrain.



### 3.3. Puissance et disponibilité des rejets thermiques

L'évolution de la puissance des rejets thermiques qui sont injectés dans le terrain est conditionnée par la température des rejets (TaR). La figure 3-6 montre l'évolution des rejets injectés dans le terrain pour le cas « eau et antigel » avec un espacement de 10 m entre les sondes et une recharge thermique de 100% (température des rejets de 23.5°C).

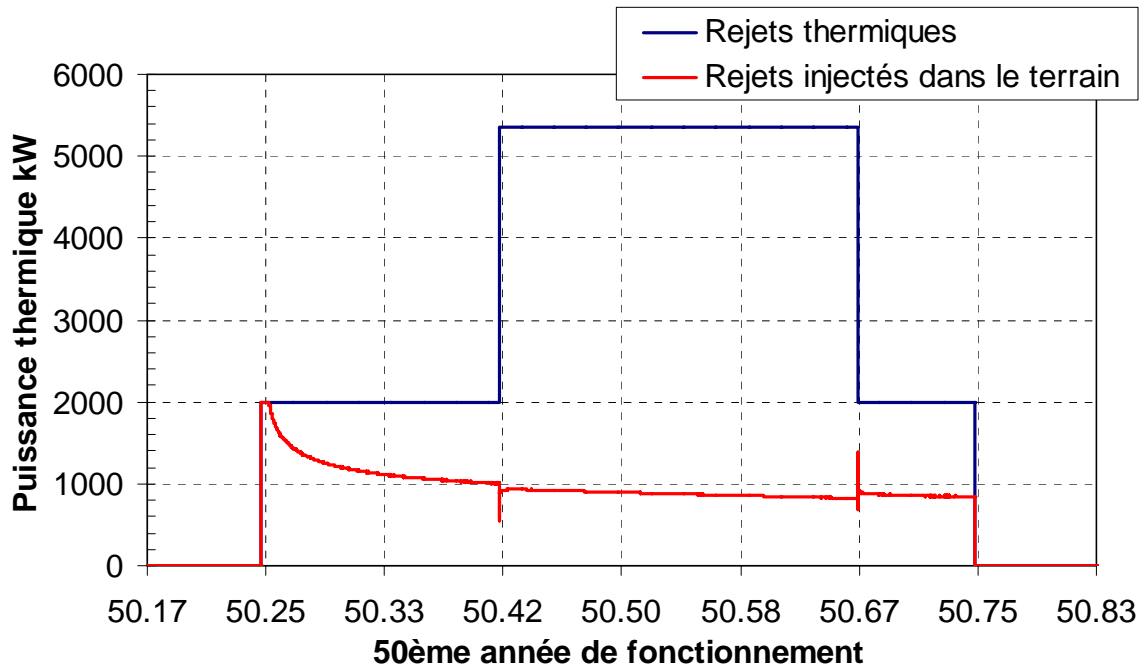


Figure 3-6 Puissance des rejets thermiques disponible pour les sondes géothermique (d'avril à septembre inclus) et part injectée dans le terrain.

La puissance thermique de 2'000 kW est largement suffisante pour la recharge thermique du terrain. Il est important de pouvoir effectuer la recharge dès le mois d'avril et en continu sur 6 mois. En revanche les rejets thermiques estivaux de Rolex n'ont aucune influence sur la recharge.

### 3.4. Potentiel de recharge des rejets thermiques

Un facteur d'échelle est appliqué aux puissances horaires des besoins thermiques de chauffage et d'eau chaude sanitaire, à la puissance des pompe à chaleur et au nombre de sondes géothermiques. Les rejets thermiques, quant à eux, ne sont pas amplifiés afin de tester jusqu'à quel point le système peut fonctionner avec les mêmes clefs de dimensionnement, c'est-à-dire avec la même puissance thermique d'extraction et la même énergie annuelle extraite par mètre de sonde. Le critère d'acceptation est la température minimum atteinte dans le circuit des sondes. Si, avec un facteur d'échelle supérieur à 1, la température minimum du fluide dans les sondes ne baisse pas sensiblement, alors le profil des rejets thermiques à disposition pour les sondes est suffisant pour recharger le terrain.

Pour cette analyse, la variante « eau et antigel » est utilisée avec un espacement entre les sondes de 8m. La température des rejets thermiques est de 22°C et le nombre de sondes 180 avec un facteur d'échelle de 1.

Dans la figure 3-7, la température minimum du fluide dans les sondes est reportée en fonction du facteur d'échelle.

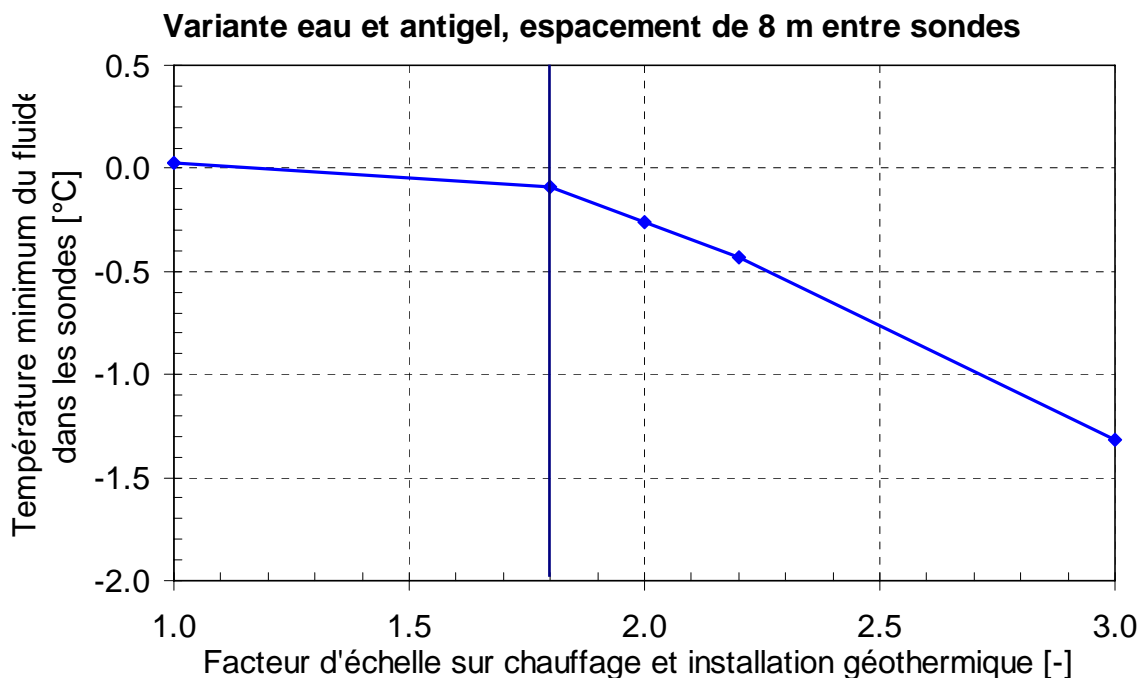


Figure 3-7 Température minimum du fluide dans les sondes en fonction du facteur d'échelle appliqué sur les besoins thermiques à couvrir et le système géothermique. A partir d'un facteur d'échelle de 1.8, le profil des rejets thermiques ne suffit plus à recharger convenablement le terrain.

Le profil de puissance des rejets thermiques permet de recharger le terrain si le facteur d'échelle reste inférieur à 1.8. Avec un facteur d'échelle de 3, il faudrait pouvoir injecter d'avantage d'énergie. Une possibilité serait de pouvoir augmenter le niveau de température des rejets thermiques durant les 3 mois estivaux. Le graphique de la figure 3-8c permet de montrer qu'il reste bien assez d'énergie à disposition.

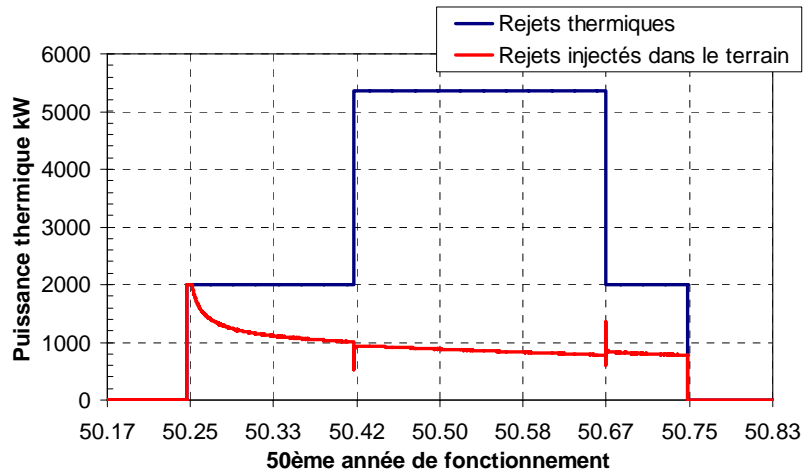


Figure 3-8a : Variante « eau et antigel », espacement de 8m, facteur d'échelle de 1 – le nombre de sondes est de 180. Il permet de satisfaire les besoins thermiques du nouveau site des Vernets.

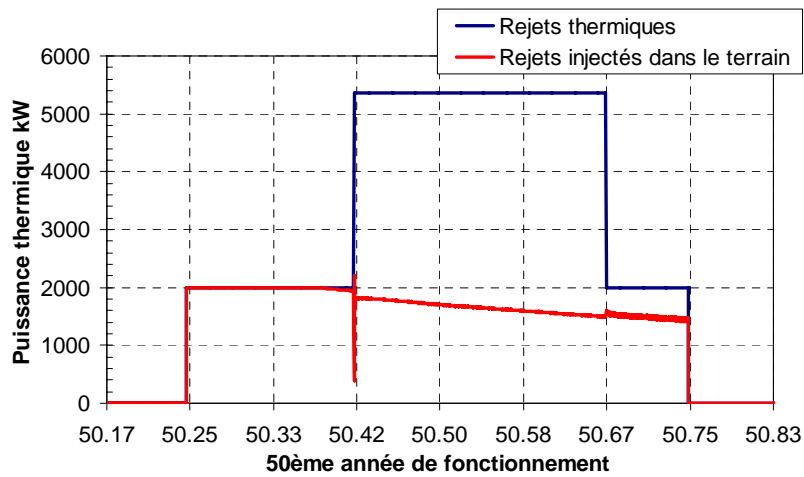


Figure 3-8b : Variante « eau et antigel », espacement de 8m, facteur d'échelle de 1.8 – le nombre de sondes est de 324. Il permet de satisfaire les besoins thermiques correspondant à 1.8 fois ceux du nouveau site des Vernets.

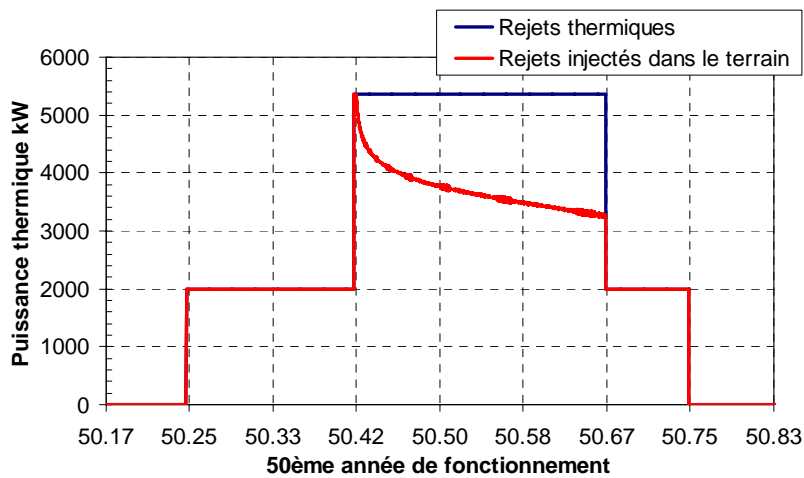


Figure 3-8c : Variante « eau et antigel », espacement de 8m, facteur d'échelle de 3 – le nombre de sondes est de 540 mais la recharge thermique du terrain ne permet pas de satisfaire les besoins thermiques correspondant à 3 fois ceux du nouveau site des Vernets.

Avec un facteur d'échelle de 1.8, la recharge thermique est complètement satisfaite sans utiliser les rejets thermiques de Rolex (cf. graphique de la figure 3-8b). Cela signifie que la bande des rejets thermiques de 2000 kW permet de recharger un stockage dimensionné pour satisfaire les besoins thermiques de 1.8 fois ceux du nouveau site des Vernets.

En revanche, un champ de sondes géothermiques dimensionné pour satisfaire les besoins thermiques du nouveau site des Vernets requiert une recharge thermique qui peut être garantie par une bande de rejets thermiques de 1'100 – 1'200 kW d'avril à septembre.

### 3.5. Potentiel géothermique du nouveau site des Vernets

La surface disponible pour le placement des sondes correspond à 28'000 m<sup>2</sup>. (en supposant, dans cette estimation, que les sondes ne sont pas placées sous les bâtiments). Avec un espacement de 10m, 280 sondes peuvent être placées.

La variante « eau et antigel » requiert 170 sondes espacées par 10m. Les augmenter d'un facteur 1.8 porte leur nombre à 306. Il faudrait réduire leur espacement à 9.5 m pour les mettre toutes, ce qui est tout à fait réaliste.

La variante « eau pure » requiert 225 sondes espacées par 10m. Les augmenter d'un facteur 1.8 porte leur nombre à 405. Il faudrait réduire leur espacement à environ 8 m, ce qui est encore compatible avec le dimensionnement établi pour cet espacement (qui est de 409 sondes).

### 3.6. Remarques – phase 1

- La recharge thermique du terrain ne doit pas être inférieure à 100%. Une recharge thermique plus faible fait augmenter le nombre de sondes géothermiques. Il faut faire attention à ce que le niveau de température des rejets thermiques ne soit pas trop bas, car ceci limite la puissance et finalement l'énergie qui peut être transférée dans le terrain.
- Une recharge thermique supérieure à 100% ne permet pas de réduire le nombre de sondes, car le premier hiver doit pouvoir être passé en partant du terrain à sa température initiale.
- Un espacement plus grand entre les sondes permet de réduire le nombre de sondes nécessaire. Cet effet diminue avec l'augmentation de l'espacement. Il est très faible avec un espacement supérieur à 8 m.
- La température des rejets thermiques doit légèrement augmenter avec l'espacement, ceci pour maintenir un taux de recharge de 100% du terrain. Le niveau de température des rejets (TaR) ne devrait pas être inférieure à 23 – 24°C pour un espacement de 10 m.
- Avec un espacement de 8 m, le chauffage du site des Vernets nécessite :
  - 172 sondes de 300m (51'600m) pour la variante « eau et antigel » (Tmin 0°C) ;
  - 227 sondes de 300m (68'100m) pour la variante « eau pure » (Tmin +4°C).
- Avec un espacement de 10 m, le chauffage du site des Vernets nécessite :
  - 170 sondes de 300m (51'000m) pour la variante « eau et antigel » (Tmin 0°C) ;
  - 225 sondes de 300m (67'500m) pour la variante « eau pure » (Tmin +4°C).

- L'ajout d'antigel dans le fluide qui circule dans les sondes permet de descendre plus bas en température, ce qui explique pourquoi le nombre des sondes peut sensiblement être réduit. Toutefois les inconvénients liés à l'utilisation d'antigel ne doivent pas être minimisés (volume d'antigel, viscosité plus grande et donc énergie de pompage majeure, risque de pollution, etc.).
- Une puissance thermique de 2'000 kW pour les rejets de chaleur, disponible d'avril à septembre pour les sondes géothermiques, suffit largement à réaliser la recharge thermique du terrain. Elle pourrait être réduite à 1'100 – 1'200 kW sans conséquence négative sur le fonctionnement du système.
- Une puissance thermique de 2'000 kW pour les rejets de chaleur, disponible d'avril à septembre pour les sondes géothermiques, permet de recharger un champ de sondes géothermiques 1.8 fois plus grand pour couvrir des besoins de chaleur 1.8 fois plus important que ceux évalués pour le nouveau site des Vernets.
- La place à disposition pour les sondes géothermiques, hors emprise des bâtiments, suffit à satisfaire une demande d'énergie thermique égale à 1.8 fois les besoins en chaleur du nouveau site des Vernets. La surface est pratiquement toute occupée avec la variante « eau pure » (409 sondes espacées de 8 m). Avec un espacement de 8 m, la variante « eau et antigel » requiert 310 sondes, ce qui occupe 70% des 28'000 m<sup>2</sup> à disposition.
- Les rejets thermiques, définis en cumulant la bande de 2'000 kW pendant 6 mois et ceux de Rolex, totalisent 16'190 MWh/an. Ils peuvent en théorie recharger un champ de sondes dimensionné pour extraire la même quantité d'énergie, et ainsi satisfaire une demande de chaleur de 21'600 MWh/an. Elle correspondrait à 3.8 fois les besoins de chauffage et d'eau chaude hivernaux du nouveau site des Vernets. Toutefois, le nombre de sondes devrait être supérieur au facteur de proportionnalité de 3.8, et la température des rejets devra être plus élevée que celle qui a été simulée ci-dessus, afin d'injecter dans le terrain la totalité des rejets.

#### **4. Résultats des simulations – phase 2**

L'analyse de la phase 1 a permis de mettre en évidence les aspects suivants :

- Une recharge thermique du terrain de 100% est recherchée. Elle permet de minimiser la longueur totale des sondes nécessaires.
- Une bande de rejets thermiques de 2'000 kW, disponible 6 mois par année, est plus que suffisante pour recharger le terrain. Dans ces conditions, les rejets thermiques de Rolex sont superflus.
- Le profil des rejets thermiques a une influence sur la température nécessaire pour garantir la recharge thermique du terrain.
- Si la quantité d'énergie contenue dans les rejets thermiques est bien suffisante pour effectuer une recharge thermique du terrain, leur température peut être un facteur limitant. Une température trop basse limite la puissance de transfert dans les sondes et, par voie de conséquence, la quantité d'énergie qui sera effectivement réinjectée dans le terrain. Elle pourrait ne pas suffire.

Dans la deuxième phase du projet, deux profils types des rejets thermiques sont considérés :

- Profil des rejets en bande disponibles 6 mois par année (cf. figure 2-2).
- Profil des rejets Rolex disponibles 3 mois par année (cf. figure 2-3).

La totalité des besoins de chaleur sont pris en compte, ce qui inclus la valorisation directe des rejets thermiques estivaux pour la production de l'eau chaude sanitaire.

Trois cas de figure sont évalués :

- *Chauffage du site de la caserne des Vernets en valorisant des rejets en bande.* Cette variante permet de déterminer quelle est la puissance minimum des rejets thermiques qui doit être disponible pour satisfaire aussi bien les besoins estivaux en eau chaude sanitaire que la recharge thermique du stockage. La température minimum des rejets est évaluée comme condition minimum. Un bilan énergétique du système est établi et les clefs de dimensionnement du champ de sondes géothermiques sont évaluées.
- *Chauffage du site de la caserne des Vernets en valorisant les rejets Rolex.* Comme la variante précédente mais avec les rejets thermiques de Rolex.
- *Potentiel de chauffage du site de la caserne des Vernets avec des rejets en bande.* On part de l'hypothèse que l'on utilise la totalité de la surface de la parcelle (46'000 m<sup>2</sup>) pour l'implémentation des sondes géothermiques. Il s'agit de déterminer combien de fois il est possible de chauffer le nouveau quartier des Vernets et quelle est la puissance minimum des rejets thermiques qui doit être à disposition pendant 6 mois. Cette analyse est reprise dans la phase 3.

Les trois cas de figure sont étudiés en utilisant la variante « eau pure » et un espacement entre les sondes géothermiques de 8 m.

#### **4.1. Chauffage du site de la caserne des Vernets en valorisant des rejets en bande**

Cette situation correspond à la valorisation de rejets thermiques pendant la période estivale, définie de début avril à fin septembre. Les rejets thermiques sont soit directement valorisés pour la production d'eau chaude sanitaire du quartier des Vernets (par le biais d'une pompe à chaleur), soit indirectement valorisés en les injectant dans le champ de sondes géothermiques. Ils sont extraits l'hiver suivant par des pompes à chaleur pour satisfaire les besoins thermiques hivernaux du nouveau quartier des Vernets.

Cette solution signifie que les rejets thermiques, dans le cas où ils sont également disponibles en hiver, ne sont pas directement valorisés pour couvrir les besoins thermiques hivernaux du nouveau quartier des Vernets. Ceci pourrait correspondre à la situation où les rejets thermiques du voisinage sont distribués dans un réseau d'énergie qui serait connecté au nouveau quartier des Vernets uniquement pour valoriser les rejets de chaleur estivaux. A noter que le niveau de température du réseau d'énergie, comme montré dans la phase 1 de l'étude, doit être suffisamment élevé en été pour garantir la recharge thermique du terrain. Il n'est pas compatible avec un niveau de température qui permettrait, par exemple, de rafraîchir des locaux.

Le bilan énergétique du système est montré dans la figure 4-1. Il suffit d'avoir à disposition 60% de la bande des 2'000 kW, soit 1'200 kW pendant 6 mois, pour réaliser la recharge thermique du terrain.

Le niveau de température des rejets, défini par la température aller des rejets (TaR), doit être au moins de 23°C. La température de retour de ces derniers, quant à elle (TrR), est de 27°C. Il est important de noter que des températures aussi basses ne sont possibles que si l'on peut recharger le terrain avec une puissance continue pendant 6 mois.

Le nombre des sondes géothermiques se monte à 227. Espacées par 8m, elles occupent une surface au sol de 14'500 m<sup>2</sup>. Le volume de stockage ainsi formé dans le terrain est de 4.4 millions de mètres cubes. Les sondes sont couplées à des pompes à chaleur totalisant 3'000 kW de puissance thermique de chauffage.

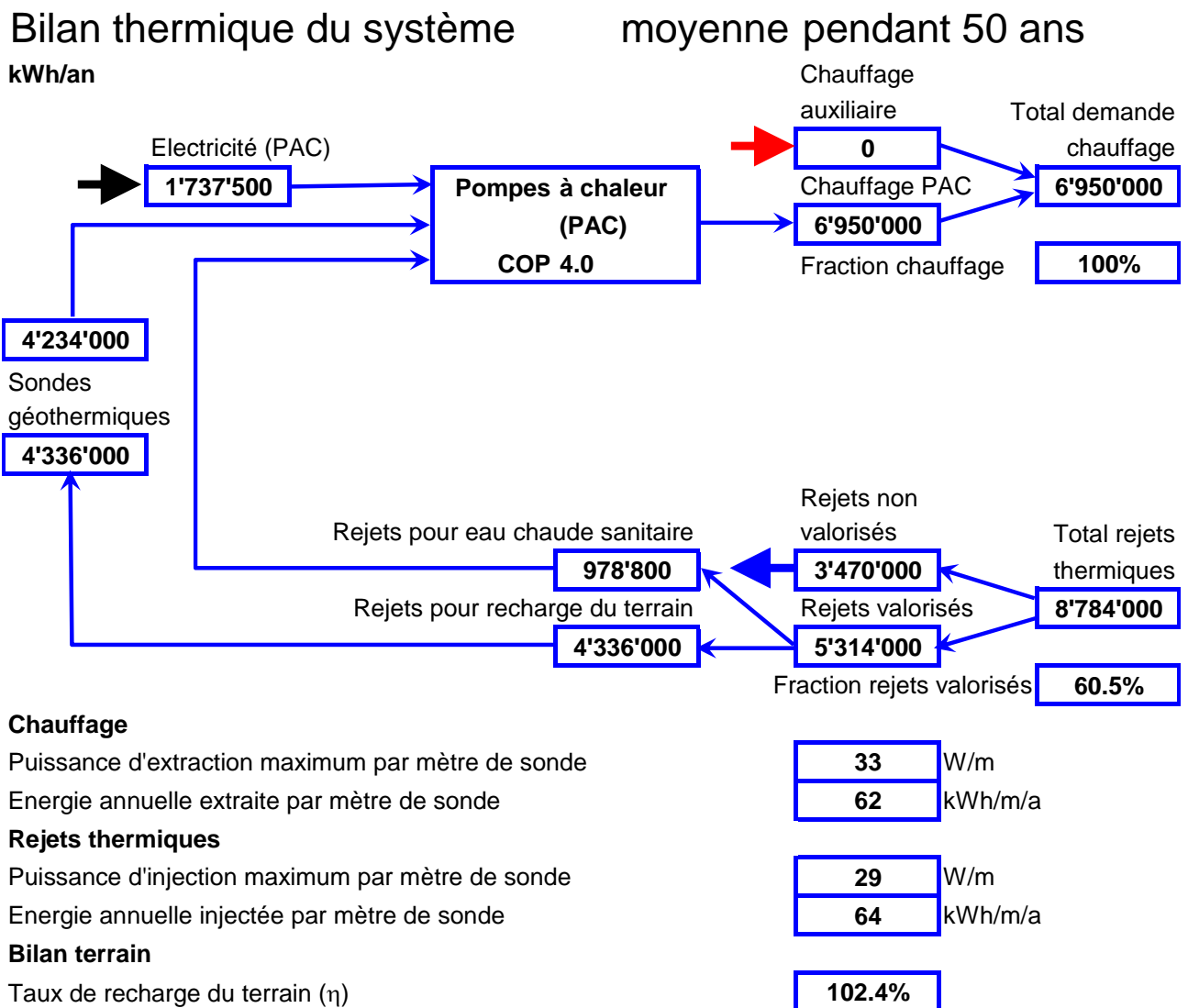


Figure 4-1 Bilan énergétique du système calculé avec PILESIM2 (quartier des Vernets, variante « eau pure », rejets en bande). Le champ de sondes géothermiques est formé par 227 sondes de 300m de profondeur et espacées par 8 m entre elles.

Une simulation complémentaire a permis de confirmer qu'une bande de rejets thermiques de 1'200 kW, disponible en continu sur 6 mois, suffit à recharger le stockage souterrain. Rapportée par mètre de sonde géothermique, la puissance des rejets correspond à 18 W/m.

#### **4.2. Chauffage du site de la caserne des Vernets en valorisant les rejets Rolex**

Cette situation correspond à la valorisation des rejets thermiques de Rolex, présents de début juin à fin août. Comme pour les rejets en bande, soit ils sont directement valorisés pour la production d'eau chaude sanitaire du quartier des Vernets (par le biais d'une pompe à chaleur), soit indirectement valorisés en les injectant dans le champ de sondes géothermiques. Ils sont extraits l'hiver suivant par des pompes à chaleur pour satisfaire les besoins thermiques hivernaux du nouveau quartier des Vernets.

Cette solution n'implique pas nécessairement l'existence d'un réseau d'énergie. Toutefois les rejets thermiques de Rolex sont plus abondants que nécessaire et une partie de ceux-ci devront être évacués dans l'environnement.

Le bilan énergétique du système est montré dans la figure 4-2. Il suffit d'avoir à disposition 70% de la bande des 3'400 kW, soit 2'400 kW pendant 3 mois, pour réaliser la recharge thermique du terrain.

Le niveau de température des rejets, défini par la température aller des rejets ( $T_{aR}$ ), doit être d'au moins 28°C. La température de retour de ces derniers ( $T_{rR}$ ), quant à elle, est de 32°C. Il est important de noter que ces températures ne sont possibles que si l'on peut recharger le terrain avec une puissance continue pendant 3 mois.

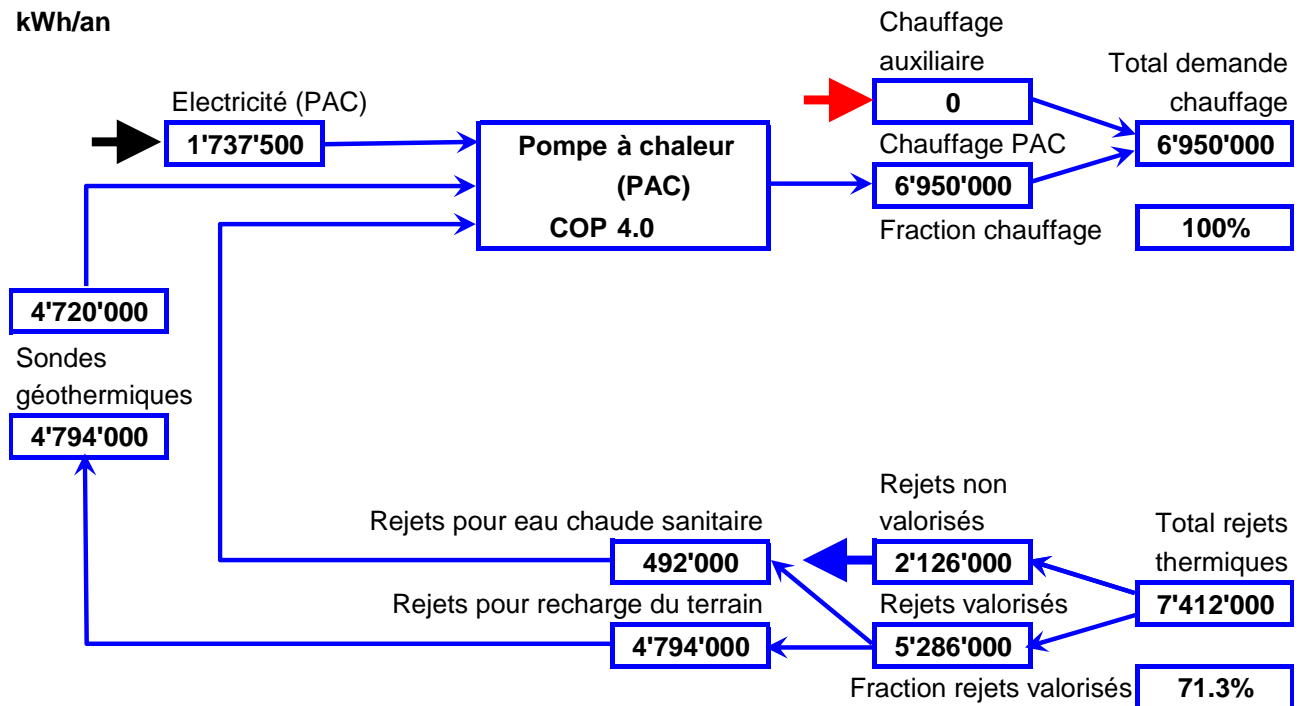
Comme précédemment, le nombre des sondes géothermiques se monte à 227. Espacées par 8m, elles occupent une surface au sol de 14'500 m<sup>2</sup>. Le volume de stockage ainsi formé dans le terrain est de 4.4 millions de mètres cubes. Les sondes sont couplées à des pompes à chaleur totalisant 3'000 kW de puissance thermique de chauffage.



## Bilan thermique du système

moyenne pendant 50 ans

kWh/an



### Chauffage

Puissance d'extraction maximum par mètre de sonde

33 W/m

Energie annuelle extraite par mètre de sonde

69 kWh/m/a

### Rejets thermiques

Puissance d'injection maximum par mètre de sonde

49 W/m

Energie annuelle injectée par mètre de sonde

70 kWh/m/a

### Bilan terrain

Taux de recharge du terrain ( $\eta$ )

101.6%

Figure 4-2 Bilan énergétique du système calculé avec PILESIM2 (quartier des Vernets, variante « eau pure », rejets de Rolex). Le champ de sondes géothermiques est formé par 227 sondes de 300m de profondeur et espacées par 8 m entre elles.

Une simulation complémentaire a confirmé qu'une bande de rejets thermiques de 2'400 kW, disponible en continu sur 3 mois, suffit à recharger le stockage souterrain. Rapportée par mètre de sonde géothermique, la puissance des rejets correspond à 35 W/m.

Si la totalité des rejets Rolex sont injectés dans le terrain, un taux de recharge d'environ 150% est réalisé. Il en résulte un réchauffement du terrain au cours des années qui nécessite une température des rejets toujours plus élevée. Après 50 ans de service, la température aller des rejets (TaR) atteindrait 48 °C. La température de retour de ces derniers (TrR), quant à elle, serait de 52°C. Ces valeurs sont très élevées, ce qui indique qu'il n'est pas recommandé de systématiquement recharger le stockage à plus de 100%. Il est donc nécessaire de pouvoir évacuer le surplus des rejets thermiques dans l'environnement également.

Un système 1.5 fois plus grand permettrait d'absorber la totalité des rejets thermiques de Rolex. Cela signifie 340 sondes géothermiques, des pompes à chaleur totalisant 4'500 kW et des besoins

thermiques correspondants à 1.5 fois ceux du nouveau site de la caserne des Vernets (env. 10'000 MWh/an).

Les rejets thermiques de Rolex ont été définis de façon très grossière, sur la base des informations disponibles. Si cette variante de projet devait être approfondie, des mesures et une analyse des rejets thermiques de Rolex devraient être entreprises de façon à bien cerner leur abondance et leur disponibilité dans le temps, ainsi que le niveau de température auquel ils peuvent être utilisés.

#### **4.3. Potentiel de chauffage du site de la caserne des Vernets avec des rejets en bande**

Cette variante est évaluée pour estimer le potentiel de chauffage du site de la caserne des Vernets, dans le cas où la totalité de la surface de la parcelle est utilisée pour l'implémentation des sondes. Le champ de sondes doit être rechargé thermiquement par des rejets thermiques. On suppose qu'ils sont disponibles pendant la période estivale, définie de début avril à fin septembre, et avec la puissance nécessaire pour garantir une recharge complète du terrain.

Cette variante, analogue à la première, est basée sur les hypothèses suivantes :

- Existence d'un réseau d'anergie couplé au champ de sondes géothermiques, uniquement pour la valorisation estivale des rejets thermiques.
- Définition d'une zone de consommateurs qui puisse utiliser toute l'énergie stockée dans le champ de sondes et valorisée par des pompes à chaleur (de façon centralisée ou décentralisée).
- Définition de deux zones distinctes, de façon à ne pas mélanger les consommateurs alimentés par le réseau d'anergie et les consommateurs alimentés par le réseau de distribution de l'énergie stockée dans le champ de sondes. En effet, les consommateurs alimentés par le champ de sondes ne valorisent pas directement les rejets thermiques en hiver.

Espacées par 8m, le nombre des sondes géothermiques se monte au maximum à 718. Elles occupent la surface totale de la parcelle, soit 46'000 m<sup>2</sup>. Le volume de stockage ainsi formé dans le terrain est de 13.8 millions de mètres cubes.

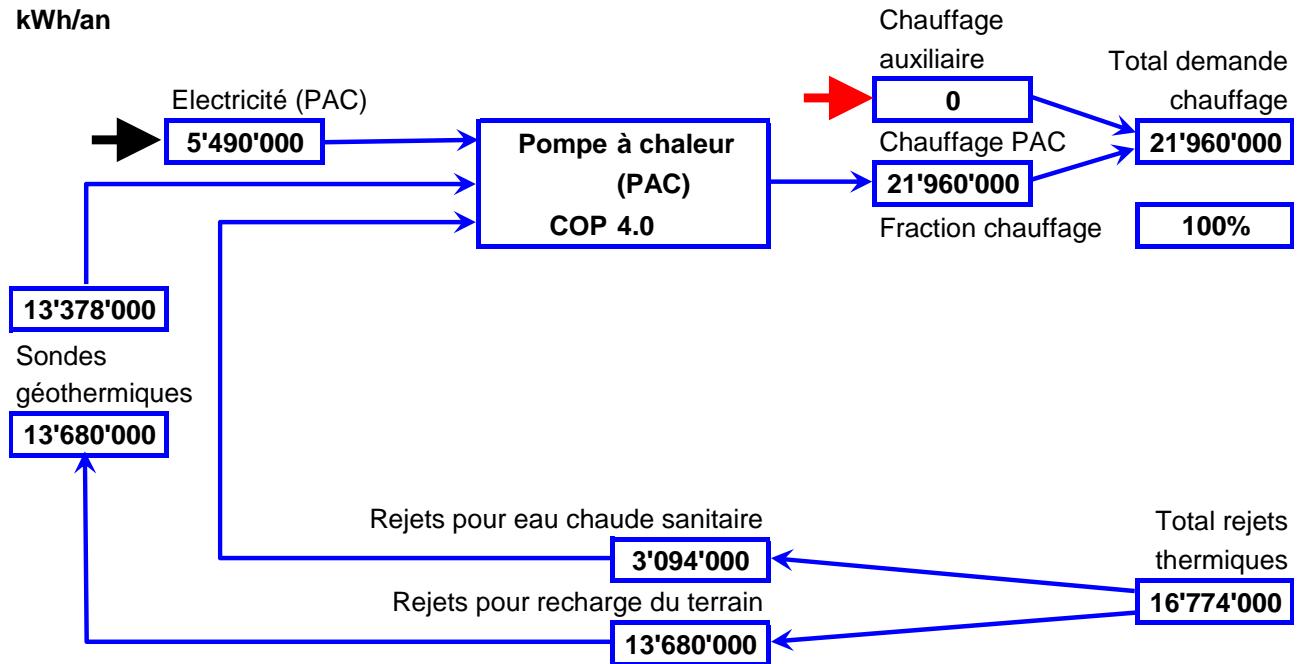
Le bilan énergétique du système géothermique est montré dans la figure 4-3. Il permet de valoriser une bande de rejets thermiques de 3'800 kW en été, de début avril à fin septembre. Comme pour la première variante, le niveau de température des rejets, défini par la température aller des rejets (TaR), doit être d'au moins 23°C. La température de retour de ces derniers, quant à elle (TrR), est de 27°C.

Les sondes sont couplées à des pompes à chaleur totalisant 9'500 kW de puissance thermique de chauffage.

## Bilan thermique du système

moyenne pendant 50 ans

kWh/an



### Chauffage

Puissance d'extraction maximum par mètre de sonde

33 W/m

Energie annuelle extraite par mètre de sonde

62 kWh/m/a

### Rejets thermiques

Puissance d'injection maximum par mètre de sonde

18 W/m

Energie annuelle injectée par mètre de sonde

64 kWh/m/a

### Bilan terrain

Taux de recharge du terrain ( $\eta$ )

102.3%

Figure 4-3 Bilan énergétique du système calculé avec PILESIM2 (quartier des Vernets, variante « eau pure », rejets en bande), en exploitant au maximum la surface de la parcelle pour l'implantation du champ de sondes. Il est formé par 718 sondes de 300m de profondeur et espacées par 8 m entre elles. La puissance thermique des PAC totalise 9'500 kW et les rejets thermiques ont une puissance de 3'800 kW pendant 6 mois.

Cette solution se base sur deux réseaux de distribution différents : un réseau d'anergie pour les rejets thermiques et un réseau de distribution pour l'énergie stockée dans le terrain. Une solution plus rationnelle est étudiée en ne considérant qu'un seul réseau de distribution, aussi bien pour les rejets thermiques que l'énergie stockée dans le terrain. C'est l'objet de la phase 3 de l'étude.

## 5. Résultats des simulations – phase 3

Cette phase du projet fait suite à l'analyse du potentiel de chauffage du site de la caserne des Vernets avec des rejets en bande. Dans cette analyse il était question de deux réseaux distincts : un réseau d'énergie pour la recharge du stock en été et un réseau de distribution de l'énergie stockée dans le terrain en hiver.

L'idéal serait de pouvoir fusionner le réseau d'énergie avec le réseau des sondes géothermiques. Ceci implique que :

- Le fluide caloporteur soit le même dans les deux réseaux.
- Les niveaux de température du fluide circulant dans les deux réseaux soient compatibles et donc égaux.

En conséquence, le réseau d'énergie devrait être conçu pour fonctionner avec les mêmes variations saisonnières de température que dans le circuit des sondes géothermiques. En d'autres termes, le réseau du circuit des sondes géothermiques est le cœur même du réseau d'énergie. Il doit être capable d'absorber des rejets thermiques et de servir de source froide aux PAC des consommateurs de chaleur.

Dans cette phase du projet, les profils types de demande de chaleur et de rejets thermiques en bande sont considérés sur toute l'année (cf. figure 2-4). Les rejets thermiques, constant sur toute l'année, sont donc valorisés aussi bien directement pour satisfaire des besoins de chaleur que indirectement en étant stockés dans le terrain.

Le nombre de sondes géothermiques est fixé, et des facteurs d'échelle sont appliqués sur la demande de chaleur et la bande des rejets thermiques de façon à satisfaire les deux critères suivants :

- La température minimum tolérée pour le fluide circulant dans les sondes ( $T_{min}$ ) doit être respectée avec le moins de sondes possibles.
- Pas de dérive de température n'est observée au cours des années, ce qui implique un taux de recharge du terrain ( $\eta$ ) proche de 100%.

Deux cas de figure sont évalués :

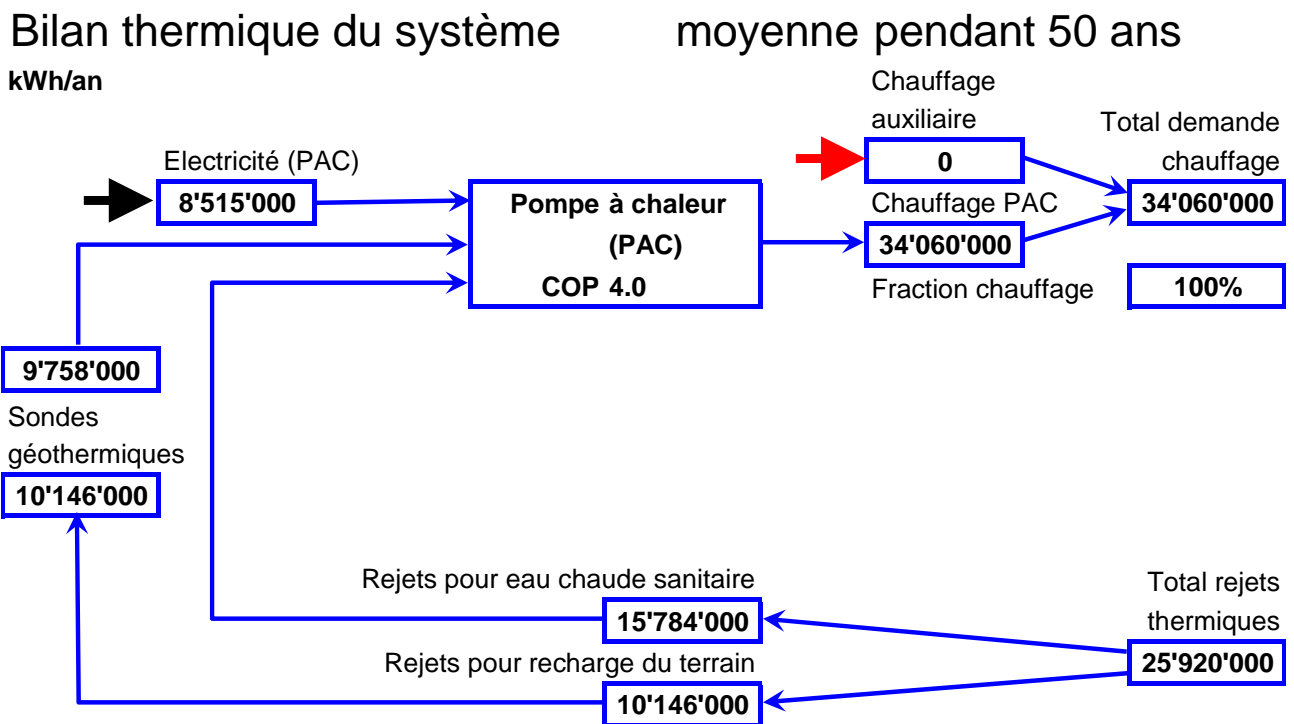
- *Potentiel avec 718 sondes géothermiques.* La totalité de la surface de la parcelle est utilisée pour le placement des sondes, incluant les surfaces sous les bâtiments (46'000 m<sup>2</sup>). Un espacement de 8 mètres entre les sondes est fixé.
- *Potentiel avec 437 sondes géothermiques.* Les sondes géothermiques sont placées entre les bâtiments. La surface à disposition est de 28'000 m<sup>2</sup>, ce qui limite le nombre de sondes géothermiques à 437 (toujours avec un espacement de 8 mètres entre les sondes).

Les deux cas de figure sont étudiés en utilisant la variante « eau pure », ce qui signifie une température (Tmin) de +4°C.

### 5.1. Potentiel avec 718 sondes géothermiques

Le bilan énergétique du système géothermique est montré dans la figure 5-1. Il valorise une bande de rejets thermiques constante toute l'année de 2'960 kW. Les pompes à chaleur totalisent une puissance thermique de 14'740 kW. Elles extraient jusqu'à 11'060 kW du réseau d'énergie, qui se répartissent à raison de 2'960 kW des rejets thermiques et de 8'100 kW des sondes géothermiques.

La demande d'énergie de chaleur correspond à 4.9 fois celle du nouveau site des Vernets. Les rejets thermiques, quant à eux, correspondent à pratiquement 1.5 fois la bande de 2'000 kW de rejets thermiques admise dans l'étude.



#### Chauffage

Puissance d'extraction maximum par mètre de sonde

38 W/m

Energie annuelle extraite par mètre de sonde

45 kWh/m/a

#### Rejets thermiques

Puissance d'injection maximum par mètre de sonde

14 W/m

Energie annuelle injectée par mètre de sonde

47 kWh/m/a

#### Bilan terrain

Taux de recharge du terrain ( $\eta$ )

104.0%

Figure 5-1 Potentiel de chauffage en exploitant au maximum la surface de la parcelle pour l'implantation du champ de sondes. Formé par 718 sondes de 300m de profondeur et espacées par 8 m entre elles, il permet de valoriser une bande de rejets thermiques d'environ 3'000 kW et de fournir une puissance de chauffage de près de 15'000 kW.

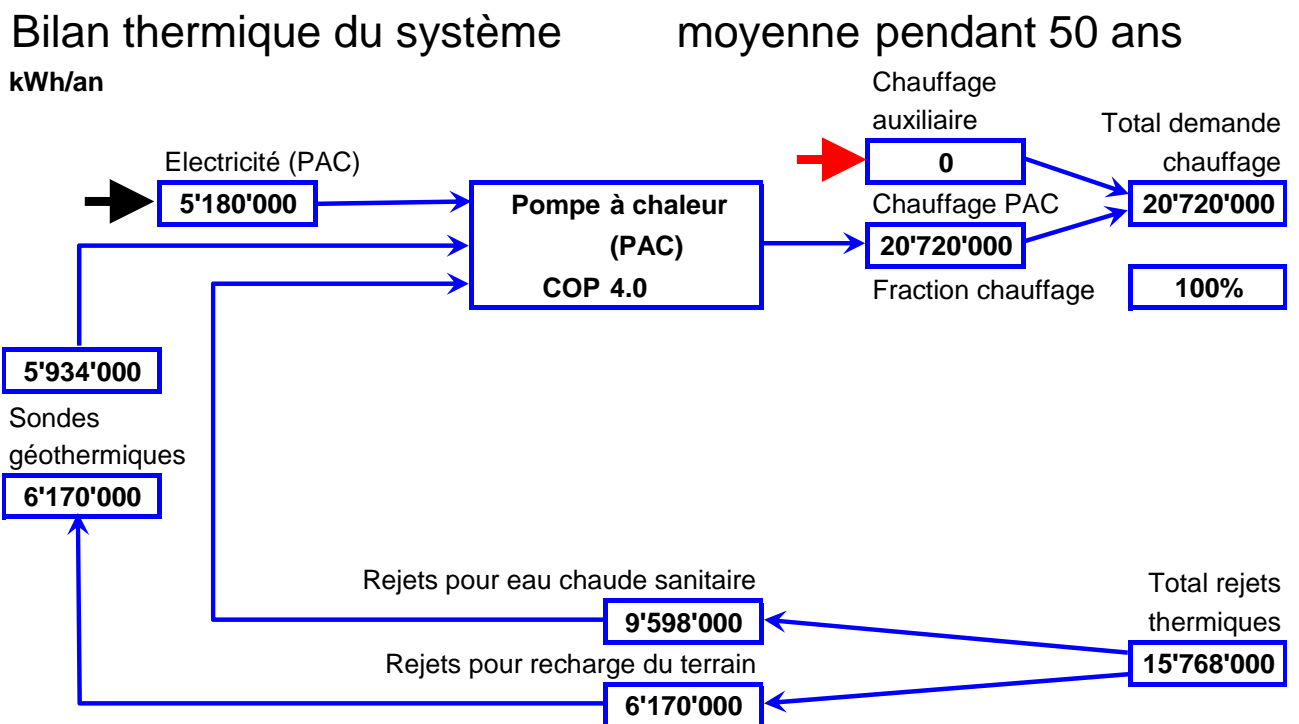
Les variations saisonnières de l'eau circulant dans les sondes sont :

- minimum : +4°C (entrée sondes) et +8°C (sortie sondes).
- maximum : +24°C (entrée sondes) et +20°C (sortie sondes).

## 5.2. Potentiel avec 437 sondes géothermiques

Le bilan énergétique du système géothermique est montré dans la figure 5-2. Il valorise une bande de rejets thermiques constante toute l'année de 1'800 kW. Les pompes à chaleur totalisent une puissance thermique de 8'960 kW. Elles extraient jusqu'à 6'720 kW du réseau d'anergie, qui se répartissent à raison de 1'800 kW des rejets thermiques et de 4'920 kW des sondes géothermiques.

La demande d'énergie de chaleur correspond à 3 fois celle du nouveau site des Vernets. Les rejets thermiques, quant à eux, correspondent à 90% de la bande de 2'000 kW rejets thermiques admise.



### Chauffage

Puissance d'extraction maximum par mètre de sonde

38 W/m

Energie annuelle extraite par mètre de sonde

45 kWh/m/a

### Rejets thermiques

Puissance d'injection maximum par mètre de sonde

14 W/m

Energie annuelle injectée par mètre de sonde

47 kWh/m/a

### Bilan terrain

Taux de recharge du terrain ( $\eta$ )

104.0%

Figure 5-2 Potentiel de chauffage en utilisant la surface de la parcelle sans l'emprise des bâtiments pour l'implantation des sondes. Formé par 437 sondes de 300m de profondeur et espacées par 8 m entre elles, il permet de valoriser une bande de rejets thermiques de 1'800 kW et de fournir une puissance de chauffage de près de 9'000 kW.

Comme précédemment, les variations saisonnières de l'eau circulant dans les sondes sont :

- minimum : +4°C (entrée sondes) et +8°C (sortie sondes).
- maximum : +24°C (entrée sondes) et +20°C (sortie sondes).

Les deux solutions permettent de valoriser une bande de rejets thermiques constante durant toute l'année. Elles montrent que 60% de l'énergie annuelle des rejets thermiques est valorisée directement et 40% indirectement, par l'intermédiaire du champ de sondes géothermiques.

Si l'on réduit la valorisation des rejets thermiques au seul site de la caserne des Vernets, il suffirait de réduire par 3 la puissance des PAC, le nombre de sondes géothermiques et la puissance des rejets thermiques nécessaire au système géothermique. L'eau de l'Arve reste nécessaire pour évacuer les surplus des rejets thermiques.

## 6. Conclusion

L'étude d'une solution géothermique pour le nouveau site de la caserne des Vernets s'est déroulée en trois phases.

La première phase, centrée sur le potentiel de stockage d'un champ de sondes géothermiques a permis de mettre en évidence :

- Il est nécessaire de recharger à 100% le champ de sondes géothermiques.
- Les rejets thermiques à disposition sont largement suffisants pour effectuer une recharge thermique complète. Il faut cependant prêter attention à leur température qui ne doit pas être trop basse (températures supérieures à 23 - 24°C).
- L'espacement entre les sondes doit être de 8 mètres au moins.
- L'ajout d'antigel dans le fluide qui circule dans les sondes permet de descendre plus bas en température, et donc de réduire sensiblement la longueur nécessaire de sonde. Toutefois les inconvénients liés à l'utilisation d'antigel ne doivent pas être minimisés (volume d'antigel, viscosité plus grande et donc énergie de pompage majeure, risque de pollution, etc.).

La deuxième phase a été réalisée sur la constatation que les rejets thermiques de Rolex, s'ils sont ajoutés aux rejets thermiques de bande importants comme attendus, ne servent pas au système géothermique. C'est la raison pour laquelle le système a été étudié pour deux cas de figure :

- Rejets thermiques en bande, disponibles 6 mois en continu par année, de début avril à fin septembre.
- Rejets thermiques de Rolex, disponibles 3 mois en continu par année.

Dans cette analyse les rejets thermiques ne sont considérés qu'en été uniquement, de façon à mettre l'accent sur l'aspect saisonnier du champ de sondes géothermiques. Cette hypothèse est effectivement bien vérifiée avec les rejets thermiques de Rolex. Les principaux résultats sont :

- Avec de l'eau pure dans le circuit des sondes, le chauffage du nouveau site de la caserne des Vernets nécessite 227 sondes de 300 m et espacées par 8 m entre elles. L'installation géothermique permet de produire une puissance thermique de 3'000 kW et de satisfaire environ 7'000 MWh/an. La puissance d'extraction maximum par mètre de sonde est de 33 W/m.
- Une recharge thermique effectuée par des rejets thermiques en bande pendant 6 mois nécessite une puissance thermique de 1'200 kW. Elle permet de valoriser 5'200 MWh/an de rejets thermiques, soit 1'000 MWh/an directement pour l'eau chaude en été, et 4'200 MWh/an indirectement pour la recharge du champ de sondes. La température des rejets thermiques doit pouvoir atteindre 27°C au retour (TrR) et 23°C à l'aller (TaR).
- Une recharge thermique effectuée par les rejets thermiques de Rolex pendant 3 mois nécessite une puissance thermique de 2'400 kW. Elle permet de valoriser 5'200 MWh/an de rejets thermiques, soit 500 MWh/an directement pour l'eau chaude en été, et 4'700 MWh/an indirectement pour la recharge du champ de sondes. La température des rejets thermiques doit pouvoir atteindre 32°C au retour (TrR) et 27°C à l'aller (TaR).

La recharge thermique du champ de sondes géothermiques par des rejets en bande pose la problématique de la nécessité ou pas de pouvoir disposer d'un réseau d'anergie. En effet les rejets thermiques ne sont valorisés qu'en été, ce qui signifie qu'ils doivent être valorisés ailleurs en hiver. Ce n'est pas le cas avec les rejets thermiques de Rolex. Toutefois leur abondance requiert d'évacuer le surplus (environ 30% de leur quantité en énergie annuelle) dans l'environnement.

La question de connaître le potentiel de chauffage du site de la caserne des Vernets a posé la problématique de disposer d'un réseau d'anergie pour la recharge des sondes en été et d'un réseau de distribution de l'énergie stockée dans le terrain en hiver. Cette problématique a conduit à étudier une troisième phase, où le réseau d'anergie est en fait le réseau de distribution du circuit des sondes géothermiques.

Les principaux résultats sont :

- Il est possible de poser jusqu'à 718 sondes géothermiques dans la parcelle en respectant une distance de 8 m entre elles. Avec une profondeur de 300 m, la longueur totale des sondes dépasse 200'000 mètres.
- Une bande de rejets thermiques constante toute l'année de 3'000 kW est valorisée.
- Les pompes à chaleur totalisent une puissance thermique de près de 15'000 kW. Elles extraient jusqu'à 11'000 kW du réseau d'anergie, qui se répartissent à raison de 3'000 kW des rejets thermiques et de 8'000 kW des sondes géothermiques.
- Le système permet de chauffer environ 5 fois le site de la caserne des Vernets, soit directement (60%), par valorisation directe des rejets thermiques, soit indirectement (40%), par valorisation indirecte à travers le champ de sondes géothermiques.



Le dimensionnement du champ de sondes géothermiques dépend fortement du système dans lequel il sera intégré. La connaissance des besoins thermiques est un point essentiel, tout comme la recharge thermique, qui permet de garantir le fonctionnement du système à long terme.

Si l'option géothermique devait être approfondie, alors il est important de pouvoir faire des choix dans le concept de système et d'analyser plus en détail aussi bien les besoins thermiques à satisfaire que les rejets thermiques à disposition.

## 7. Glossaire

COP : coefficient de performance.

ECS : eau chaude sanitaire.

H : longueur d'une sonde géothermique [m]

Q : débit de fluide qui traverse une sonde géothermique [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

PAC : pompe à chaleur.

TaR : température « aller » vers les sources des rejets dans le circuit des rejets thermiques [ $^{\circ}\text{C}$ ]

TrR : température « retour » des sources des rejets dans le circuit des rejets thermiques [ $^{\circ}\text{C}$ ]

TRmin : température minimum nécessaire pour TaR [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Tmin : température minimum tolérée pour le fluide circulant dans le circuit des sondes géothermiques [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Ra : résistance thermique interne d'une sonde géothermique [ $\text{K}/(\text{W}/\text{m})$ ]

Rb : résistance thermique locale d'une sonde géothermique [ $\text{K}/(\text{W}/\text{m})$ ]

Rb\* : résistance thermique effective d'une sonde géothermique [ $\text{K}/(\text{W}/\text{m})$ ]. Elle permet de calculer le transfert de chaleur échangé par une sonde géothermique. Rb\* est calculé sur la base du débit qui traverse la sonde (Q), sa longueur (H) et les résistances thermiques locale (Rb) et interne (Ra).

$\eta$  : taux de recharge du terrain [-]