

Introduction :

Depuis plus de 20 ans, des améliorations notables sont apportées aux technologies du solaire thermique. Ces perfectionnements sont arrivés à un haut niveau de maturité.

Des produits de haute qualité sont disponibles. Les systèmes thermiques sont fiables, et leur productivité peut être garantie grâce aux:

- procédures de qualification et de certification des équipements.
- outils de calcul et dimensionnement (simulations et logiciels informatique)
- contrôles et aux suivis des opérations.

Les conditions d'un bon fonctionnement durable et efficace ont été progressivement créées, par l'intégration des différents systèmes de stockage de l'énergie thermique et les garanties ont été fiabilisées pour les applications individuelles et collectives.

Dans ce chapitre les principaux détails et informations concernant les systèmes de stockage thermique de l'énergie solaire par échangeurs horizontaux et verticaux ainsi que quelques travaux analytiques, numériques, et expérimentaux sur ce sujet seront présentés.

II.1. Echangeurs horizontaux : [5]

Les échangeurs sont constitués de tubes en polyéthylène enterrés horizontalement :

— sur une surface plane, le terrain est décapé, les tubes sont disposés parallèlement avec un écartement minimal de 0,4 m puis ils sont recouverts d'au moins 0,6 m de sable et de terre (figure II.1) ;

— en tranchée en configuration 2 tubes, 4 tubes ou 6 tubes par tranchées. La figure II.2 donne pour chaque configuration les profondeurs d'enfouissement et les distances entre tubes à respecter.

Le tableau II.1 donne les puissances maximales pouvant être extraites du sol par mètre de tranchée, par mètre de tube et par mètre carré de terrain avec une température d'eau glycolée de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les valeurs sont indicatives. Elles varient en fonction de la qualité du terrain. Les échanges seront moins importants dans un sol contenant des remblais rocheux que dans un sol composé de terres végétales humides.

L'échange dépend aussi des conditions de base en hiver : dans une zone froide les échanges seront plus faibles que dans une zone tempérée. Les capteurs horizontaux peuvent équiper trois types de pompe à chaleur : à détente directe, à fluides intermédiaires ou mixte.

Configuration	Puissance maximale		
	Par mètre de tranchée (W/m)	Par mètre de tube (W/m)	Par m ² de terrain (W/m ²)
décapage		15	37
2 tubes/ tranchée	30	15	30
4 tubes/tranchée	44	11	37
6 tubes/tranchée	48	8	40

Tableau II.1 : Puissances maximales en fonction de la configuration.

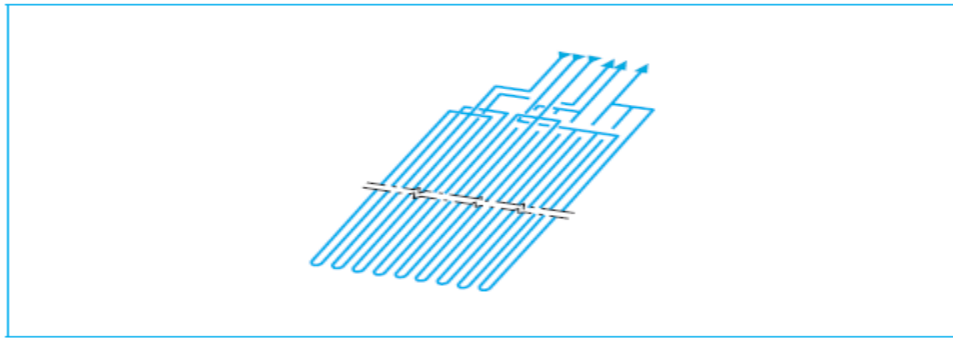


Figure II.1 : Capteurs horizontaux en configuration décapage.

II.1.1. Limites d'application : [5]

Pour pouvoir implanter des échangeurs horizontaux, il faut une grande surface de terrain libre, de l'ordre de 1 à 2 fois la surface à chauffer. Cette surface ne doit pas être recouverte de béton ou être à l'abri (pour la régénération par ensoleillement et infiltration d'eau). Elle ne doit pas être plantée d'arbres. Les petits arbustes peuvent se développer mais ils ne doivent pas avoir de racines profondes car le sol gelé autour des tubes freinerait leur expansion. Cela limite les cas possibles d'installation.

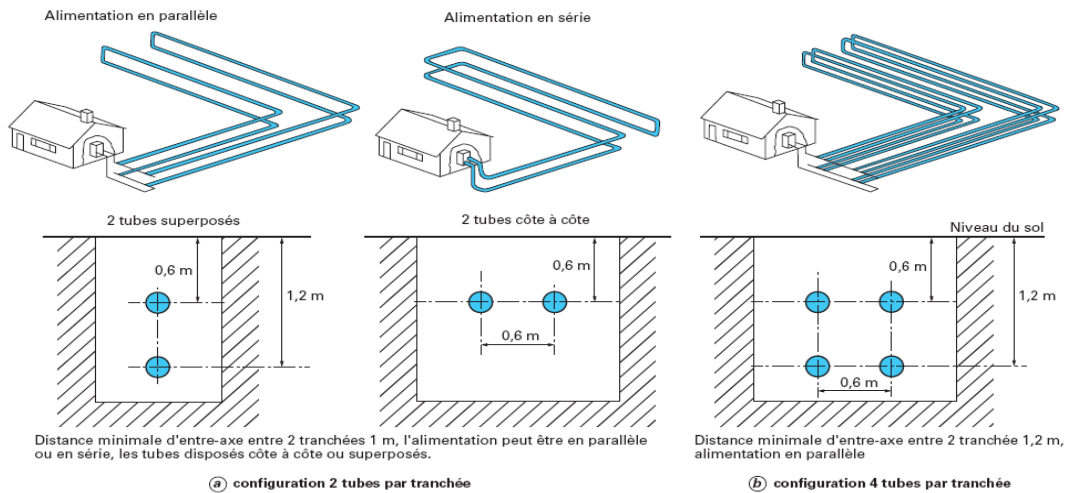


Figure II.2 : Echangeurs horizontaux en configuration tranchée.

II.2. Echangeurs verticaux : [6]

Un ou plusieurs forages sont effectués à une profondeur de 50 à 150 m. Deux à quatre tubes appelés aussi sondes sont disposés dans chaque forage. Ils sont reliés à la base :

- par deux, et sont appelés doubles U séparés (figure II.3.a) ;
- par quatre dans une chambre commune (figure II.3.b).

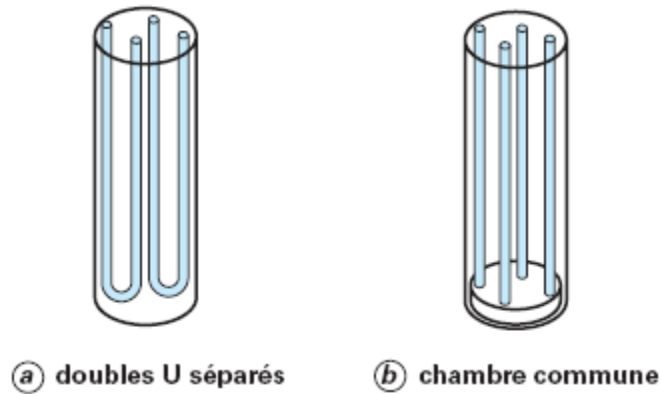


Figure II.3 : Deux types d'échangeurs verticaux.

L'espacement entre deux forages doit être d'au moins 10 m. Une distance supérieure pourra être nécessaire si le sol rencontré est de mauvaise qualité (sol sec et granuleux).

Dans le cas d'une installation de plus de quatre capteurs, il est indispensable de les implanter de façon à ce que qu'ils ne s'influencent pas mutuellement et que le sol puisse se régénérer correctement.

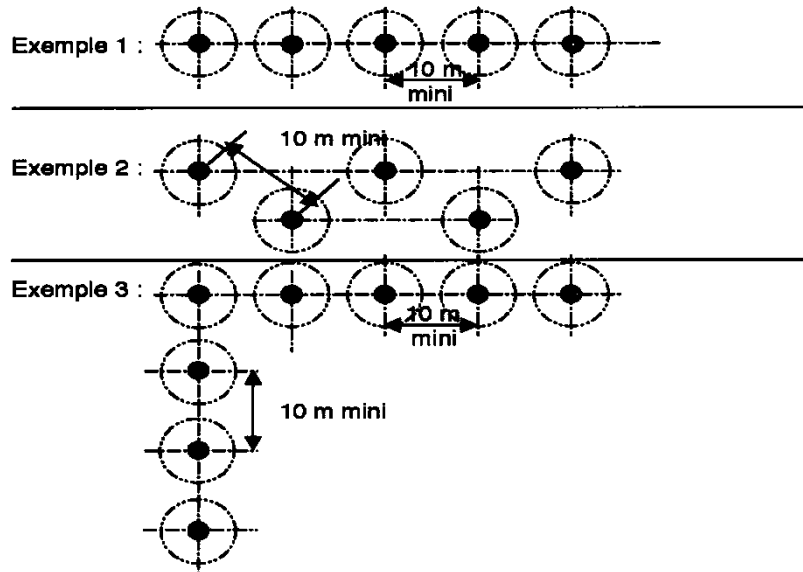


Figure II. 4 : Implantation préférables des échangeurs verticaux.

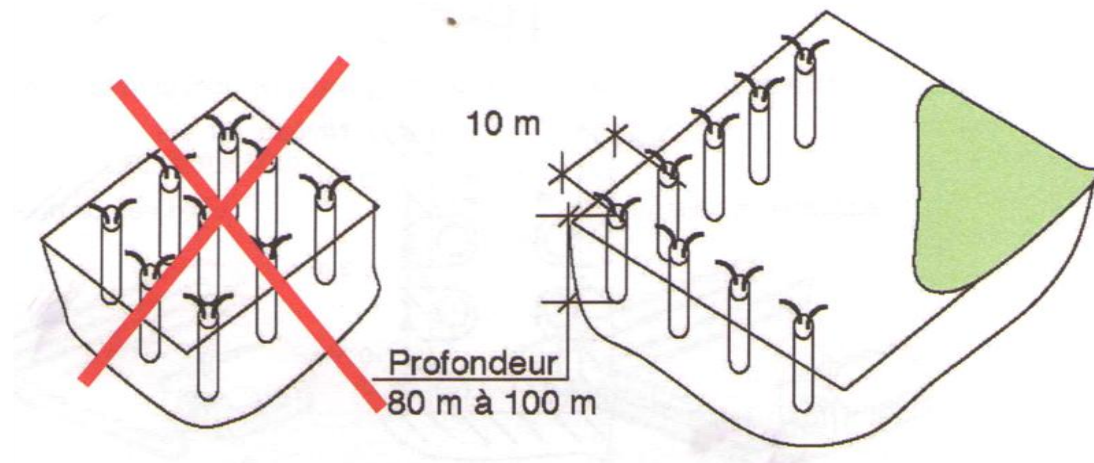


Figure II. 5 : Exemple de positionnement de capteurs verticaux à éviter.

Seules les PAC à fluides intermédiaires peuvent être équipées les échangeurs verticaux.

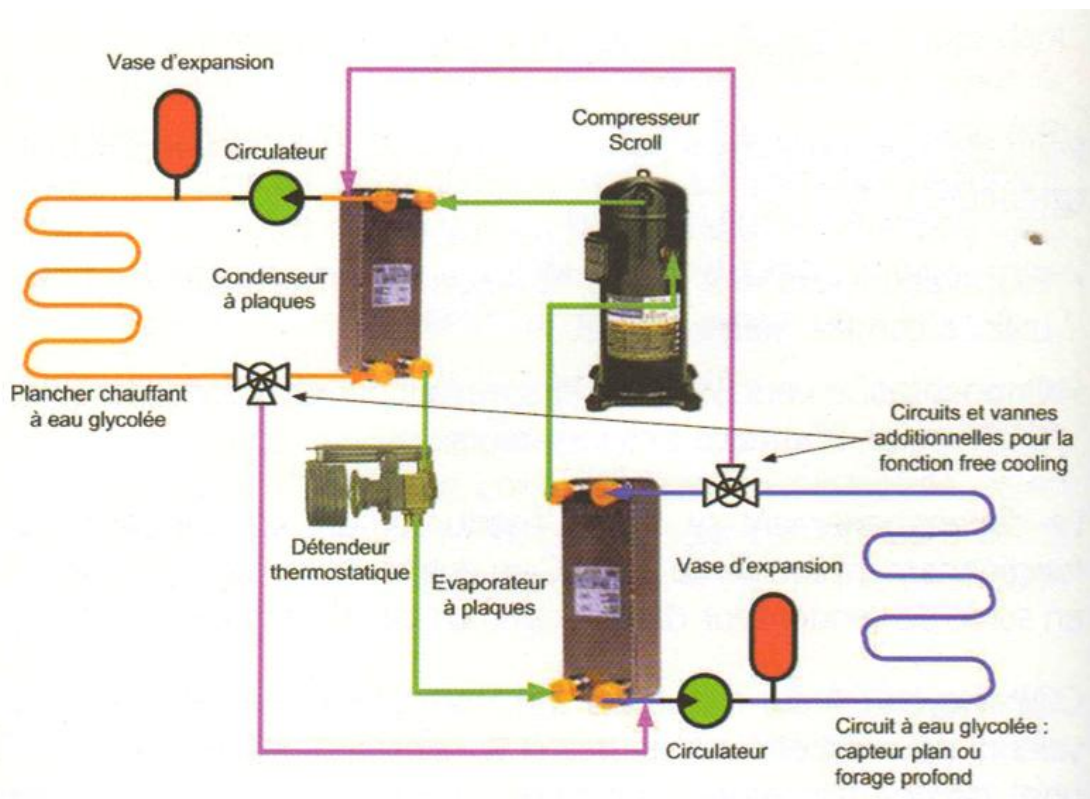


Figure II.6 : Synoptique d'une PAC eau/eau (PAC à fluide intermédiaire). [11]

La puissance prélevée est en moyenne de 50 W/m (35 à 80 W/m en fonction de la nature des terrains traversés)

L'installation des échangeurs verticaux relève d'une entreprise de forage qualifiée. Il convient également de respecter les procédures administratives concernant la protection du sous-sol et de la ressource en eau.

Le forage vertical demande peu d'espace et s'applique facilement en milieu urbain.

Pour les bâtiments de grande taille, plusieurs sondes géothermiques, espacées d'une petite dizaine de mètres pour une profondeur pouvant parfois atteindre plus de 150 m peuvent être réalisées sur un même site.

Dans ce volume parallélépipédique délimité et sans interférence avec le voisinage, l'exploitant peut minimiser sa dépense énergétique annuelle en maintenant un équilibre entre les quantités d'énergie puisées pour le chauffage et celles réintroduites en période estivale, par exemple pour le rafraîchissement.

Les puissances exploitées peuvent être importantes : de quelques dizaines de kilowatts à plusieurs mégawatts.

Les performances globales restent très bonnes pour couvrir 100% des besoins, quelle que soit la zone climatique.

L'option réversibilité par inversion du cycle est souvent proposée. Le plancher chauffant devient alors plancher rafraîchissant. Ou par le principe de free cooling qui est moins efficace, mais plus économique et plus fiable que l'inversion du cycle frigorifique : le compresseur est arrêté, seuls les circulateurs fonctionnent ce système permet de rafraîchir le bâtiment en prenant les calories du bâtiment au niveau du plancher chauffant/rafraîchissant est qui sont ensuite évacuées dans le terrain par une simple circulation des fluides dans la boucle sous-sol sans que la pompe à chaleur ne fonctionne. Ceci permet du même coup une recharge thermique du terrain, augmentant ainsi la performance de la pompe à chaleur pour l'hiver suivant.

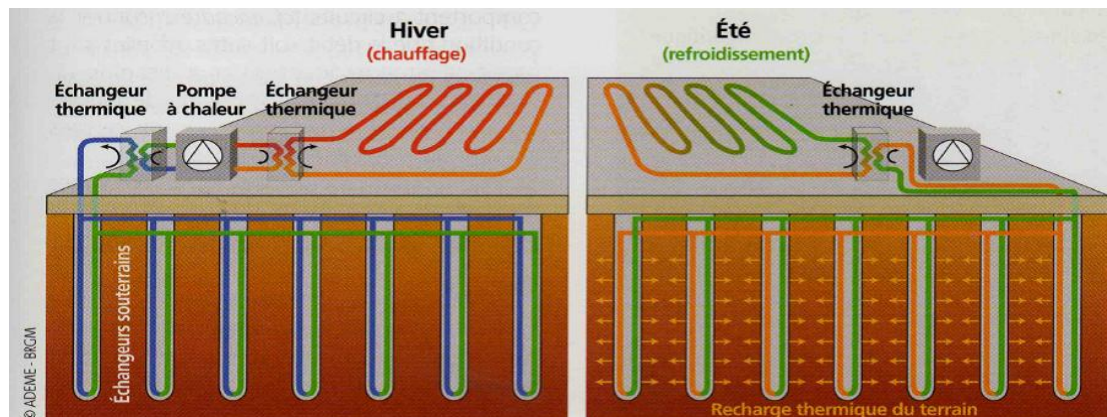


Figure II.7 : Recharge et décharge thermique du sous-sol.

La variation de vitesse du compresseur permet d'optimiser la qualité d'échange avec la terre. La régulation doit se faire sur la température d'eau chaude en fonction de la température extérieure.

Point de fonctionnement habituel indépendant de la température extérieure :

-Evaporation vers -5 à -8°C selon la nature du terrain en captage plan. -3 à +2°C en forage profond.

-Condensation vers 35 à 40°C en plancher chauffant, de 45 à 55°C selon la surface des radiateurs.

Le dimensionnement se calcule habituellement pour le point de fonctionnement avec l'eau glycolée à -5°C en sortie d'évaporateur et l'eau d'un plancher chauffant à 35°C en sortie de condenseur.

COP moyen : 3 sur radiateurs à 4.5 sur plancher chauffant.

Le tableau II.2 indique les distances minimales à respecter entre les forages et les autres éléments du site. [5]

Autres éléments du terrain	Distance minimale (m)
arbres	5
Réseaux enterrés non hydrauliques	1.5
Fondation, puits, fosses septiques, évacuations, etc.	3

Tableau II.2 : Distances minimales entre les forages et les autres éléments.

La température moyenne du sol est en général de 10°C à 14°C et le gradient géothermique (accroissement de la température en fonction de la profondeur) est en moyenne de 4°C tous les 100m. une énergie renouvelable est naturellement présente dans le sous-sol à quelques dizaines-voir des centaines- de mètres et dans les aquifères qui s'y trouvent mais à une température inférieure à 30°C, non exploitable naturellement. L'exploitation de cette énergie nécessite la mise en œuvre de pompes à chaleur pour prélever cette chaleur à basse température et pour l'augmenter à une température suffisante pour le chauffage d'habitations par exemple.

II.3. Comparaison des deux types de systèmes et autres considérations : **[12]**

Dans un système basé sur échangeurs géothermiques verticaux, on dispose d'un stock de grande capacité thermique dont la température initiale est de 10 °C environ. Les caractéristiques de ces systèmes sont donc :

- Relative symétrie pour le potentiel d'utilisation hivernale (chauffage) et estivale (rafraîchissement), avec un écart de 10 K environ entre fluide caloporteur et source de chaleur/fraîcheur (sol non perturbé);
- Insensibilité vis-à-vis de la face supérieure;
- Forte interaction avec les propriétés géologiques et hydrogéologiques du lieu;

- Risque d'épuisement ou de saturation du stockage à long terme;
- Fort lien avec la prestation hivernale.

Dans le second type de systèmes (échangeurs géothermiques horizontaux), le stockage se situe à l'intérieur de la zone de variation saisonnière de température ou même dans la zone d'influence du bâtiment lui-même si le système a été placé sous lui. On utilise l'inertie du terrain d'abord pour amortir les variations journalières, et, selon la profondeur, on peut bénéficier d'un relatif effet saisonnier. Ce qui amène les caractéristiques suivantes :

- Faible écart de température, en moyenne journalière, entre extérieur et sous-sol;
- Importance de la surface supérieure;
- Relative indépendance vis à vis des propriétés géologiques du lieu;
- Indépendance de l'utilisation hivernale (si le système est basé sur l'amortissement journalier);
- Pérennité thermique assurée par le rythme saisonnier du climat extérieur (ou du bâtiment qui se trouve en dessus du système).

Une autre différence essentielle peut être relevée : les systèmes à sondes géothermiques verticales sont basés sur un cycle de fluide fermé, alors que les systèmes horizontaux peu profond utilisent en général directement l'air de ventilation en cycle ouvert.

Par contre, on peut noter un certain nombre de points communs :

- Les deux types de systèmes ont fait l'objet d'études théoriques très poussées, comprenant aussi bien des approches mathématiques de type analytiques.
- Malgré le très grand intérêt porté par la profession, dans la pratique peu de tels systèmes ont jusqu'à présent été installés pour l'utilisation estivale;
- Très peu d'études, pour ne pas dire aucune, se sont penchées de façon systématique et approfondie sur le couplage au bâtiment.

II.4. Les pieux énergétiques : [13]

Un pieu énergétique ou pieu échangeur est un pieu de fondation dans lequel un tube ou un réseau de tubes a été installé, de manière à pouvoir faire circuler un fluide caloporteur pour échanger de la chaleur avec le terrain. Ces deux principales fonctions sont donc de reporter en profondeur les charges d'une construction et de servir d'échangeur de chaleur avec le terrain. La figure II.8 montre un schéma d'un bâtiment fondé sur pieux énergétiques.

- 1 -Pieux énergétiques.
- 2 -Tubes permettant l'échange de chaleur.
- 3 -Pompe à chaleur.

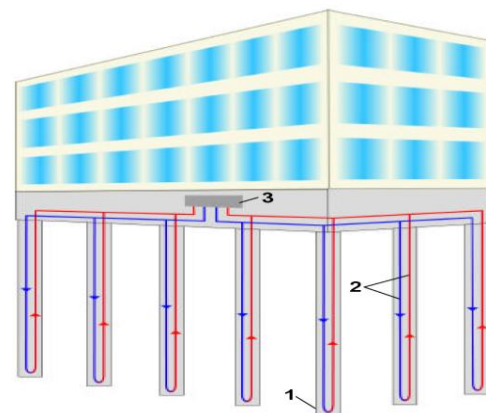


Figure II.8 : Schéma d'un bâtiment fondé sur pieux.

Un système de pieux échangeurs est ainsi constitué par les pieux que l'on équipe de tubes en polyéthylène permettant la circulation du fluide caloporteur. Ces tubes sont ensuite connectés entre eux et reliés à une pompe à chaleur pour le chauffage. Le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le sol est déterminé par la différence de température, la vitesse d'écoulement dans les tubes et les conductivités thermiques des parois des tubes et des matériaux constituant le pieu (béton, matériau de remplissage). Il est recommandé d'utiliser de l'eau comme fluide caloporteur du fait qu'elle ne constitue pas un danger de pollution de l'environnement, Si nécessaire, de l'anti-gel peut être ajouté à l'eau circulant dans les tubes.

Pour la production de froid, deux variantes existent en fonction du niveau de température souhaité. La première utilise une machine de froid à la place de la pompe à chaleur pour abaisser la température. La deuxième est ce que l'on appelle le refroidissement direct (free cooling) où la chaleur excédentaire du bâtiment est simplement injectée dans le terrain par le biais des pieux.

II.5. Conception et dimensionnement des échangeurs verticaux :

II.5.1. Conception : [14]

Les premières règles à prendre en compte sont :

- centrer l'ensemble des échangeurs verticaux sur une ligne perpendiculaire au local technique.
- s'arranger pour disposer les échangeurs verticaux d'un même rang sur le même collecteur.
- s'arranger pour avoir des sous circuits de même longueur et capacité de façon à avoir des pertes de charge constantes.
- vérifier que la pression statique en bout de capteur vertical est dans les limites d'utilisation du tube.

Pour mémoire : 1bar = 10.33m d'eau soit une pression statique à l'arrêt dans une tuyauterie à 100 m de profondeur est de presque 10 bar. Des tubes PN 16 (pression nominale de fonctionnement de 16 bars) sont à utiliser.

L'espacement minimal entre deux capteurs est d'au moins de 10 m (une distance supérieur peut être nécessaire si le sol rencontré est de mauvaise qualité tel qu'un sol sec ou granuleux).

En effet, l'extraction de chaleur par une sonde verticale entraîne la formation d'un cône d'appel thermique. La forme de ce cône et par conséquent son extension dépendront notamment de la conductivité thermique du terrain, de la quantité d'énergie extraite depuis une ou plusieurs années et de la façon dont le terrain se recharge.

II.5.2.Dimensionnement : [15]

Le dimensionnement est déterminé de façon rigoureuse. En effet tout sous-dimensionnement (longueur trop courte) entraîne un appauvrissement du sol irréversible et une dégradation des performances ainsi que des puissances soutirées au cours du temps.

Le dimensionnement du capteur s'effectue en mode chaud sur la base d'une puissance maximale extraite par mètre de forage vertical de 50W/m.

Il est préférable que ce dimensionnement ne conduise pas à prélever une énergie dans le sol supérieure à 100 Kwh/an par mètre de forage. Ce critère d'énergie prélevée est respecté lorsqu'on assure du chauffage uniquement avec une puissance de PAC égale à 100 % des déperditions. En cas de puissance inférieure à 100 % et en cas de production d'eau chaude sanitaire par la PAC, ce critère doit être vérifié.

Il est fortement déconseillé d'assurer le chauffage de la piscine avec les mêmes capteurs que ceux utilisés pour le chauffage de la maison.

Toute fois ce ratio, est utilisé sous la responsabilité du foreur qui peut éventuellement le réduire en fonction de la nature du terrain. A titre d'exemple, pour un terrain meuble et sec (cailloux ou gravier sec), la puissance soutirée est de 30 W/m avec une quantité d'énergie prélevée maximale de 65 Kwh/m.an.

Il convient de limiter, dans la mesure du possible, au maximum les coudes afin de réduire les pertes de charge hydrauliques. Une pente continue sera prévue entre la sonde et le collecteur afin de pouvoir opérer des purges.

II.5.3.Procédure de conception : [14]

L'installation des échangeurs verticaux enterrés (forages+insertion tubes verticaux+remplissage) est impérativement réalisée par un professionnel du forage formé à ces techniques de capteurs enterrés.

La technique du forage consiste à utiliser un outil (un tricône muni de molettes dentées) qui détruit la roche sous l'effet du poids et de la rotation. Le poids est assuré par un ensemble de tiges lourdes et creuses, assemblées en un train qui achemine sous pression un fluide appelé boue de forage.

Ces boues refroidissent l'outil et assurent déblaiement du trou. Autour des parois du forage, des tubes sont descendus et du ciment est injecté afin de garantir la tenue des parois du puits, ainsi qu'une protection contre la corrosion mais aussi la protection des nappes d'eau souterraines et leur isolation thermique.

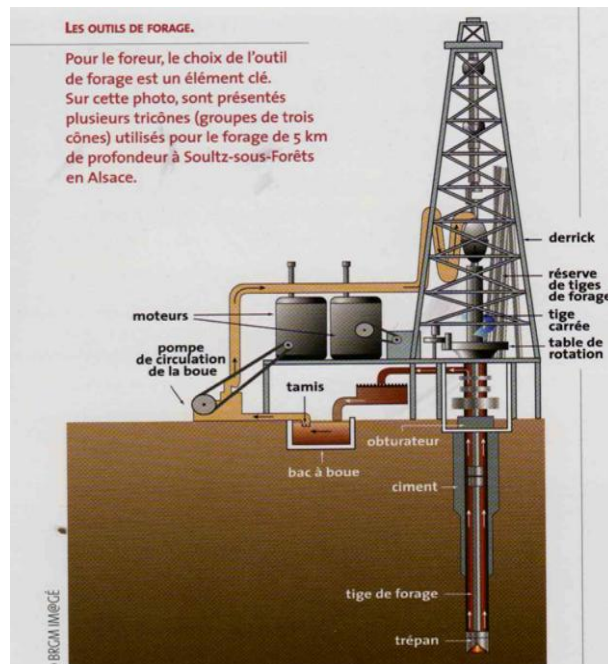


Figure II.9 : Outil de forage ROTARY

Le reste de l'installation, les raccordements horizontaux, l'installation de la pompe à chaleur et des émetteurs est installé par un installateur qualifié (climaticien, chauffagiste,...). L'ensemble de la prestation pouvant être de sa responsabilité.

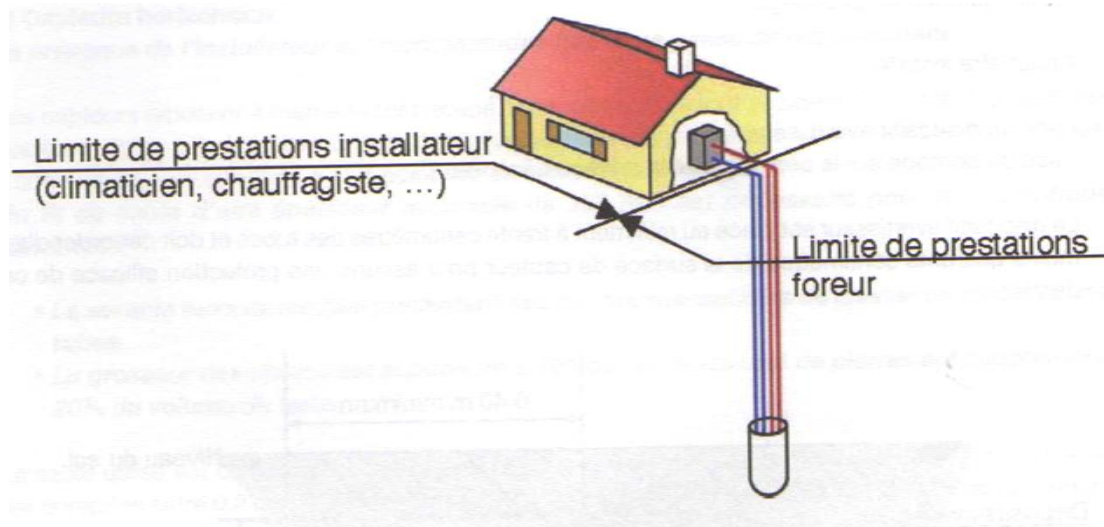


Figure II.10 : Limites de prestation des ouvrages.

Une fois le forage vertical effectué, il est souvent nécessaire de stabiliser le trou avec des additifs qui permettent d'améliorer la conductivité à proximité de l'échangeur.

Les composants les plus utilisés sont la bentonite et des produits à base de cellulose. Ils sont facilement injectables dans le forage à l'aide d'une pompe et d'un tube d'injection.

Ces additifs, à faible perméabilité, servent également à éviter la contamination des couches aquifères lors des forages en formant une espèce de gangue cylindrique imperméable autour des capteurs.

D'autres matériaux comme de la baryte ou de l'hématite sont utilisés pour augmenter la densité des boues de forage et contrecarrer la pression du sol.

Le capteur est introduit dans le forage vertical. Le trou est ensuite rempli soit par un mélange 95% de ciment et 5% de bentonite ou d'opalite de préférence soit par de la bentonite seule.

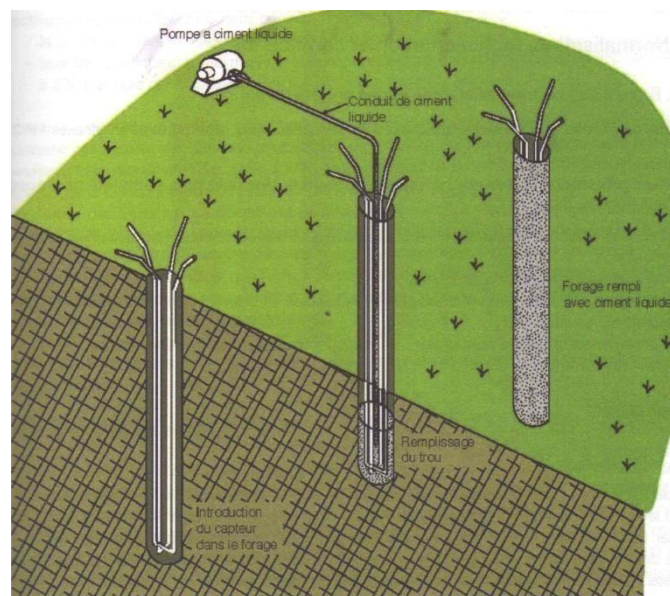


Figure II.11 : Principe de remblaiement des capteurs verticaux.

II.6. Le problème de la décharge thermique du sol: [8]

L'extraction de chaleur dans le sol via des échangeurs enterrés peut amener à une décharge thermique du terrain. D'où la nécessité d'une recharge thermique.

L'étude bibliographique nous amène à la conclusion suivante : une décharge thermique du sol se produit, à une vitesse plus ou moins grande en fonction de la composition du sol et du dimensionnement des puits. Un nombre de puits croissant augmente la décharge thermique du sol.

Pour éviter ce problème souvent rencontré dans les installations concrètes un dimensionnement plus rigoureux (nombre de puits et longueur) est nécessaire et nécessite de modéliser précisément les échanges thermiques entre le sol et les puits.

II.7.Solution analytique :

II.7.1.Méthode de source de chaleur cylindrique : [17]

En pratique l'échangeur de chaleur enterré est un tube en U enterré dans un forage réalisé dans le sous-sol et ou l'espace annulaire et rempli par le béton. Pour donner une meilleure conductibilité thermique avec la terre et pour prévenir une éventuelle contamination des eaux des nappes phréatique, la profondeur de ces forage peut varier de 40 à 200 m avec un diamètre qui peut varier lui aussi de 75 à 150 mm, comparer a sa profondeur ce diamètre est très petit. Cet ensemble tube, béton peut être comparé à un radiateur cylindrique d' ou la méthode cylindrique. Par le billet de cette méthode, la température d'entrée et de sortie de l'échangeur peut être calculée à partir de la température de la paroi du pieu énergétique. Enfin si la température entrée-sortie du tube est connue l'échangeur peut être couplé à une pompe à chaleur dont on peut évaluer le COP.

Les images suivantes présentes la méthode pour déterminer la température d'entrée et de sortie de l'échangeur par la température de la paroi du pieu.

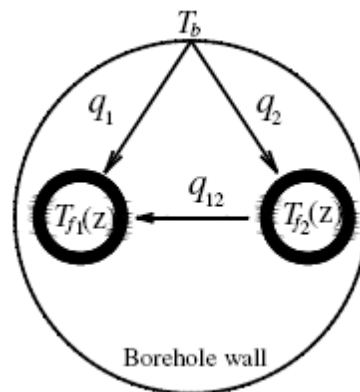


Figure II.12 : Flux de chaleur à l'intérieur du pieu énergétique.

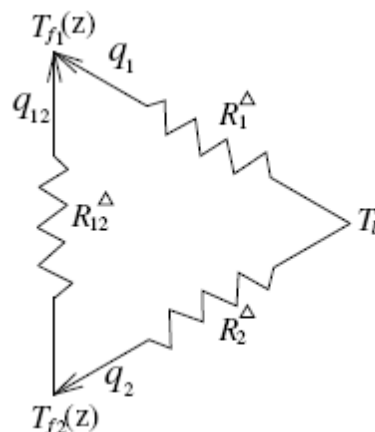


Figure II.13 : Résistance thermique à l'intérieur du pieu énergétique.

Le transfert de chaleur à l'intérieur du pieu est considéré régulier parce qu'il est relativement petit par rapport au sol qui l'entour.

II.7.2.Méthode de la source de chaleur linéaire (règle de pouce) :

Le but général de l'analyse thermique est de maîtriser la réaction de la chaleur avec le sol c-à-d le rapport entre le régime d'extraction de la chaleur et la température du liquide caloporteur, sous des conditions variables.

Un point de départ approprié pour l'analyse est le cas fondamental d'un forage vertical unique. L'échangeur de chaleur au sol se compose de deux parts principales : l'échangeur de chaleur dans le forage et le sol en dehors du forage.

Le forage agit en tant que tige verticale froide, la conduction est le phénomène dominant du transfert thermique. Il y a beaucoup d'autres phénomènes qui compliquent le procédé thermique. Les conditions de borne sur la surface au sol sont déterminées par le climat local variable comprenant la neige et la pluie.

Les eaux souterraines mobiles en fissures peuvent influencer l'écoulement de la chaleur autour du forage.

La prochaine simplification concerne la demande de la chaleur, qui change souvent fortement, par exemple pendant le jour et la nuit.

Dans l'étude des performances énergétiques d'une sonde géothermique le suivi des étapes suivantes est recommandé [17] :

Etape 1 : le test géologique qui consiste à prélever des carottes de rocher jusqu'au fond du stockage et d'effectuer de multiples analyses en laboratoire des différentes couches souterraines les mesures sur ces prélèvements permettent la connaissance de la capacité thermique volumétrique du terrain avec précision.

Etape2 : détermination de la température moyenne du terrain T_0 .

Pour le faire on fait circuler un fluide caloporteur (eau + antigel) dans la sonde géothermique pendant une période de temps égale à 20 h presque ceci sans injection de chaleur.

Etape 3 : consiste à utiliser la sonde géothermique pour injecter dans le terrain une puissance thermique constante et mesurer l'évolution temporelle des températures allées (entrée T_{fin}) et retour (sortie T_{fout}) du fluide circulant dans la sonde.

Etape4 : déterminé la conductibilité thermique moyenne du terrain le long de la sonde et la résistance thermique effective de cette dernière, la connaissance de ces deux paramètres est essentielle pour la simulation thermique et le dimensionnement d'un stockage de chaleur diffusif dans le terrain. [18]

II.8.Solution expérimentale :

II.8.1.Test de réponse thermique – in-situ [20] :

Pour permettre un dimensionnement correct d'un système de pompe à chaleur géothermique, il est indispensable de connaître les paramètres thermiques du terrain. Le test de réponse thermique offre une méthode pour obtenir ces paramètres dans lesquels, les conditions du site sont prises en compte. Un des appareils très performant (le Mini-module de chauffage) développé et mis au point par l'EPLF, Polytechnique Fédérale de Lausanne effectue ces tests de réponse in-situ. Le Mini-module de chauffage est actuellement utilisé aussi bien pour la recherche, les bureaux d'études et des expertises.

Les paramètres obtenus lors d'un test de réponse thermique sont :

- Conductivité thermique effective du terrain λ [W/(m.K)]
- Température moyenne initiale du terrain **Tini** [°C]
- Résistance thermique effective de la sonde **Rb** [K/(W.m)]

II.8.1.1.Le mini-module de chauffage de L'EPFL :

Le Mini-module de chauffage (figure II.14) est compact; il tient dans une valise de type « flight case » (0.6m x 0.3m x 0.7m). Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- chaudière électrique avec une puissance réglable entre 1 et 9 kW
- pompe de circulation et réglage du débit pour un débit maximal de 8 m³/h
- systèmes de sécurité pour la pression et la température du fluide caloporteur
- capteurs de mesure pour la température, la pression, le débit et l'énergie
- data-logger connecté à un modem GPRS
- accréditation selon **ISO/CEI 17'025**.

En plus du data-logger qui effectue l'acquisition des différents paramètres, le système de télétransmission permet de suivre en temps réel sur Internet l'évolution du test.



Figure II.14 : Le mini-module de chauffage de l'EPFL.

Les protocoles d'essais montrent l'évolution des différents paramètres mesurés au cours du test de réponse thermique. Ces valeurs sont utilisées pour l'interprétation des caractéristiques thermiques du terrain (en utilisant la méthode de la source de chaleur linéaire).

Le test doit être réalisé dans un forage équipé d'une sonde géothermique de profondeur connue, situé à proximité immédiate de l'installation future.

II.9. Module de chauffage expérimentale états unis d'Amérique – Arabie saoudite : [22]

Ce travail présente l'analyse énergétique et le transfert thermique testé pour un échangeur de chaleur enterré. Dans cette étude un tube vertical en forme de U est inséré dans le sol à une profondeur de 80 m dans un pieu énergétique de 20 cm de diamètre, ce système est installé pour la première fois à l'université du roi Fahd de l'Arabie saoudite, un appareil de mesure thermique mobile est construit et utilisé pour mesurer les performances de l'échangeur de chaleur souterrain, les résultats des tests thermiques sont portés quatre fois sur la période allant de septembre 2007 à avril 2008. Pour différentes puissances du stockage thermique, les résultats sont analysés et fournissent une meilleure compréhension du comportement thermique et dynamique de l'échangeur de chaleur vertical.

Deux pieux énergétiques verticaux séparés de 1 m de distance sont forés chacun avec un diamètre de 20 cm et 80 m de longueur. Dans le premier pieu un tube en U est inséré et l'espace annulaire est rempli par le béton, le tube est en polyéthylène haute densité (HDPE) de diamètre 1 ¼ in le second pieu est utilisé comme moniteur ou six thermocouples de type T (copper-constantan) sont montés à différentes profondeurs 0.1-0.2-0.3-10-30 et 50 m. En plus des sept thermocouples un 8^{ème} est installé à 0.2 m de la surface pour mesurer la température ambiante, après cela le pieu est rempli par le même béton utilisé dans le premier.

Les remarques qu'on peut relever, c'est que l'expérimentation faite, a donné les résultats suivants :

- Une différence de température de 3 à 4 °C entre l'entrée et la sortie.
- Le temps nécessaire du stockage thermique est entre 75 et 240 h (10 jours).
- Le stockage thermique dépend des propriétés physiques du terrain et du béton.

Le test thermique avec une puissance de chauffage de 1.5 W du caloporteur est analysé jusqu'à l'état d'équilibre les résultats sont relevés de l'entrée et la sortie du GHE.

II.9.1.Appareil expérimental :

Le matériel de l'appareil expérimental est établi sur une petite remorque avec un essieu unique, le matériel se compose d'une pompe de circulation HP, trois éléments de chauffage d'eau dans la gamme de 5 KW, un filtre d'eau, puits isolé, tube et soupapes.

A l'extérieur de la remorque existe deux raccords qui permettent l'assemblage au deux tubes en HDPE des pieux géothermiques.

Le matériel d'instrumentation comprend un débit mètre, trois sondes thermocouple et capteur de puissance qui fournissent la température à l'entrée et à la sortie du pieux à différentes profondeurs ainsi que le débit et la puissance fournie.

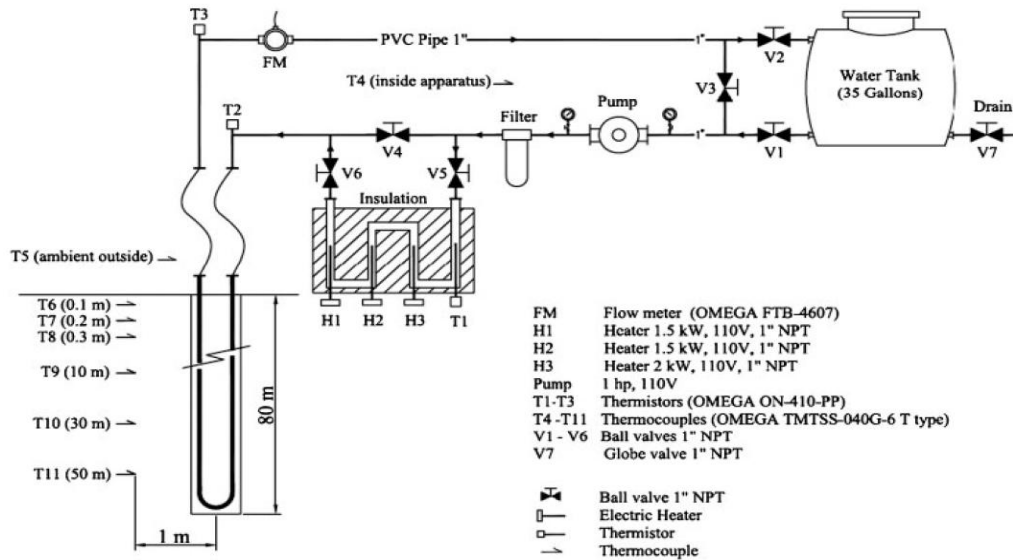


Figure II.15 : Appareil expérimental.

II.10. Etude de l'influence de la profondeur : [22]

L'objectif est de montrer la distribution de la température dans les pieux énergétiques d'un système couplé à une pompe à chaleur en fonction du temps. L'intervalle de temps dans cette étude est de 48 h, le système de stockage utilise le R-22 comme fluide frigorigène dans la pompe à chaleur et 3 échangeurs de chaleur en tube en U en polyéthylène d'un diamètre extérieur de 40 cm.

Les échangeurs de chaleur sont insérés verticalement dans trois pieux dont le diamètre est de 150 mm et la profondeur est de 30 m (VB1), 50m (VB2) et 90 m (VB3).

Les résultats expérimentaux ont été obtenus de la saison 2006-2007 des deux modes chauffage et refroidissement.

Un modèle d'élément fini (FEM) à deux dimension est développé dans cette étude pour simuler la distribution de la température dans le sol tout au tour de l'échangeur enterré du système, en opération dans le mode chauffage et refroidissement, la simulation est réalisé par le logiciel ANSYS.

II.10.1.Méthodologie :

Pour déterminer la température initiale du terrain une circulation sans chauffage de 20 à 30 min est réalisé après ça un chauffage par une puissance constante pendant 48H est imposé.

Les caractéristiques des échangeurs énergétiques verticaux testés sont représentés dans les tableaux suivant :

Diamètre extérieur	40 mm
Diamètre intérieur	35.2 mm
Densité ρ	0.96 g/cm ³
Température ramollissement	130 °C
Température de travail	90 °C
Conductivité thermique λ	0.4 W/m.k
Résistance thermique R	0.0815 k/(W/m)

Tableau II.3 : Caractéristiques du tube en U.

Les paramètres utilisés pour le test de réponse thermique sont représenté dans le tableau suivant :

Paramètres du test	Etats	
	VB2	VB3
Durée du test	48 h	48h
Température initial de terre	15.7 °C	15.7 °C
Chaleur injecté	4.90 KW	4.90 KW
Profondeur du pieu	60 m	90 m
Diamètre du pieu	150 mm	150 mm
Puissance du réchauffeur	3 KW	6 KW
Type du capteur	Un seul tube en U SDR-11	Un seul tube en U SDR-11
Chaleur spécifique	2.200.000 j/Kg.k	2.200.000 j/Kg.k
Diffusivité thermique	7.73x10 ⁻⁷ m ² /S	7.73x10 ⁻⁷ m ² /S

Tableau II.4 : Paramètre du test thermique pour les pieux VB2 et VB3.

II.10.2.Résultats du test de réponse thermique :

Température de la maison entre 21-24 °C.

durée	Recharge (free-cooling)			Décharge (chauffage)		
	3 mois			5 mois		
	VB1	VB2	VB3	VB1	VB2	VB3
Te	41	37.9	35.9	13.6	19.8	23.7
Ts-Te	3.48	4.75	6.25	3.12	4.98	6.66
COP	2.69	2.88	3.45	1.98	2.66	3.50
Tt(moyenne)	19.97	16.23	13.37	13.35	17.07	21.02

Tableau II.5 : Température de recharge et décharge des 3 pieux énergétique.

II.11. Etude de l'influence de la forme :

L'étude expérimentale faite par Jun Gao et al [18] pour estimer le potentiel de l'énergie géothermique pour le chauffage et le refroidissement des résidences de Shanghai en Chine en utilisant des pieux énergétiques est basé sur une série de tests des performances des différentes configurations possible de la forme du tube inséré dans le béton afin de déterminer la plus performante.

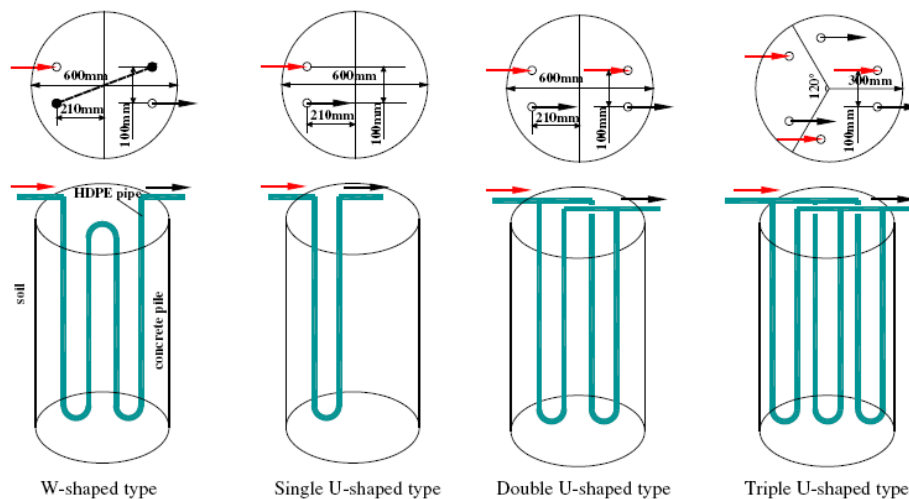


Figure II.16 : Quatre configurations des échangeurs de chaleurs enterrées (diamètre intérieur $d=2$)

L'étude a montré que la forme W du tube avec un seul débit du fluide caloporteur imposé à l'entrée apparaît comme la plus efficace du point de vue énergétique, pendant cinq ans de service la température du sol augmente de 2.77°C pendant la période de recharge et de 0.81°C pendant la période de décharge, et se stabilise entre cet intervalle.

II.12. Solution par simulation numérique utilisant le logiciel TRNSYS :

Tel que montré à la Figure II.17, le système étudié possède deux réseaux parallèles de tubes en U, un associé à la recharge solaire et l'autre à la décharge vers les bâtiments. Il y a donc quatre tubes dans chaque puits géothermique (2 tubes en U).

Le système étudié peut opérer selon trois modes de fonctionnement: [23]

- i) *Recharge solaire du SSPG*: dans ce mode, les besoins du bâtiment sont nuls et il n'y a aucun débit dans le circuit de décharge.
- ii) *Décharge du SSPG* : Dans ce mode, les besoins sont non nuls et les gains solaires sont nuls (aucun débit du côté des capteurs solaires).
- iii) *Recharge et décharge simultanées* : Pour ce cas, il y a un débit dans les circuits de recharge et de décharge.

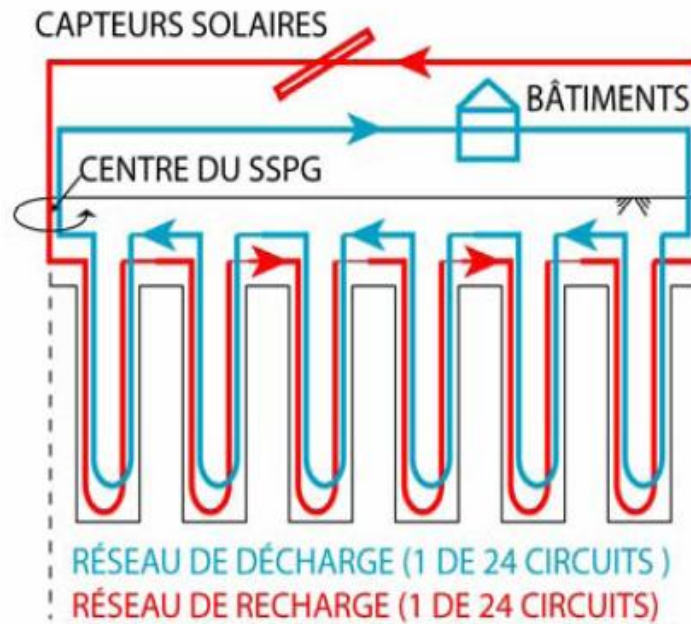


Figure II.17 : Représentation schématique du système étudié.

Lorsque le système étudié opère simultanément en mode recharge/décharge l'approche utilisée consiste à utiliser le TYPE 557 en mode décharge, que l'écoulement se fait des bords vers le centre. L'échange de chaleur entre le réseau de recharge et celui de décharge qui se produit dans le SSPG (Figure II.17) est approximé par un échangeur de chaleur contrecourant conventionnel (TYPE 91) dont l'efficacité a été fixée à 0,8. Une analyse de sensibilité a été réalisée sur cette dernière valeur. Il ressort de cette analyse que la variation de la fraction solaire est inférieure à 1% lorsque l'efficacité est variée de 0,5 à 1,0.

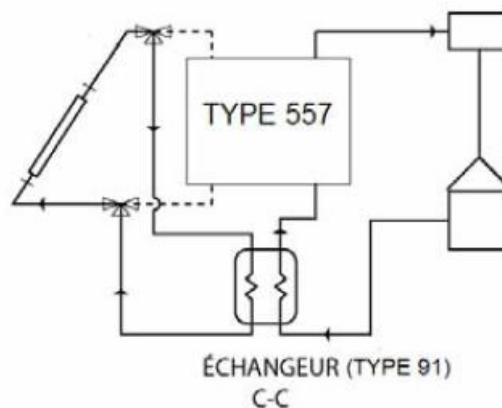


Figure II.18 : Représentation schématique de l'approche utilisée dans TRNSYS dans le cas d'une recharge/décharge simultanées.

Les différentes températures entrées sorties des modes recharge et décharges des échangeurs verticaux ainsi que les débits et les puissances sont sur l'annexe 1.

II.13. Conclusion :

Le stockage souterrain de l'énergie solaire est assuré donc par des tubes en polyéthylène haute densité HDPE enterré verticalement ou horizontalement dans le sous-sol qui représente donc une source froide très stable pour l'évaporateur de la pompe à chaleur, ce qui augmentera le rendement de l'installation et couvrira les besoins thermiques dans une habitation pour un confort maximale.

L'étude des caractéristiques des échangeurs enterrés et de ses différentes configurations, nous a conduites à s'intéresser à l'échangeur vertical vu que les installations avec ce type d'échangeur affichent en général le meilleur coefficient de performance moyen et peuvent couvrir les besoins de confort presque à 100%.

Nous avons exposé dans ce chapitre les différentes solutions utilisées pour l'étude des performances thermiques et dynamiques de ce type d'échangeur, et l'influence de la forme et de la profondeur sur son efficacité énergétique.