



Plate-forme expérimentale pour les pompes à chaleur géothermiques – Tranche 2

Rapport final

BRGM/RP-60990-FR

Septembre 2012

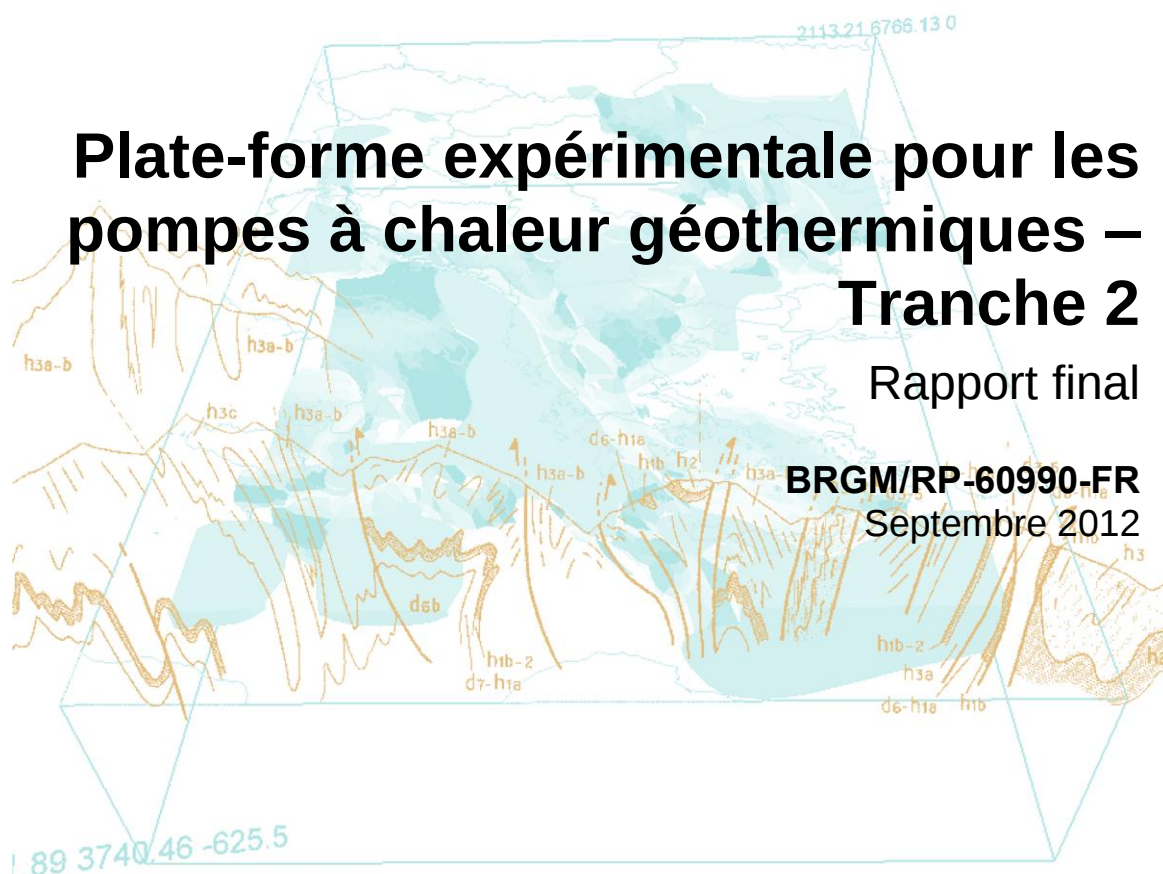


Plate-forme expérimentale pour les pompes à chaleur géothermiques – Tranche 2

Rapport final

BRGM/RP-60990-FR

Mars 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Recherche du BRGM 2010-2011

La Plate-forme expérimentale pour les pompes à chaleur géothermiques
est cofinancée par l'Union Européenne. L'Europe s'engage en Région Centre
avec le Fonds européen de développement régional.

Projet cofinancé par la Région Centre



26 SEP. 2012

Alain BEAUCE
Directeur Adjoint
Direction de la Recherche

Vérificateur :

Nom : Xavier RACHEZ

Date : 26/09/2012

Signature :

Approbateur :

Nom : Romain VERNIER

Date : 26/09/2012

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Géothermie, Plate-forme expérimentale, Géothermie très basse énergie, Échangeurs géothermiques, Échangeurs souterrains.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Philippe M., Maragna C. (2012) – Plate-Forme expérimentale pour les pompes à chaleur géothermiques – tranche 2. Rapport final. BRGM/RP-60990-FR. 54 p., 35 fig., 2 tabl., 1 ann.

Synthèse

Ce rapport d'activité fait la synthèse des travaux réalisés lors de la 2^{ème} tranche du projet « Plate-Forme expérimentale pour les pompes à chaleur géothermiques ».

Après un rappel du contexte et de l'état de la plate-forme après les travaux de construction et la mise en service réalisés en tranche 1, les résultats obtenus dans le cadre de la tranche 2 sont présentés suivant les cinq axes suivants :

- expérimentations sur les échangeurs géothermiques de référence ;
- description et modélisation des échangeurs géothermiques et de leurs couplages avec les installations de surface ;
- contribution à des développements innovants ;
- engagements de partenariats ;
- communication et évènementiel.

Ce rapport final permet de constater le bon déroulement de la tranche 2, suivant le planning prévisionnel. La tranche 3 du projet permettra notamment de poursuivre les campagnes d'essais, de maintenir et d'améliorer l'infrastructure et de mener des travaux plus spécifiques sur l'aspect communication (réalisation d'un parcours de visite balisé et agrémenté de panneaux explicatifs, mise en ligne d'un site web dédié à cette plate-forme, création de plaquettes de communication).

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. DÉCOUPAGE DU PROJET EN TROIS TRANCHES	9
1.2. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE LA PLATE-FORME	9
1.2.1. Machinerie thermodynamique et système de régulation	10
1.2.2. Échangeurs géothermiques.....	11
1.2.3. Métrologie	16
2. Résultats obtenus	17
2.1. AXE 1 : EXPÉRIMENTATIONS SUR LES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES DE RÉFÉRENCE	17
2.1.1. Mise en œuvre d'instruments pour l'acquisition de données géo- climatiques	17
2.1.2. Expérimentation d'un choc thermique sur une sonde géothermique verticale.....	21
2.1.3. Réalisation d'un test de réponse thermique sur un échangeur géothermique plan.....	23
2.1.4. Amélioration de la régulation de la machinerie thermodynamique	28
2.1.5. Sécurisation du stockage des données-clés mesurées sur l'installation expérimentale	30
2.1.6. Création d'une interface de gestion dynamique des consignes	30
2.2. AXE 2 : DESCRIPTION ET MODÉLISATION.....	31
2.2.1. Modélisation dynamique d'une pompe à chaleur sur échangeur horizontal	31
2.2.2. Modélisation de la température à la surface du sol.....	32
2.2.3. Modélisation fine de la géométrie des échangeurs géothermiques.....	35
2.3. AXE 3 : CONTRIBUTION À DES DÉVELOPPEMENTS INNOVANTS	37
2.3.1. Thèses engagées.....	37
2.3.2. Projet ANR ECLIPSE	37
2.4. AXE 4 : ENGAGEMENTS DE PARTENARIATS.....	38
2.4.1. Engagements de partenariats avec d'autres centres de R&D en France.....	38
2.4.2. Contribution à la mise en place de compétences en Région Centre : formation de DUT Génie Thermique et Energétique à orientation Géothermie	39

2.4.3. Engagements de partenariats avec d'autres centres de R&D à l'étranger	40
2.5. AXE 5 : COMMUNICATION ET ÉVÈNEMENTIEL	40
2.5.1. Organisation des moyens pédagogiques à l'usage des visiteurs de la plate-forme	40
2.5.2. Mise à contribution de la plate-forme pour des actions de formation et d'information.....	41
3. Conclusions et perspectives	43
4. Publications et communications scientifiques autour du projet Plate-Forme – tranche 2 (2010-2011)	45

Liste des illustrations

Figure 1 - Copie d'écran de la vue de contrôle des cinq expérimentations affichée par l'automate.....	10
Figure 2 - Schéma d'implantation du secteur des échangeurs géothermiques horizontaux.....	11
Figure 3 - Caractérisation des cadrans « pelouse / parking » et « soleil / ombre ».	11
Figure 4 - Vue des tubes de l'échangeur lors de leurs mises en places sur un des quatre cadrans de la zone d'implantation des échangeurs géothermiques horizontaux.....	12
Figure 5 - Vue en coupe des échangeurs horizontaux et des fibres optiques.	12
Figure 6 - Vue de la tête de la sonde géothermique verticale coaxiale cinq tubes.....	13
Figure 7 - Schéma d'implantation des sondes géothermiques et des piézomètres de contrôle.....	14
Figure 8 - Corbeille géothermique Helix fabriquée par REHAU : produit réceptionné sur le chantier (bas), produit prêt à mettre en place (haut).....	15
Figure 9 - Schéma d'implantation des corbeilles géothermiques sur la plate-forme.	15
Figure 10 - Principe de l'effet « Raman » exploité pour la mesure des températures par fibre optique.....	16
Figure 11 - Évolution du rayonnement solaire incident mesuré par le pyranomètre (mesure expérimentale du 16/08/10 au 27/08/10).	18
Figure 12 - Schéma d'un albédomètre en vue de face (gauche) et en vue de dessus (droite).	18
Figure 13 - Évolution de la température ambiante et de l'humidité de l'air (mesure expérimentale du 16/08/10 au 27/08/10).	19
Figure 14 - Évolution des précipitations (mesure expérimentale du 16/08/10 au 27/08/10).....	20

Figure 15 - Évolution de la température respectivement à la surface, à 5 cm et à 10 cm de profondeur (mesure expérimentale août 2010)	20
Figure 16 - Profils de température dans le forage, avant (gradient géothermique naturel) et pendant l'injection de chaleur.	22
Figure 17 - Évolutions temporelles des températures du fluide, mesurées par les sondes Pt100, et de la température du matériau de remplissage.	22
Figure 18 - Cadran de l'échangeur plan sur lequel le test a été réalisé.	24
Figure 19 - Évolution de la température de l'air au cours du test de l'échangeur horizontal.	24
Figure 20 - Méthode de dimensionnement d'un échangeur horizontal : détermination de la longueur de la superficie de l'échangeur et de l'espacement des tubes en fonction des besoins en chaleur de l'habitation, de l'efficacité de la PAC et de la conductivité thermique du sol (d'après la norme allemande VDI4640).	25
Figure 21 - Évolution de la puissance échangée en fonction du temps. La déviation observée est inférieure à 5 % de la consigne en puissance (l'injection débute à 10 h).....	26
Figure 22 - Évolution des températures d'entrée et de sortie au cours du test (l'expérience débute à 10 h).	26
Figure 23 - Profils de température du sol autour de l'échangeur horizontal à trois profondeurs (0,5 m, 1 m, 1,5 m) relevés à différents instants de l'expérience.	27
Figure 24 - Schéma bloc du système régulé.	28
Figure 25 - Schéma bloc simplifié.	28
Figure 26 - Réponse du système à un échelon de 30 % pour le calcul de G_s	29
Figure 27 - Schéma de la liaison réseau entre le BRGM et la plateforme.	30
Figure 28 - Formulaire dynamique en JavaScript de l'envoi de consignes : chargement d'un fichier de consignes déjà calculées (gauche) ou d'un programme Python pour le calcul des consignes à chaque pas de temps (droite).	31
Figure 29 - Évolution des températures en entrée/sortie d'échangeur géothermique horizontal et comparaison avec la température de sortie prédite par la modélisation.....	32
Figure 30 - Bilan des flux thermiques à la surface du sol.	33
Figure 31 - Synoptique de la modélisation de l'évolution de la température du sol en fonction des données météorologiques.....	34
Figure 32 - Température à la surface du sol calculée et mesurée.	35
Figure 33 - Évolution temporelle des températures d'entrée et de sortie d'échangeur géothermique sur les 60 h du TRT modélisé.	36
Figure 34 - Champ de température autour d'une SGV de diamètre 18 cm, suite aux 60 h de sollicitation d'un TRT.	37
Figure 35 - Répartition des visiteurs de la plate-forme par catégories sur la période 2010-2011.....	41

Liste des tableaux

Tableau 1 - Programme pédagogique de l'orientation « géothermie » du DUT GTE de l'IUT d'Orléans.....	39
Tableau 2 - Stages en formation initiale s'appuyant sur l'infrastructure de la plateforme (2010 – 2011).....	42

Liste des annexes

Annexe 1 - Posters créés dans le cadre de la tranche 2 du projet Plate-Forme PAC	47
--	----

1. Introduction

Inaugurée en décembre 2008, la Plate-Forme Géothermie du BRGM permet de tester tous types d'échangeurs géothermiques superficiels à boucle fermée. Cette plate-forme est co-financée par la Région Centre et le FEDER depuis sa phase de construction. Cette première partie introductive rappelle le montage du projet ainsi que les équipements de la plate-forme qui étaient opérationnels pour des premiers essais après la fin de la tranche 1 du projet.

1.1. DÉCOUPAGE DU PROJET EN TROIS TRANCHES

Le projet Plate-forme expérimentale pour les pompes à chaleur géothermiques est décomposé en trois tranches :

- la tranche 1 du projet Plate-forme se réfère à la période 2008-2009. Cette période a correspondu à la construction en 2008 puis à l'année de mise en service en 2009. Elle a fait l'objet du rapport BRGM/RP-58663-FR ;
- la tranche 2 se réfère à la période 2010-2011. Cette période correspond à la phase de mise en exploitation, c'est-à-dire aux expérimentations conduisant à la caractérisation des échangeurs de référence. Son déroulement fait l'objet du présent rapport ;
- la tranche 3 se réfère à la période 2012-2013. Cette période sera plus concentrée sur la valorisation et la dissémination des résultats.

1.2. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE LA PLATE-FORME

La plateforme est constituée de différents types d'échangeurs géothermiques connectés à une machinerie thermodynamique. Cette machinerie permet d'imposer différents types de consigne en termes de température d'injection, débit de fluide caloporteur, puissance échangée. Un système de contrôle-commande permet de réguler l'installation par informatique sur place ou à distance par l'intermédiaire d'une connexion réseau.

Une instrumentation innovante a également été mise en œuvre sur cette plate-forme permettant de suivre au plus près l'évolution de l'environnement souterrain suite aux sollicitations thermiques imposées par les échangeurs géothermiques. Des fibres optiques ont ainsi notamment été mises en place dans le terrain permettant de suivre la variation de température du milieu au cours des expérimentations sur les échangeurs.

La mise en service et le fonctionnement de l'installation sont décrits en détail dans le rapport de la tranche 1 du projet, référencé BRGM/RP-58663-FR. Nous rappelons ici les caractéristiques des principaux éléments.

1.2.1. Machinerie thermodynamique et système de régulation

Le fluide contenu dans l'installation est un mélange d'eau et de monopropylène-glycol, fluide couramment utilisé pour les systèmes géothermiques dédiés au particulier permettant d'éviter tout risque de gel. La machinerie thermodynamique est composée d'un ballon tampon de 700 L relié à un groupe froid de 78 kW et à un réchauffeur de 27 kW. Ces deux éléments permettent d'imposer une température du fluide dans le ballon comprise entre -10°C et $+55^{\circ}\text{C}$. On parle de « mode été » lorsque de la chaleur est injectée dans le terrain (le terrain se réchauffe), c'est-à-dire lorsque le réchauffeur est activé. On parle de « mode hiver » lorsque de la chaleur est prélevée au terrain (le terrain se refroidit), c'est-à-dire lorsque le groupe froid est activé.

Le fluide du ballon est réparti dans cinq boucles d'échangeurs géothermiques (cf. 1.2.2) en fonction des consignes de débit et de température en entrée d'échangeur appliquées sur chaque boucle. Pour chaque boucle, la distribution du fluide est assurée par une vanne 3 voies et une pompe de circulation. La Figure 1 présente une vue de l'interface de commande des expérimentations. Les positions des quatre principaux organes du circuit hydraulique de chaque boucle (vannes 3 voies, pompes de circulation, thermomètres, débitmètres) y sont indiquées.

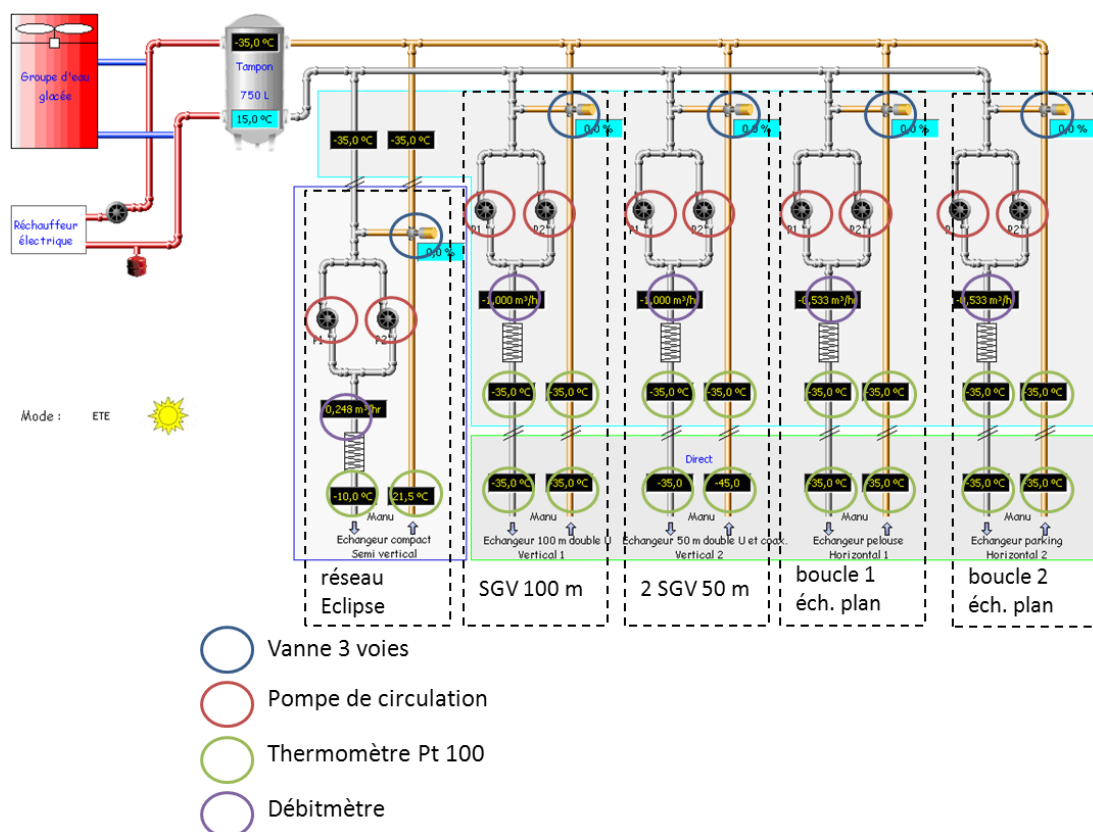


Figure 1 - Copie d'écran de la vue de contrôle des cinq expérimentations affichée par l'automate.

1.2.2. Échangeurs géothermiques

Échangeur plan

L'échangeur horizontal est constitué de quatre cadrans de 100 m² (cf. Figure 2). Chacun des quatre cadrans est caractérisé par le type de surface (pelouse ou caillebotis végétalisé, également désigné comme « parking ») et son exposition – (soleil ou ombre) (cf. Figure 3).

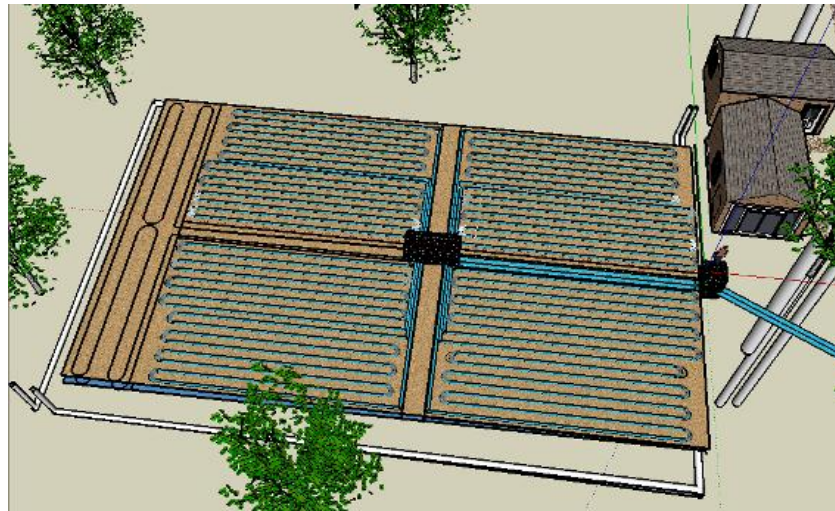


Figure 2 - Schéma d'implantation du secteur des échangeurs géothermiques horizontaux.

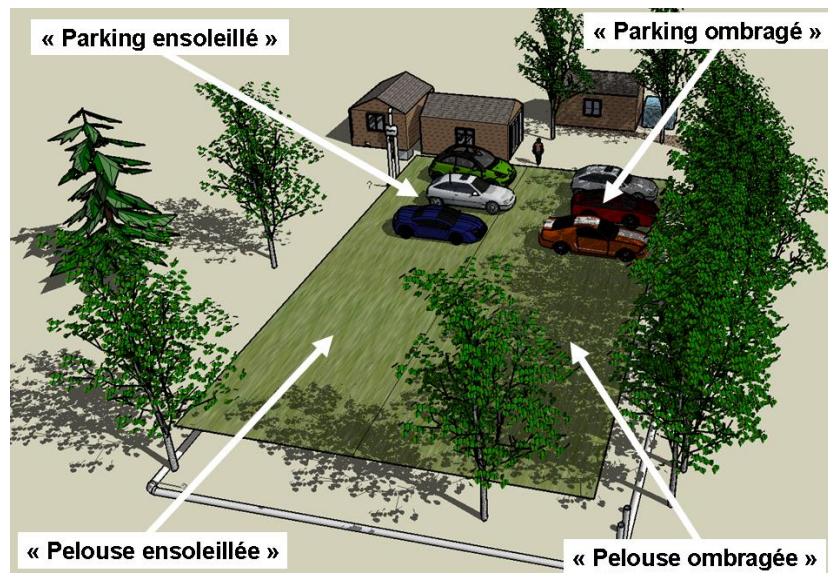


Figure 3 - Caractérisation des cadrans « pelouse / parking » et « soleil / ombre ».

Les tubes dans lesquels circule le fluide caloporteur sont espacés de 50 cm, la longueur totale de tube par cadran est de 200 m répartie en deux circuits parallèles de 100 m chacun. Les tubes sont placés à une profondeur de 1 m comme illustré sur la photo de la Figure 4 prise lors de leur mise en place. Une fibre optique de mesure de température est placée à proximité immédiate des tubes de l'échangeur. Deux fibres optiques sont également disposées respectivement à 50 cm et 1,5 m de profondeur.



Figure 4 - Vue des tubes de l'échangeur lors de leurs mises en places sur un des quatre cadrans de la zone d'implantation des échangeurs géothermiques horizontaux.

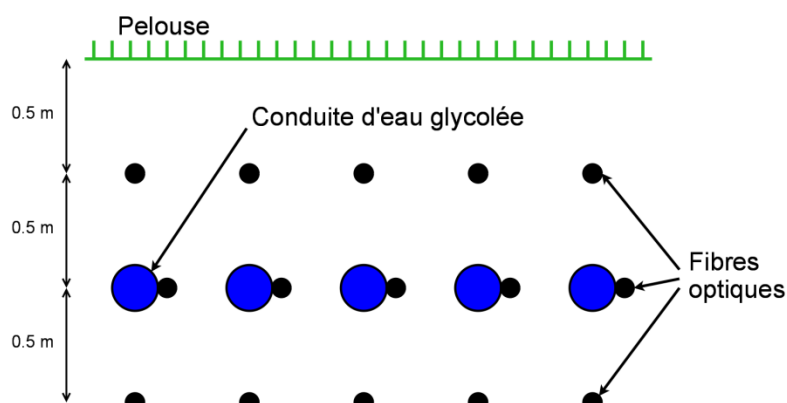


Figure 5 - Vue en coupe des échangeurs horizontaux et des fibres optiques.

Échangeurs verticaux

La plate-forme dispose de 3 échangeurs géothermiques verticaux (aussi appelés sondes géothermiques verticales – SGV) :

- une SGV double-U profonde de 100 m ;
- une SGV double-U profonde de 50 m ;
- une SGV coaxiale cinq tubes profonde de 50 m.

La photo de la Figure 6 présentée ci-dessous montre la tête de la sonde géothermique verticale cinq tubes au niveau de la surface du sol.

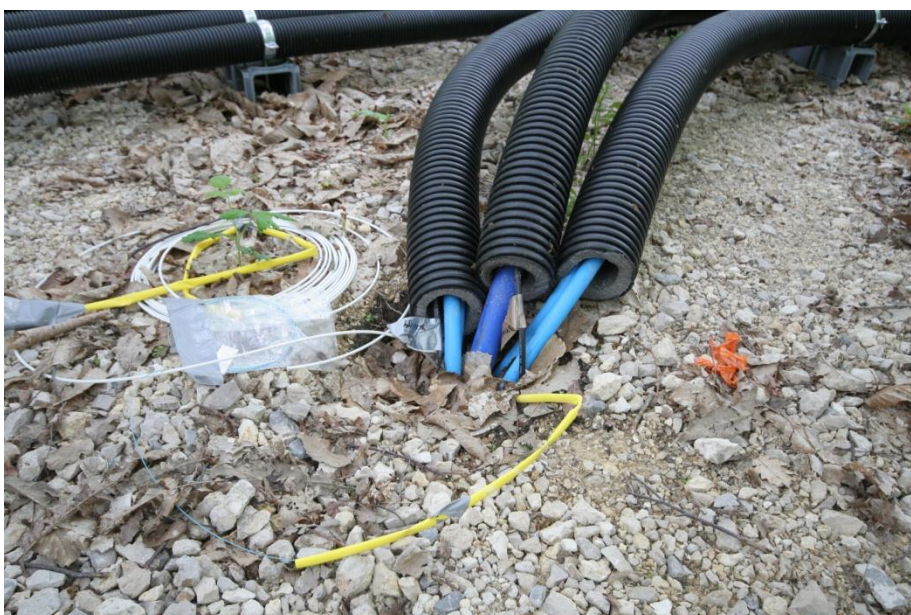


Figure 6 - Vue de la tête de la sonde géothermique verticale coaxiale cinq tubes.

Chaque SGV est équipée d'une fibre optique disposée le long des tuyaux dans le matériau de remplissage du forage (coulis de bentonite), afin de mesurer le profil vertical de température (cf. 1.2.3). Trois piézomètres, situés à une distance de 3 m de chaque SGV, permettant de prélever de l'eau souterraine, sont eux aussi équipés d'une fibre optique afin de suivre la modification de la température du milieu en fonction du cycle de sollicitation appliqué aux SGV (cf. Figure 7).

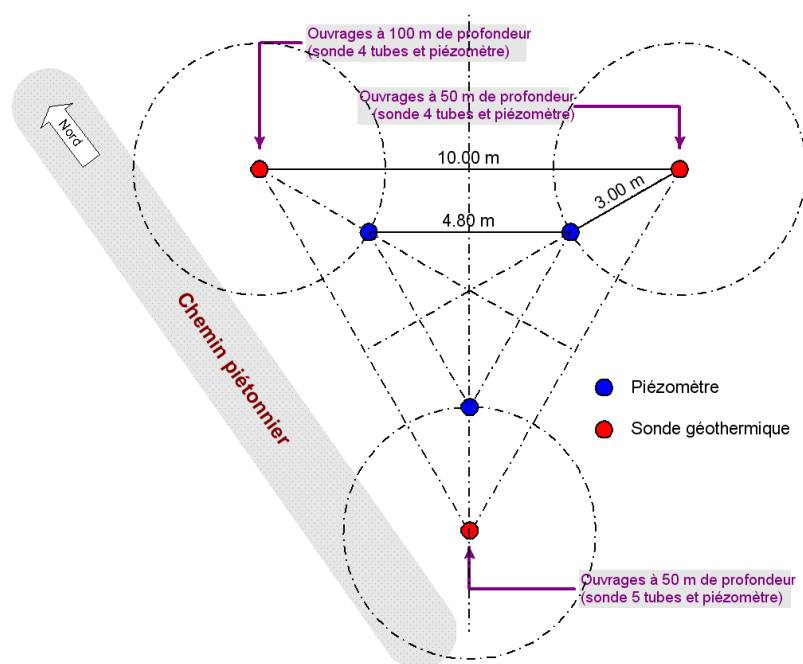


Figure 7 - Schéma d'implantation des sondes géothermiques et des piézomètres de contrôle.

Échangeurs compacts

La plate-forme dispose d'échangeurs compacts. Ces échangeurs ont été testés dans le cadre du projet ANR ECLIPSE, regroupant le BRGM, le CEA-INES, le CSTB, le LOCIE, ECO'Alternative et RYB-Terra. Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés au paragraphe 2.3.2., p. 37.

Dans le cadre du projet ANR ECLIPSE, différentes configurations de corbeilles géothermiques ont été installées au BRGM afin d'obtenir des résultats expérimentaux sur ce type d'échangeur.

Les corbeilles installées sur la plateforme sont les modèles de sondes Helix, fabriqués par la société REHAU. Celles-ci sont transportées sous une forme compacte, afin d'optimiser les coûts de transports et de stockage. La hauteur des sondes conditionnées est de 1,1 m. Une fois déplié, elle atteint 3 m de hauteur (cf. Figure 8) pour 38 cm de diamètre extérieur. REHAU a choisi comme matériau le polyéthylène réticulé (PE-Xa), pour assurer la pérennité de ces tubes. La tenue en température de ces tubes peut ainsi aller jusqu'à 95 °C. Cela permet également un raccordement avec un système solaire thermique.



Figure 8 - Corbeille géothermique Helix fabriquée par REHAU : produit réceptionné sur le chantier (bas), produit prêt à mettre en place (haut).

Le schéma d'implantation des corbeilles est donné en Figure 9. On distingue quatre groupes de corbeilles (de gauche à droite sur la Figure 9) :

- deux corbeilles REHAU empilées, placées entre 1 et 7 m de profondeur ;
- une unique corbeille REHAU placée entre 1 et 4 m de profondeur ;
- une corbeille en cuivre placée entre 1 et 4 m de profondeur, de géométrie identique à une corbeille REHAU ;
- trois corbeilles REHAU empilées, placées entre 1 et 10 m de profondeur.

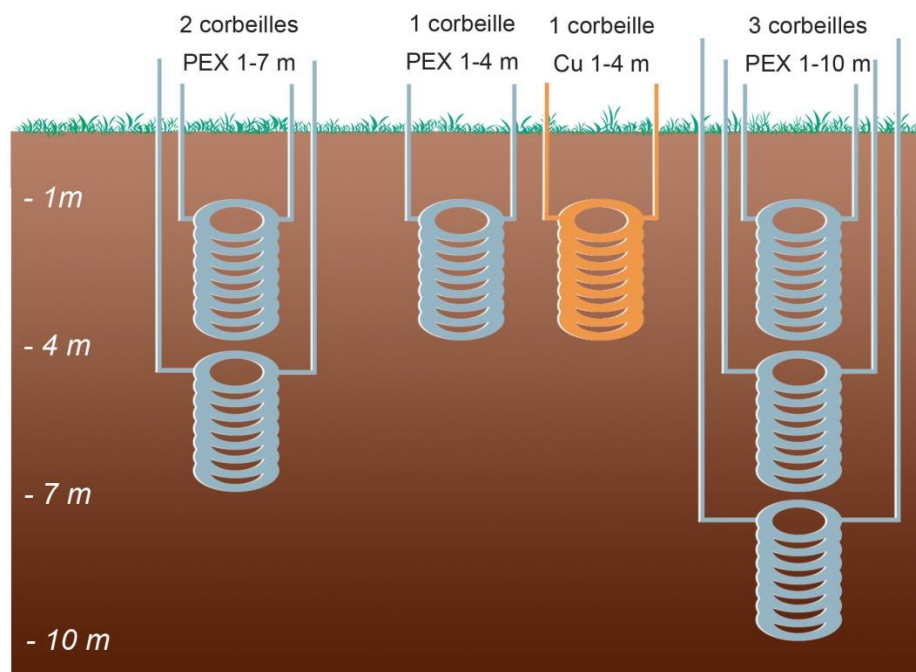


Figure 9 - Schéma d'implantation des corbeilles géothermiques sur la plate-forme.

1.2.3. Métrologie

En complément des sondes de températures Pt100 mesurant les températures de fluide du circuit hydraulique, des fibres optiques (FO) sont disposées à proximité des échangeurs géothermiques. Elles permettent de mesurer l'évolution de la température du milieu au cours des expérimentations sur les différents échangeurs et, après traitement, de recréer des cartographies de températures.

La technologie de mesure retenue utilise les fibres optiques en silice comme élément sensible et l'Effet Raman comme principe physique de mesure (cf. Figure 10). Cette solution est connue sous le nom DTS (Distributed Temperature Sensing).

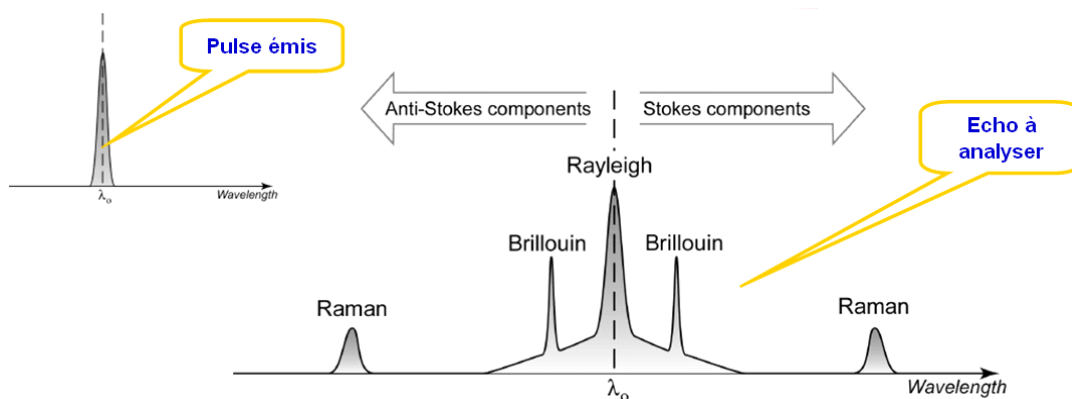


Figure 10 - Principe de l'effet « Raman » exploité pour la mesure des températures par fibre optique.

Les fibres sont disposées :

- le long de la paroi du tube de l'échangeur géothermique horizontal (à 1 m de profondeur), ainsi que 50 cm au-dessus et 50 cm au-dessous (cf. Figure 5) ;
- le long des tubes, dans chacune des sondes géothermiques verticales ;
- le long de chacun des échangeurs compacts Helix.

2. Résultats obtenus

2.1. AXE 1 : EXPÉRIMENTATIONS SUR LES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES DE RÉFÉRENCE

2.1.1. Mise en œuvre d'instruments pour l'acquisition de données géo-climatiques

Une station météorologique ainsi que des sondes d'humidité du sol ont été mises en œuvre afin de suivre l'évolution au cours du temps de l'environnement des échangeurs géothermiques.

Station météorologique

Une station météorologique a été mise en place afin de mesurer les paramètres suivants :

- rayonnement solaire émis par le soleil dans le spectre visible (pyranomètre) ;
- rayonnement réfléchi par le sol dans le spectre visible (pyranomètre) ;
- température et humidité de l'air ambiant ;
- pluviométrie.

Pour chaque paramètre mesuré, nous présentons ci-après des courbes expérimentales. Ces mesures ont permis notamment de valider expérimentalement un travail de modélisation permettant le calcul de la température de surface du sol en fonction des données météorologiques (cf. 2.2.2., p. 32).

- **Mesure du rayonnement émis par le soleil et du rayonnement réfléchi par le sol dans le spectre visible**

Un pyranomètre mesure le rayonnement solaire. Il s'agit d'un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en W/m².

Un pyranomètre sensible dans un domaine spectral de 300 à 2 500 nanomètres a été mis en place sur la plate-forme et a permis des premières mesures de rayonnement solaire direct (cf. Figure 11).

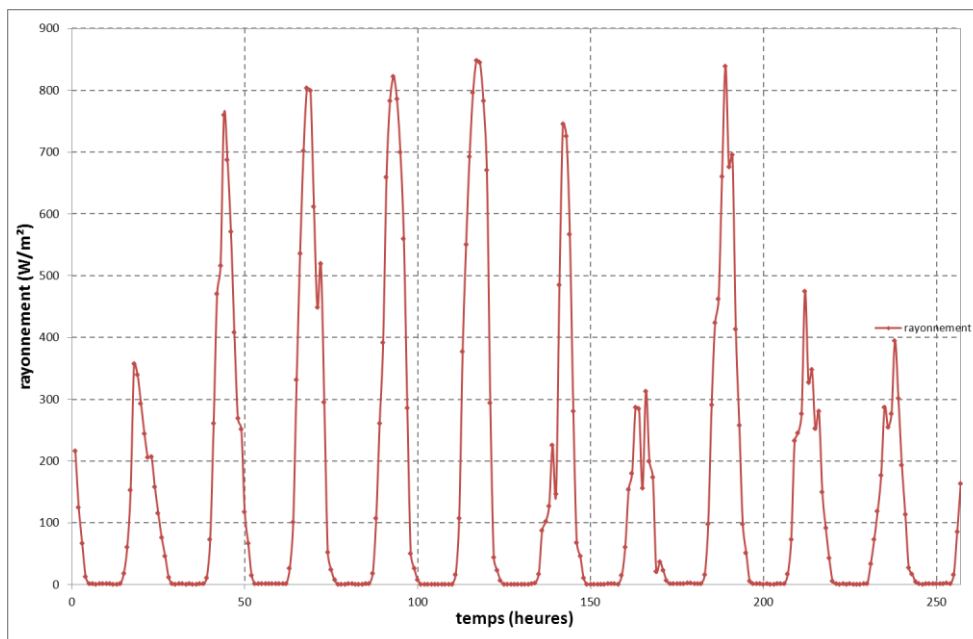


Figure 11 - Évolution du rayonnement solaire incident mesuré par le pyranomètre (mesure expérimentale du 16/08/10 au 27/08/10).

On définit l'albédo comme le rapport entre le rayonnement global diffusé par une surface spécifique et le rayonnement global qui arrive jusqu'à la surface. Un albedomètre est un instrument de mesure composé de deux pyranomètres dont l'un est inversé (cf. Figure 12), la plate-forme a été équipée de deux de ces instruments.

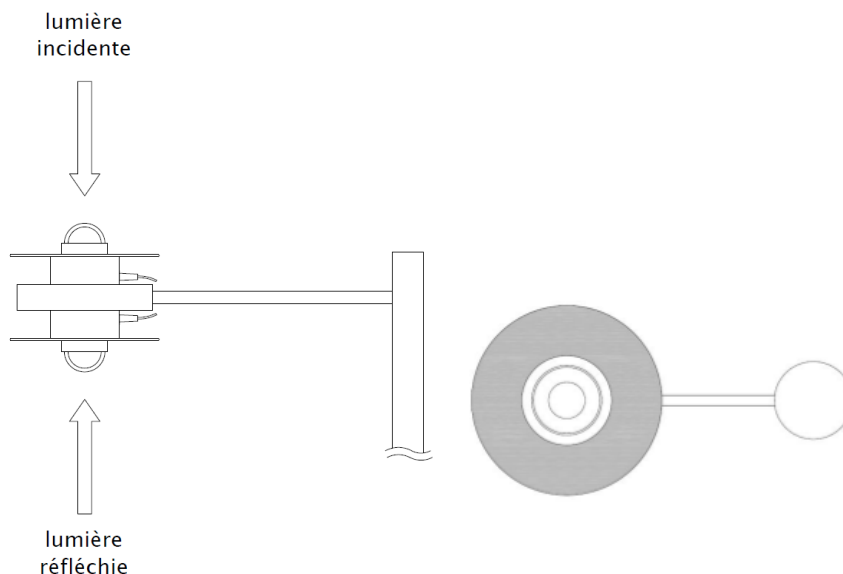


Figure 12 - Schéma d'un albedomètre en vue de face (gauche) et en vue de dessus (droite).

- **Mesure de la température et de l'humidité de l'air ambiant**

La température et l'humidité de l'air ambiant sont mesurées par un seul et même appareil de mesure : un capteur d'humidité (capacitif) et de température (sonde Pt 100) de marque « JUMO ». Les variations journalières de ces deux grandeurs sont représentées en Figure 13.

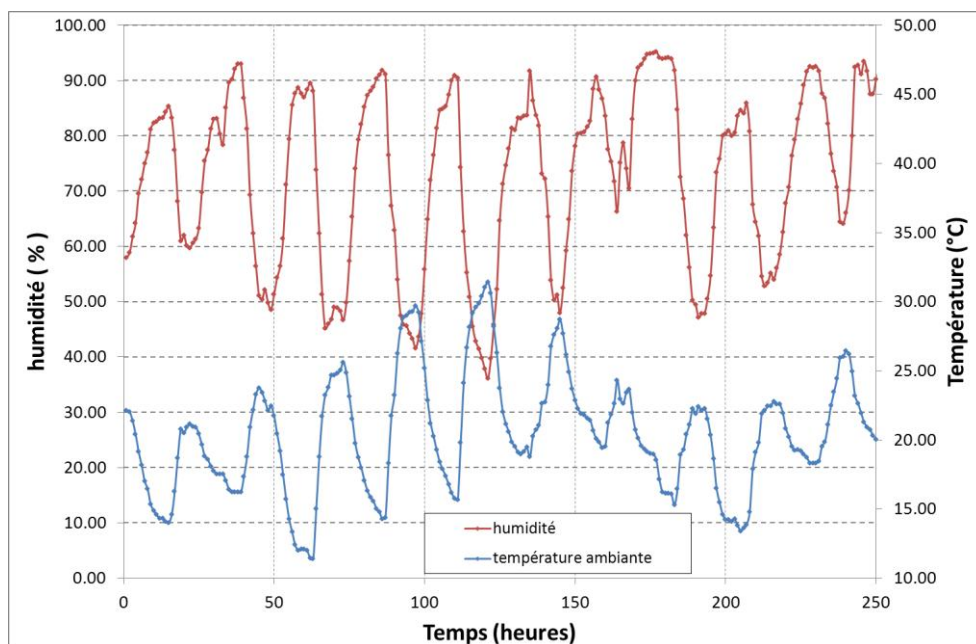


Figure 13 - Évolution de la température ambiante et de l'humidité de l'air (mesure expérimentale du 16/08/10 au 27/08/10).

- **Mesure des précipitations**

Un pluviomètre de marque « Delta OHM » a été mis en place. Il permet, lorsqu'il est relié à un enregistreur de données, de mémoriser les précipitations atmosphériques au cours du temps. Ce pluviomètre est constitué d'une base en métal sur laquelle est positionné un auget basculant. Chaque basculement provoque une ouverture du circuit électrique normalement fermé (court-circuit) pendant une fraction de seconde, envoyant une impulsion à l'enregistreur de données. La mesure de la quantité de pluie se base sur le comptage du nombre de vidanges de l'auget. Des mesures de précipitations réalisées en août 2010 sont présentées en Figure 14.

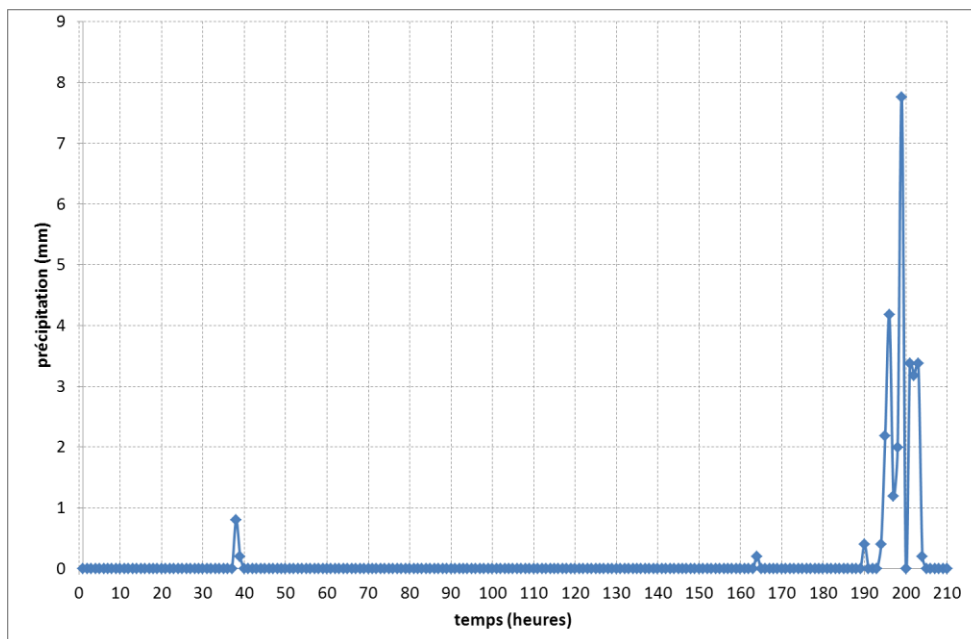


Figure 14 - Évolution des précipitations (mesure expérimentale du 16/08/10 au 27/08/10).

Sonde de température et d'humidité du sol

- Mesure de la température à différentes profondeurs

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples respectivement à la surface du sol, à 5 cm et à 10 cm de profondeur (cf. Figure 15). Qualitativement, on observe que les variations journalières de la température sont amorties avec la profondeur. On remarque également le déphasage temporel dû au temps de pénétration de l'oscillation de température en surface.

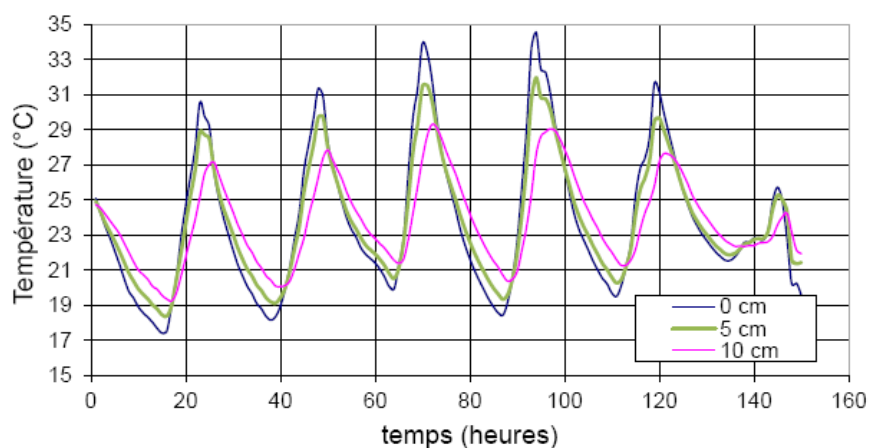


Figure 15 - Évolution de la température respectivement à la surface, à 5 cm et à 10 cm de profondeur (mesure expérimentale août 2010)

2.1.2. Expérimentation d'un choc thermique sur une sonde géothermique verticale

Objectif 1 : Validation du fonctionnement de l'installation

Les résultats présentés ci-dessous ont fait l'objet d'une communication à l'EWOFS [Giuseffi et al., 2010].

Un premier test à débit et température d'injection constants a été réalisé sur la SGV double U de 50 m. La température du matériau de remplissage du forage à proximité des tubes est mesurée par la fibre optique, avec une résolution spatiale de 1 m et un pas de temps de 2 min.

La température le long de la fibre est mesurée avant la mise en circulation du fluide. À chaque profondeur, le fluide, le matériau de remplissage et le terrain sont alors à l'équilibre thermique. En excluant les 10 premiers mètres soumis aux variations saisonnières de la température, la mesure du profil de température permet d'estimer le gradient géothermique à 2,5 °C / 100 m (cf. Figure 16).

L'injection de chaleur a ensuite eu lieu pendant 18 h, avec un débit de 1,2 m³/h et une consigne de température d'entrée du fluide de 35 °C (cf. Figure 17). Après quelques oscillations pendant une courte durée (moins d'une heure), la température d'entrée de l'échangeur se stabilise à la consigne. La température de sortie atteint après quelques heures une valeur de 32 °C environ, soit 3 °C de moins que la température d'entrée. Les températures du matériau de remplissage à 10 m, 30 m, 50 m de profondeur respectivement sont aussi représentées en Figure 17. La température du matériau de remplissage dépend peu de la profondeur. Elle est initialement de 15 °C, puis atteint 32 °C à la fin du test, i.e. 3 °C en-dessous de la température d'injection du fluide, cette différence de température s'expliquant par la dissipation de chaleur par le terrain.

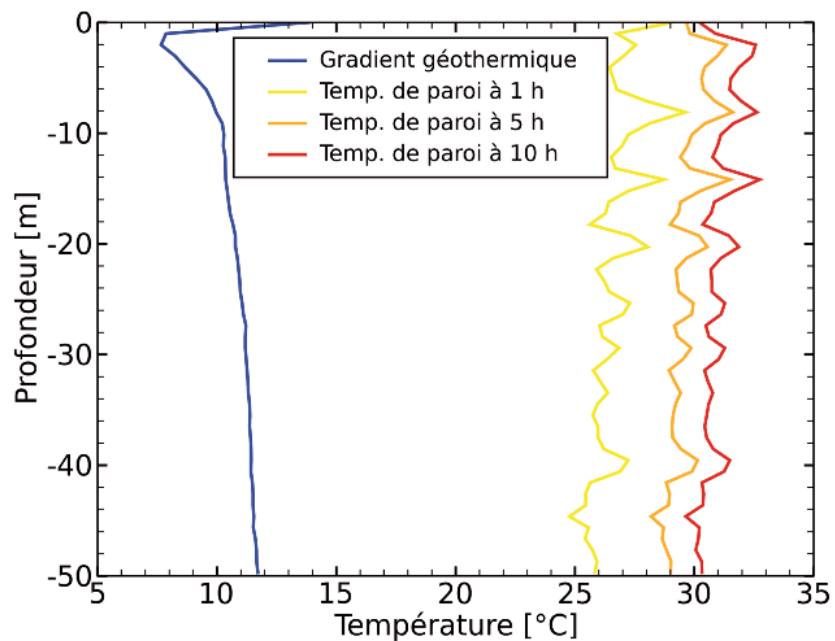


Figure 16 - Profils de température dans le forage, avant (gradient géothermique naturel) et pendant l'injection de chaleur.

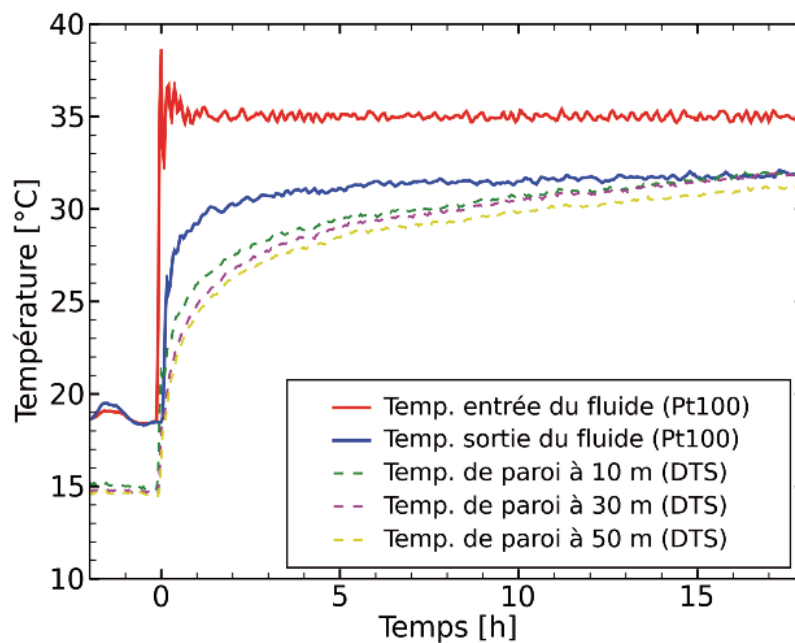


Figure 17 - Évolutions temporelles des températures du fluide, mesurées par les sondes Pt100, et de la température du matériau de remplissage.

Objectif 2 : Estimation de l'influence du réchauffement des eaux superficielles par géothermie sur leurs propriétés physico-chimiques et microbiologiques

Afin de répondre à ce second objectif, une thèse est actuellement en cours sur le sujet suivant : qualification, quantification et inhibition des phénomènes physicochimiques et microbiologiques pouvant impacter l'exploitabilité du stockage périodique de chaleur sur aquifère.

Dans le cadre de cette thèse menée en partenariat avec l'université d'Orléans (ISTO), le doctorant Frédéric Garnier a mis à profit les moyens expérimentaux de la plate-forme afin de réaliser un essai de réchauffement géothermique réel du sol.

L'essai a consisté à faire circuler le fluide (mélange eau-monopropylène-glycol) de façon continue dans la SGV coaxiale 5 tubes de 50 m, à un débit de 1,2 m³/h et à une température d'entrée de sonde de 45 °C pendant une période de 180 jours. Ces conditions expérimentales, quelque peu surréalistes au regard des modes de fonctionnement habituels, ont été dimensionnées de manière à induire une perturbation thermique significative et durable, susceptible d'atteindre le piézomètre de suivi positionné à 3 m de distance de la SGV. Un suivi qualitatif des paramètres physico-chimiques et microbiologiques a été mené sur des prélèvements périodiques d'eau souterraine au niveau de ce piézomètre. Cette thèse de doctorat s'achèvera fin 2012 et les résultats de ce suivi in-situ sur le site de la plate-forme y seront alors rendus publics.

2.1.3. Réalisation d'un test de réponse thermique sur un échangeur géothermique plan

Les résultats présentés ci-après ont fait l'objet d'une communication au CMOI [Ferdinand et al., 2010] ainsi qu'au WGC 2010 [Philippe et al., 2010].

L'expérience a consisté à injecter dans une des huit boucles de 100 m de l'échangeur horizontal (cadran « pelouse ombragée ») le fluide caloporteur à un débit constant et à maintenir une puissance thermique échangée avec le sol constante également (cf. Figure 18).

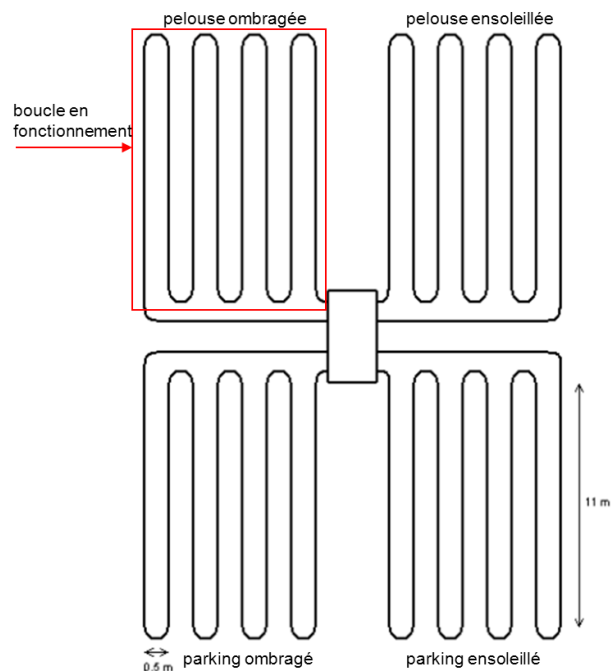


Figure 18 - Cadran de l'échangeur plan sur lequel le test a été réalisé.

Le test s'est déroulé sur 160 h (environ 6 jours) en mai. L'évolution de la température de l'air ambiant durant l'essai est donnée en Figure 19.

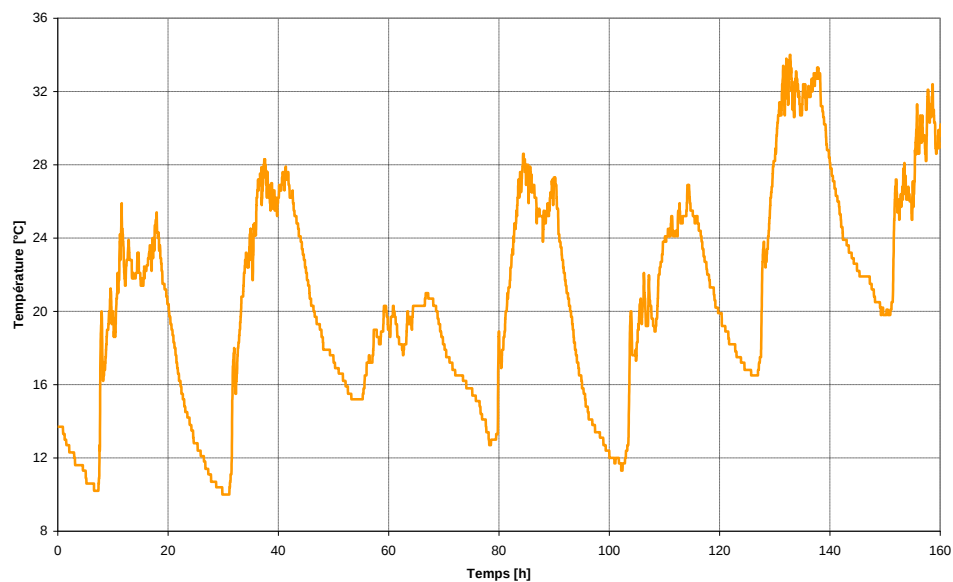


Figure 19 - Évolution de la température de l'air au cours du test de l'échangeur horizontal.

Lors de ce test, le réchauffeur est activé (la machinerie thermodynamique fonctionne en mode « été »), de la chaleur est donc cédée au sol. Le débit est fixé à 0,25 m³/h, une valeur typique de débit préconisée par les fabricants de PAC géothermiques pour des installations dimensionnées à l'échelle d'une habitation individuelle. La puissance d'échange est fixée à 20 W par mètre linéaire de tube, soit 40 W/m² de surface de terrain, ou bien encore une puissance d'échange totale de 2 kW. Il s'agit là d'une valeur typique de dimensionnement d'un échangeur horizontal pour une PAC à l'échelle de la maison individuelle, telle que préconisée par la directive allemande VDI4640 (cf. Figure 20).

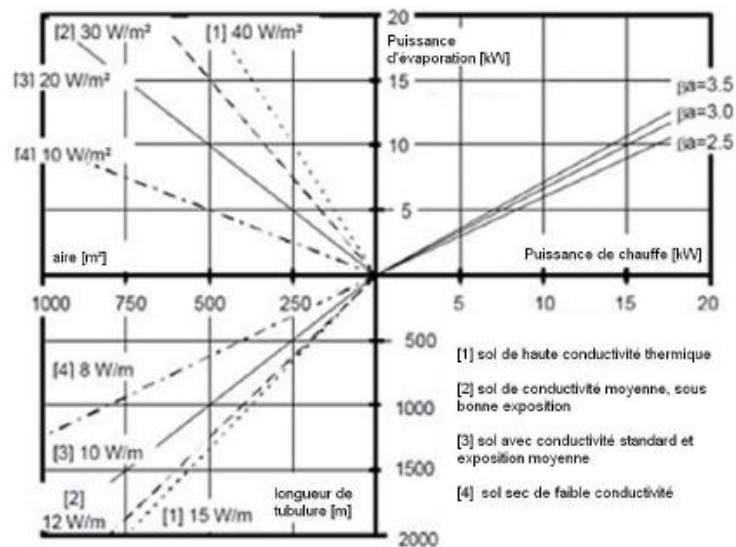


Figure 20 - Méthode de dimensionnement d'un échangeur horizontal : détermination de la longueur de la surface de l'échangeur et de l'espacement des tubes en fonction des besoins en chaleur de l'habitation, de l'efficacité de la PAC et de la conductivité thermique du sol (d'après la norme allemande VDI4640).

La puissance P cédée par le fluide au sol est reliée au débit massique de fluide $\dot{m}$ et aux températures d'entrée T_{in} et de sortie T_{out} par :

$$P = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})$$

où C_p est la capacité calorifique du mélange eau - monopropylène glycol ($C_p = 3700 \text{ J/(K.kg)}$). L'évolution de la puissance au cours du temps est tracée en Figure 21. La régulation consiste à asservir la température d'injection à la consigne en puissance connaissant le débit (constant), la température du fluide en sortie de l'échangeur étant mesurée :

$$T_{out} = \frac{P}{\dot{m} C_p} + T_{in}$$

La régulation est précise, si bien que l'écart maximal observé par rapport à la consigne de 2 kW ne dépasse pas 0,1 kW (cf. Figure 21).

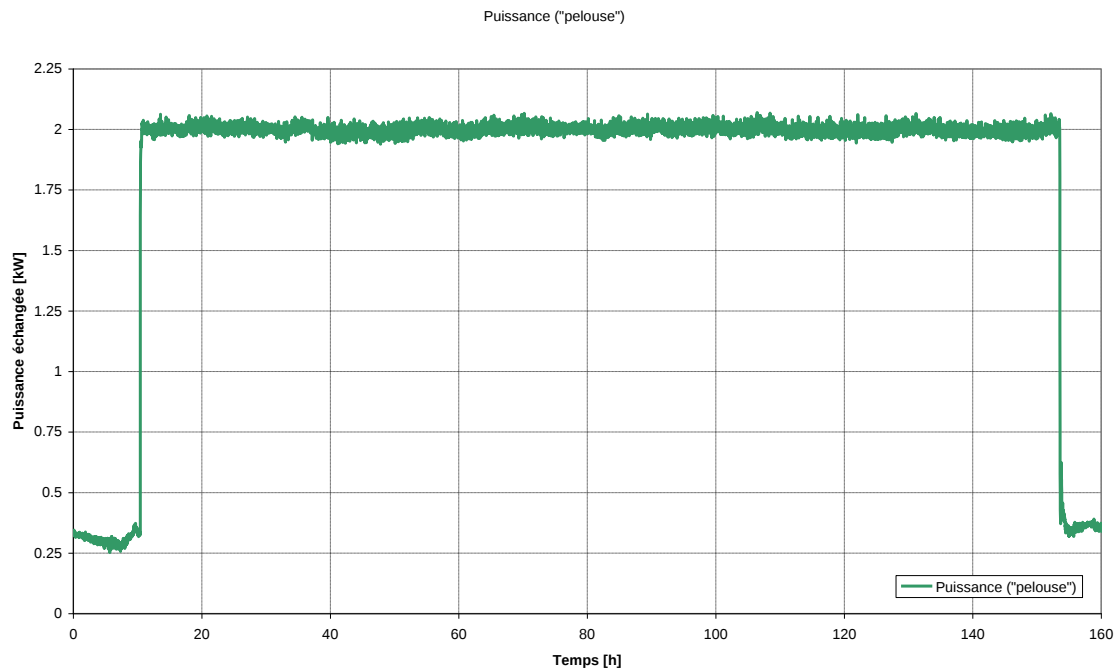


Figure 21 - Évolution de la puissance échangée en fonction du temps. La déviation observée est inférieure à 5 % de la consigne en puissance (l'injection débute à 10 h).

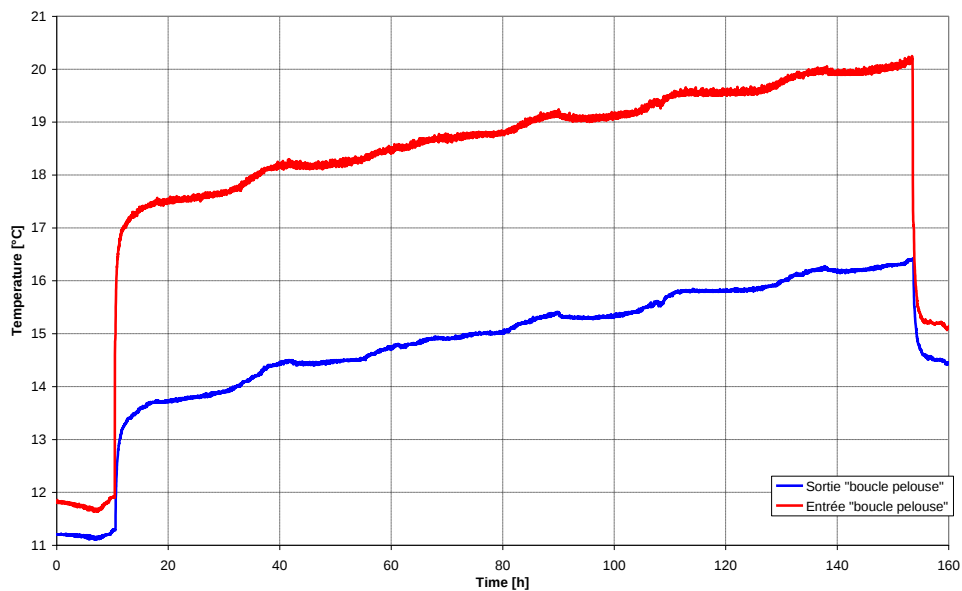


Figure 22 - Évolution des températures d'entrée et de sortie au cours du test (l'expérience débute à 10 h).

Ainsi, la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur est constante et fixée par la régulation de la machinerie thermodynamique, ce qui peut être observé en Figure 22.

Il est intéressant de remarquer que l'influence de l'évolution de la température de l'air ambiant sur la température du fluide est marginale. Seules de faibles variations journalières sont discernables. Par ailleurs, passé les dix premières heures de l'expérience, la température du fluide augmente de façon linéaire, un régime permanent s'étant mis en place.

Les températures ont été mesurées à trois profondeurs (0,5 m, 1 m et 1,50 m) par les fibres optiques tout au long de l'expérience (cf. Figure 23). Ces fibres optiques de mesure sont disposées à ces 3 profondeurs de la manière suivante : le long de l'échangeur à 1 m de profondeur ; 50 cm au-dessus en suivant le même chemin que le tube de l'échangeur et 50 cm au-dessous en suivant le même chemin que le tube de l'échangeur également.

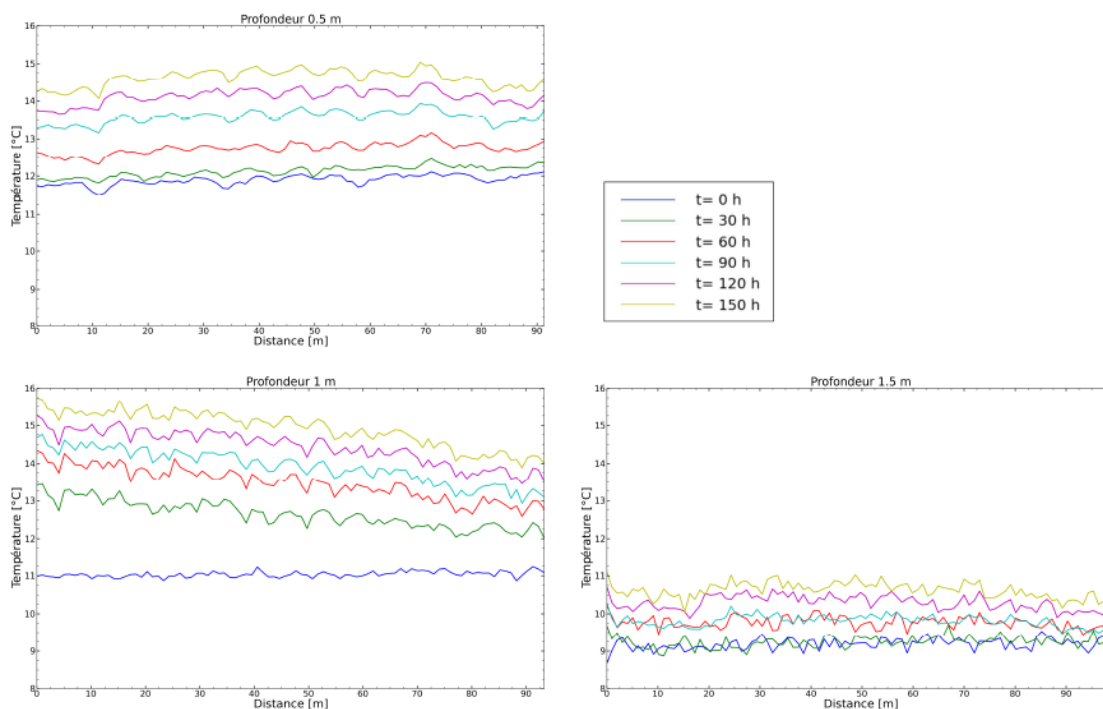


Figure 23 - Profils de température du sol autour de l'échangeur horizontal à trois profondeurs (0,5 m, 1 m, 1,5 m) relevés à différents instants de l'expérience.

Le profil obtenu à 1 m de profondeur montre l'évolution de la température du sol à proximité du tube depuis son état initial caractérisé par une température de 11 °C. Il est intéressant de noter qu'à un instant donné, la température du sol diminue le long de l'abscisse du tube ; le fluide cédant sa chaleur au sol ; la température de ce dernier diminue par conséquent au cours de son trajet. Ainsi, après 160 h de fonctionnement,

la température en paroi du tube est comprise entre 15,8 °C en entrée d'échangeur et 14 °C en sortie d'échangeur.

Par ailleurs, l'évolution de la température à 50 cm de distance du plan de l'échangeur montre un comportement différent suivant que le plan d'observation soit positionné en-dessous ou au-dessus du plan de l'échangeur. Le sol situé 50 cm sous l'échangeur semble agir comme un « puits » de chaleur, dont la température varie peu (augmentation de environ 1 °C après 160 h) en comparaison de celle du plan situé à 50 cm au-dessus de l'échangeur (augmentation de environ 3 à 4 °C après 160 h).

2.1.4. Amélioration de la régulation de la machinerie thermodynamique

Les travaux présentés ci-après constituent le projet d'un étudiant en alternance 2 ans au BRGM, élève de BTS CIRA (Contrôle Industriel et Régulation Automatique) au CFSA de l'AFTEC à Orléans.

Pour chaque boucle d'échangeur géothermique reliée à la machinerie thermodynamique, la température d'entrée de l'échangeur géothermique est ajustée par une vanne 3 voies. Un protocole d'optimisation de la régulation de température a été établi.

Le système que constituent les capteurs de température (Pt100), la vanne 3 voies et l'échangeur géothermique est traduit par un schéma bloc présenté en Figure 24.

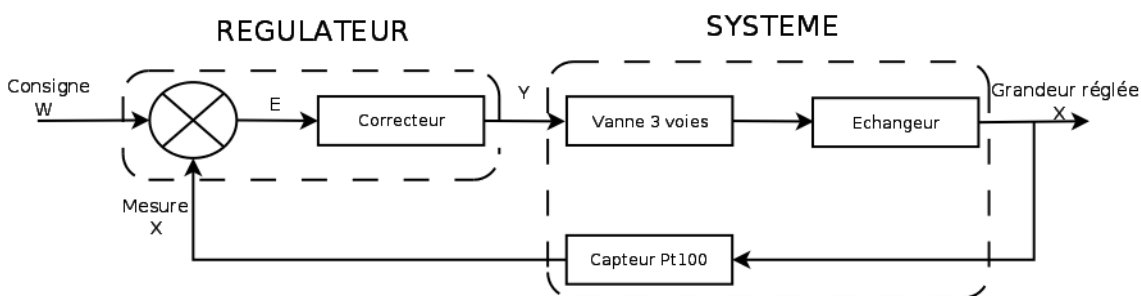


Figure 24 - Schéma bloc du système régulé.

Le système (vanne trois voies, échangeur, et Pt100) est regroupé en une seule fonction de transfert que l'on nomme par la suite $H(p)$. Le schéma bloc simplifié est donné en Figure 25. La fonction de transfert du correcteur est noté $C(p)$.

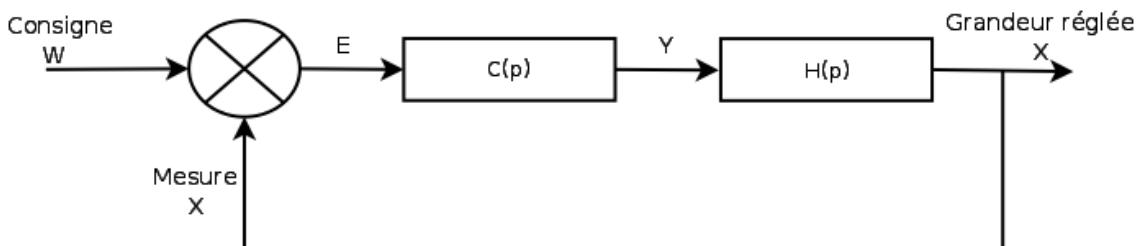


Figure 25 - Schéma bloc simplifié.

La fonction de transfert du correcteur est donnée par :

$$C(p) = G_r \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$

La fonction de transfert du système est donnée par :

$$H(p) = FTBO \frac{G_s e^{-T_0 p}}{1 + \tau \cdot p}$$

avec :

- G_r : gain du régulateur,
- FTBO : fonction de transfert en boucle ouverte (sans régulateur),
- G_s : gain du système,
- $e^{-T_0 p}$: retard de T_0 (en s ; min ; h....),
- τ : constante de temps (en s ; min ; h...),
- T_i : constante d'intégration (en s ; min ; h...).

La réponse du système à différentes sollicitations, comme le montre l'exemple de la Figure 26, a permis de corriger les valeurs de la FTBO, τ et T_i . On a aussi pu obtenir des régulations performantes, présentant une bonne précision, tout en étant stables et rapides.

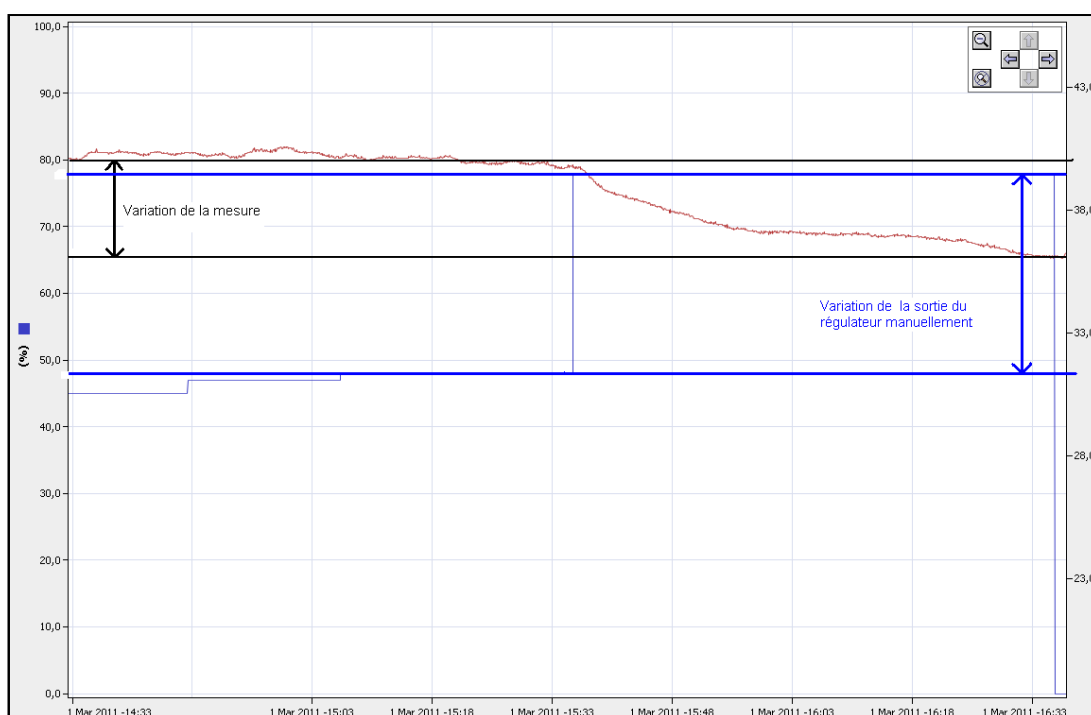


Figure 26 - Réponse du système à un échelon de 30 % pour le calcul de G_s .

2.1.5. Sécurisation du stockage des données-clés mesurées sur l'installation expérimentale

Le réseau informatique de la plateforme est constitué de plusieurs éléments connectés au réseau du BRGM via une passerelle (cf. Figure 27). Le PC central de l'installation, dit « SAX », permet de contrôler les différents ordinateurs, centrales d'acquisition, etc. de la plate-forme.

Une base de données SQL enregistre les données-clés du fonctionnement de l'installation sur le PC SAX (débit et température en entrée et sortie de chaque échangeur géothermique). Cette base de données a été dupliquée sur un autre PC de l'installation afin de garantir la sécurisation et la pérennité du stockage des données-clés mesurées sur le site.

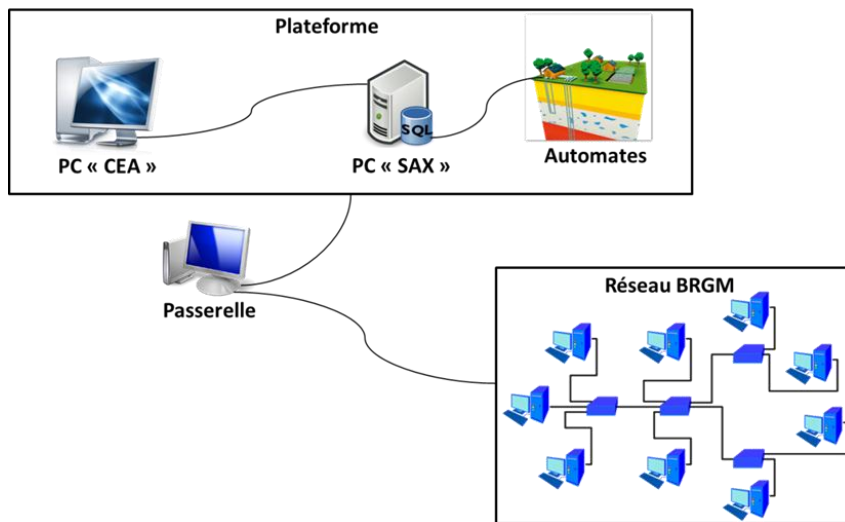


Figure 27 - Schéma de la liaison réseau entre le BRGM et la plateforme.

2.1.6. Création d'une interface de gestion dynamique des consignes

Initialement, l'interface homme-machine du système de contrôle-commande (présenté en 1.2.1., p. 10) permet d'appliquer des sollicitations simples aux échangeurs géothermiques, soit à température d'entrée constante, soit à puissance échangée constante. Bien que ces deux modes permettent d'obtenir de précieuses données expérimentales (comme démontré ci-dessus aux paragraphes 2.1.2 et 2.1.3), ils ne permettent pas de reproduire le fonctionnement d'une pompe à chaleur connectée à un bâtiment, caractérisée par une évolution rapide de la puissance échangée.

Un second mode de fonctionnement de l'interface homme-machine consiste à lire les consignes (en température d'entrée et débit) dans une base de données SQL. Le maniement de cette base de données n'étant pas optimisé pour les utilisateurs, une interface Web a été développée. Cette interface Web permet de modifier toutes les dix

secondes les consignes de l'automate. Deux modes de fonctionnement sont gérés par l'interface (cf. Figure 28) :

- soit l'utilisateur charge en début d'expérience un fichier texte contenant les consignes pour la durée de l'expérience (par exemple la puissance échangée évolue au cours du temps selon une fonction arbitraire) ;
- soit l'utilisateur charge en début d'expérience un programme dans le langage Python, qui à partir des données mesurées (par exemple la température de sortie) calcule à chaque pas de temps les consignes.

Figure 28 - Formulaire dynamique en JavaScript de l'envoi de consignes : chargement d'un fichier de consignes déjà calculées (gauche) ou d'un programme Python pour le calcul des consignes à chaque pas de temps (droite).

Cet outil mis au point permet d'émuler le comportement d'une pompe à chaleur répondant aux besoins de chauffage ou de rafraîchissement d'un bâtiment et de reproduire son interaction avec les échangeurs géothermiques réels de la plate-forme. Des cycles réels de fonctionnement de diverses pompes à chaleur connectées à divers types de bâtiments peuvent ainsi être simulés sur la plate-forme, aux bornes des échangeurs géothermiques.

2.2. AXE 2 : DESCRIPTION ET MODÉLISATION

En parallèle à l'expérimentation sur la plate-forme, le BRGM a développé ses compétences dans le domaine de la modélisation des échangeurs souterrains et de leur couplage avec les installations de surface.

Nous présentons ci-après quelques résultats des travaux de recherche correspondants.

2.2.1. Modélisation dynamique d'une pompe à chaleur sur échangeur horizontal

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat obtenue en octobre 2010 dont l'intitulé est le suivant : « Développement et validation expérimentale de modèles

d'échangeurs géothermiques horizontaux et verticaux pour le chauffage de bâtiments résidentiels » [Philippe, 2010].

Dans le cadre de cette thèse, un essai de validation d'une modélisation dynamique d'un échangeur horizontal a été réalisé en maintenant durant 80 h une circulation de fluide à débit constant ($0,77 \text{ m}^3/\text{h}$) et à température d'injection constante (40°C).

Un graphe représentant l'évolution des températures de fluide calculée par le modèle et mesurée durant l'expérience en fonction de la température imposée en entrée est présenté en Figure 29 et confirme la bonne prédiction du modèle, notamment après les premières heures de fonctionnement.

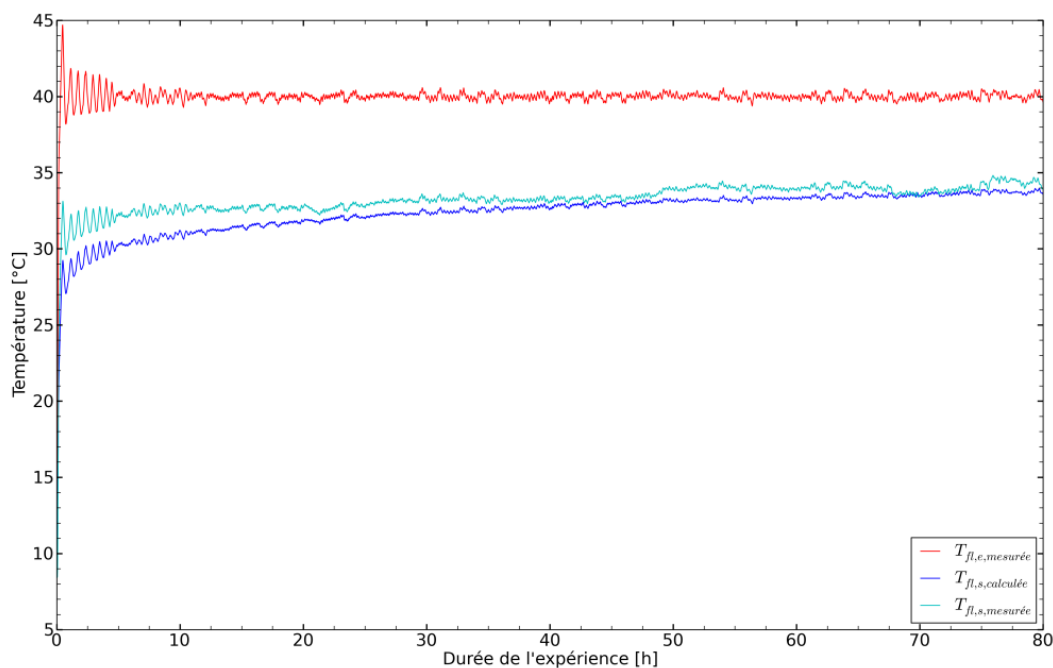


Figure 29 - Évolution des températures en entrée/sortie d'échangeur géothermique horizontal et comparaison avec la température de sortie prédite par la modélisation.

2.2.2. Modélisation de la température à la surface du sol

Les travaux présentés ci-après constituent le travail d'un étudiant en stage 4 mois au BRGM, élève de 2^{ème} année de l'ENSIP (École Nationale Supérieure d'Ingénieur de Poitiers).

Un des paramètres clés de ces modélisations énergétiques d'échangeurs souterrains, en particulier ceux placés dans les premiers mètres de sol (par exemple échangeurs plans ou compacts) est la température à la surface du sol.

L'objectif était de proposer une méthode de calcul de la température de surface en fonction du type de sol rencontré et des données climatiques propres à chaque site. Un

modèle permettant d'établir un bilan d'énergie et de matière à la surface du sol a été développé, puis validé expérimentalement grâce à l'infrastructure de la plateforme.

Les échanges thermiques à la surface du sol font intervenir différents phénomènes physiques. Le modèle développé prend en compte les flux suivants (cf. Figure 30) :

- $\Phi_{\text{rad reçu}}$: Flux thermique radiatif reçu du soleil par la surface du sol ;
- $\Phi_{\text{rad émis}}$: Flux thermique radiatif net échangé avec le ciel ;
- Φ_{conv} : Flux thermique convectif sensible reçu par la surface du sol ;
- Φ_{cond} : Flux thermique conductif dans le sol ;
- Φ_{evap} : Flux thermique dû à l'évapotranspiration.

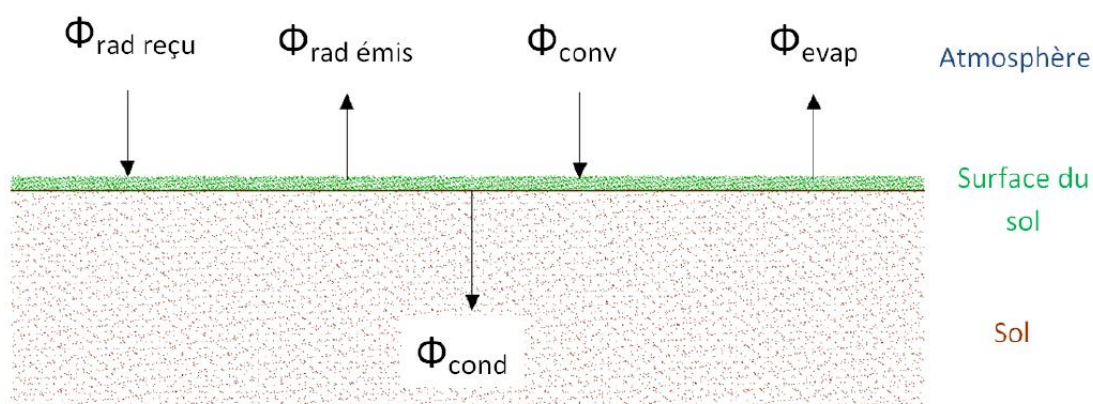


Figure 30 - Bilan des flux thermiques à la surface du sol.

Le modèle numérique développé peut être alimenté par des fichiers météo et/ou des données expérimentales. Il prend en compte les différents flux décrits ci-dessus. L'algorithme du programme est présenté en Figure 31.

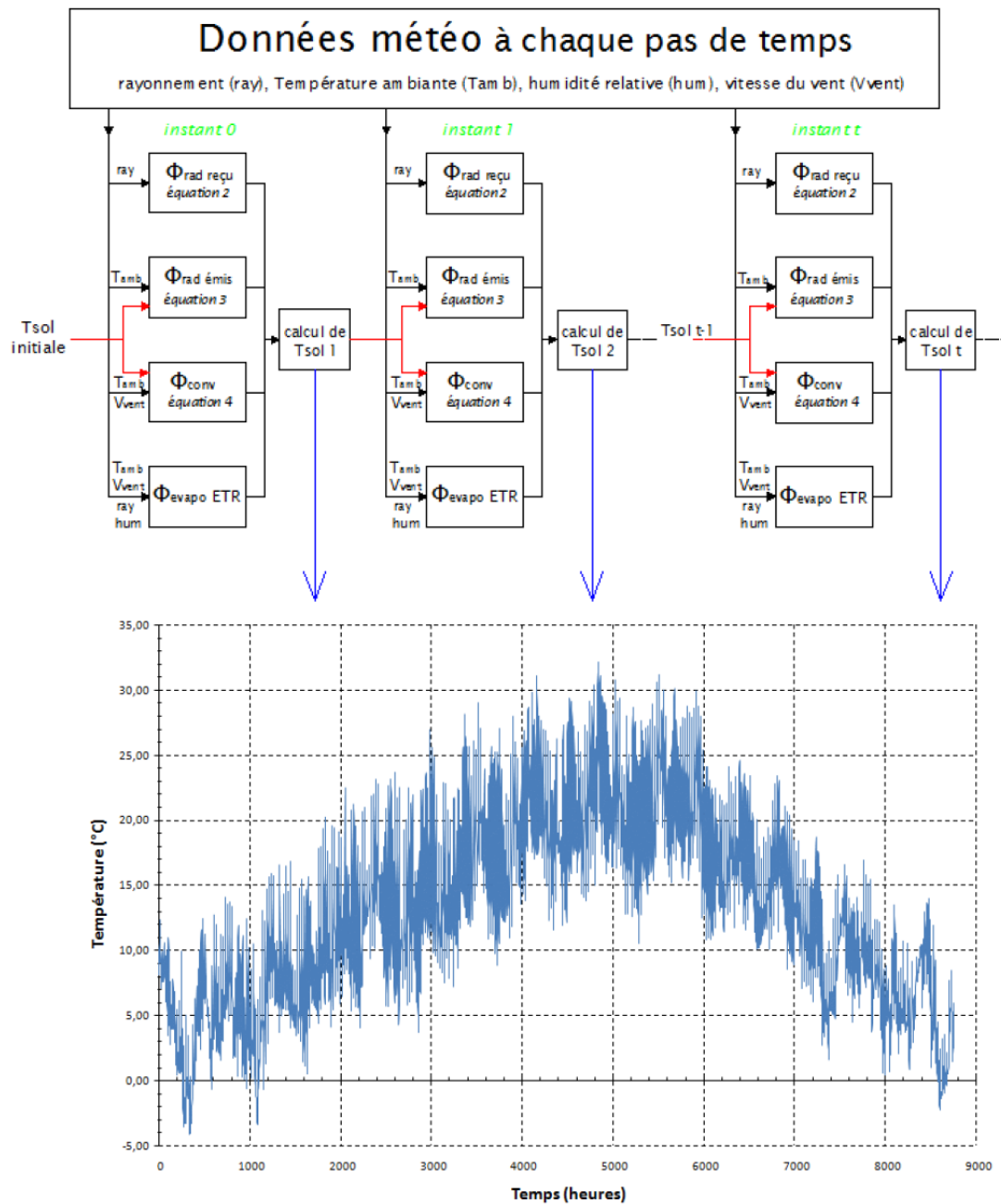


Figure 31 - Synoptique de la modélisation de l'évolution de la température du sol en fonction des données météorologiques.

Les résultats expérimentaux et du modèle sont présentés en Figure 32, sur une période de 11 jours. Après une période d'initialisation du modèle de 60 h environ, les deux températures sont proches l'une de l'autre voire confondues, ce qui permet de valider expérimentalement le modèle.

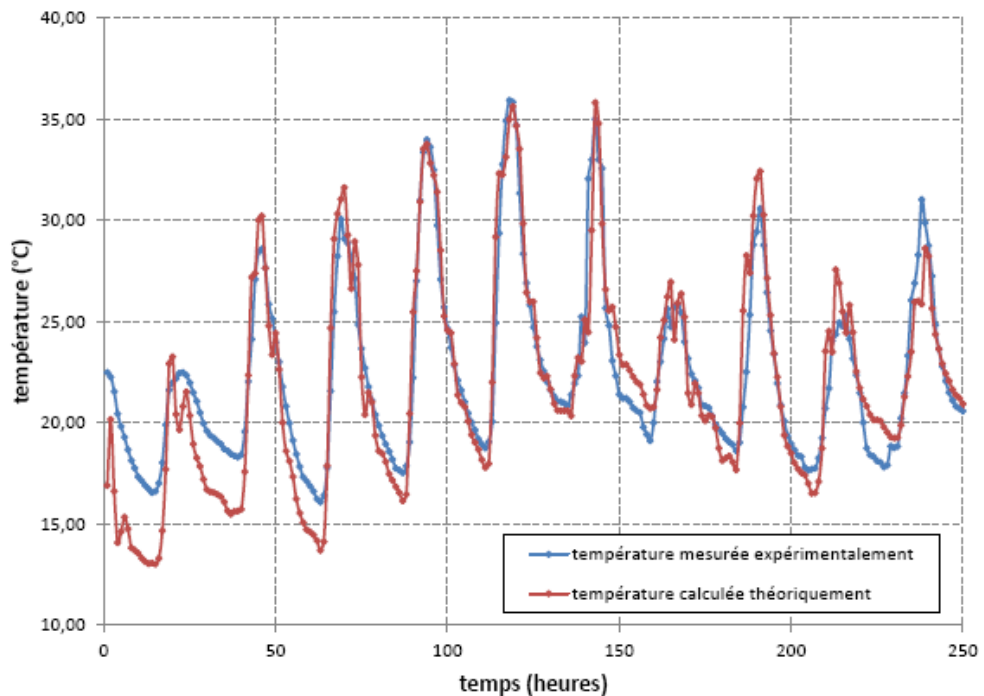


Figure 32 - Température à la surface du sol calculée et mesurée.

2.2.3. Modélisation fine de la géométrie des échangeurs géothermiques

Plusieurs modèles numériques d'échangeurs géothermiques ont été développés dans l'environnement de modélisation physique COMSOL-Multiphysics.

Nous présentons ci-dessous quelques résultats de la modélisation d'un test de réponse thermique (TRT) sur un échangeur géothermique vertical.

Le TRT consiste à faire circuler en boucle fermée à débit constant $\dot{m}$ un fluide caloporteur (généralement de l'eau) auquel une puissance constante P est cédée, par exemple par un réchauffeur électrique. L'écart de température est donc constant entre l'entrée et la sortie de la SGV. L'interprétation de l'évolution de la température du fluide permet d'obtenir des informations sur la température initiale du sol, sa conductivité thermique et la résistance thermique du forage considéré. Les valeurs de ces trois paramètres impactent fortement le dimensionnement d'un champ de SGV, la détermination *in-situ* de ces paramètres permet ainsi de dimensionner au plus juste l'installation.

La puissance cédée par le fluide P au sol est liée au débit massique de fluide $\dot{m}$ et aux températures d'entrée T_{in} et de sortie T_{out} par :

$$P = \dot{m} C_{p,fl} (T_{out} - T_{in})$$

où $C_{p,fl}$ est la capacité calorifique du fluide caloporteur.

L'évolution temporelle de la température en chaque point du sol et du matériau de remplissage de la sonde est décrite par l'équation de la chaleur :

$$\Delta T_s = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_s}{\partial t}$$

L'équation de la chaleur fait intervenir deux propriétés thermophysiques du matériau : la conductivité thermique, notée λ , exprimée en W/(K.m), et la capacité calorifique volumique, produit de la chaleur spécifique du matériau (J/(K.kg)) et de sa masse volumique ρ (kg/m³), notée ρC_p (J/(K.m³)). On introduit alors la *diffusivité thermique*, notée α (m²/s), comme le rapport de la conductivité thermique à la capacité calorifique volumique :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

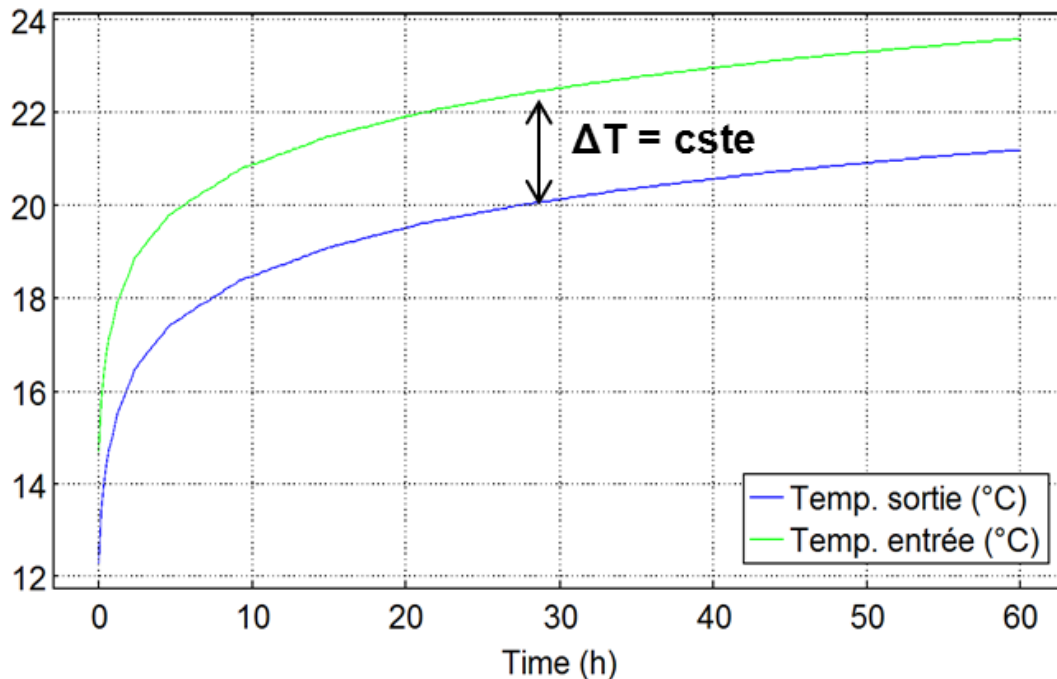


Figure 33 - Évolution temporelle des températures d'entrée et de sortie d'échangeur géothermique sur les 60 h du TRT modélisé.

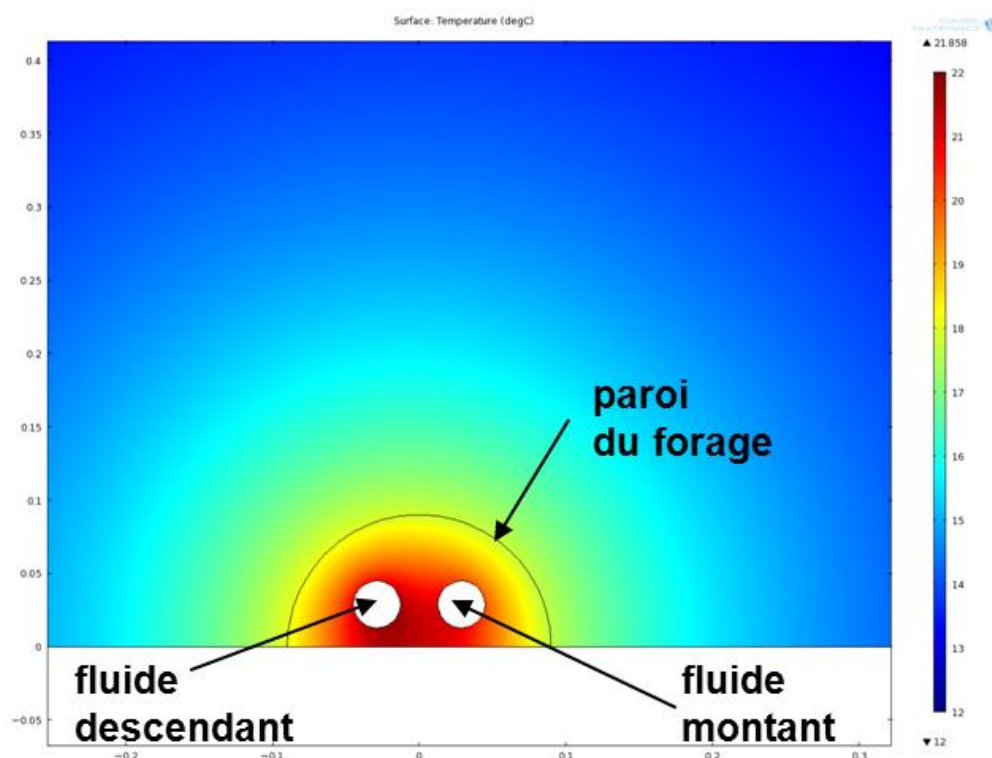


Figure 34 - Champ de température autour d'une SGV de diamètre 18 cm, suite aux 60 h de sollicitation d'un TRT.

2.3. AXE 3 : CONTRIBUTION À DES DÉVELOPPEMENTS INNOVANTS

2.3.1. Thèses engagées

Deux thèses de doctorat ont été initiées suite à la mise en œuvre de la plate-forme Géothermie :

- « Développement et validation expérimentale de modèles d'échangeurs géothermiques horizontaux et verticaux pour le chauffage de bâtiments résidentiels » : thèse soutenue le 19 octobre 2010 ;
- « Qualification, quantification et inhibition des phénomènes physicochimiques et microbiologiques pouvant impacter l'exploitabilité du stockage périodique de chaleur sur aquifère » : soutenance de thèse prévue fin 2012.

2.3.2. Projet ANR ECLIPSE

Les expérimentations réalisées dans le cadre du projet ANR ECLIPSE s'appuient sur l'infrastructure de la plate-forme de recherche sur les échangeurs enterrés des pompes à chaleur du BRGM, cofinancée par la région Centre et les Fonds FEDER.

Le projet ANR ECLIPSE (= Echangeur géothermique Compact pour le Logement Individuel et Performance du Système Energétique associé) est le nom d'un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche et dont l'objectif est l'amélioration des systèmes géothermiques compacts pour le logement individuel.

Les échangeurs géothermiques appelés « compacts » sont constitués d'un tuyau enroulé sous la forme d'un ressort et sont enterrés à une profondeur de quelques mètres à une dizaine de mètres. La partie du projet concernant plus spécifiquement le BRGM et sa plate-forme de test avait pour but d'étudier le comportement thermique des corbeilles géothermiques et d'évaluer leurs performances en termes d'échange de chaleur avec le sol dans différentes configurations d'implantation, notamment la possibilité de relier les corbeilles en série ou en parallèle. L'influence de leur profondeur d'enfouissement et du matériau du tuyau a été également évaluée. Sept corbeilles géothermiques ont ainsi été implantées sur le site du BRGM. En complément de ces mesures, un modèle simplifié de corbeille géothermique a été développé et a été validé par des mesures expérimentales sur une des corbeilles.

2.4. AXE 4 : ENGAGEMENTS DE PARTENARIATS

2.4.1. Engagements de partenariats avec d'autres centres de R&D en France

Des partenariats ont notamment été établis avec les centres de recherche suivants :

- CSTB ;
- CEA-INES ;
- EDF R&D ;
- CETIAT ;
- CEP ARMINES.

Projet Micro-GEO (FUI 2012-2015)

Ce projet porté par CIAT a été proposé au 13^{ème} appel à projets FUI de novembre 2011 et vise à développer une solution « PAC géothermique » pour l'habitat individuel neuf (conforme à la RT 2012), raccordée et installée pour 10 000 € TTC. Les partenaires de ce projet sont les suivants : CIAT, EDF, CETIAT, PROXISERVE, BRGM, RYB-Terra et CEA-INES. Ce projet, labellisé par les pôles de compétitivité S2E2 et Tenerrdis, a été retenu et est donc financé par le FUI depuis le 1^{er} juillet 2012, date de lancement du projet.

Dans le cadre de ce projet, des essais sont programmés sur la plate-forme Géothermie du BRGM afin de mettre au point des nouveaux types d'échangeurs géothermiques compacts en collaboration avec le fabricant RYB-Terra, partenaire du projet.

Projets soumis à AAP, non sélectionnés

- GISELE (ANR-SEED 2010) et GISELE² (ANR-SEED 2011) ;
- CALDERA (ANR-BVD 2011) ;
- PERFPAC3G (ANR SEED 2011).

**2.4.2. Contribution à la mise en place de compétences en Région
Centre : formation de DUT Génie Thermique et Énergétique à
orientation Géothermie**

Le DUT GTE de l'IUT d'Orléans a fait l'objet d'une adaptation locale tournée vers la géothermie (2^{nde} année de formation, dès septembre 2011) : l'ensemble de la promotion (environ 30 étudiants) suit des enseignements (cours, TD et TP) dédiés à la géothermie pour environ 10 % du temps d'enseignement (60 h en 2011/2012). Le BRGM met à contribution ses compétences pour définir avec l'équipe pédagogique le programme et la conception de dispositifs expérimentaux. Des agents du BRGM donnent des cours à titre personnel (cf. tableau des enseignements ci-après). Des séances de travaux pratiques sont menées sur les neuf corbeilles (REHAU) installées et raccordées sur le site de l'IUT (mai 2011).

Société	sujet	Nombre heures
BRGM	Introduction à la géologie et à l'hydrogéologie	4
BRGM	Présentation DES GéothermieS : De la haute à la très basse enthalpie	2
REHAU	Gestion de projets de géothermie par pompe à chaleur	4
REHAU	Technologies d'échangeurs GTH : produits sur le marché	2
BRGM	Réglementations, normalisations et démarches qualité	2
BRGM	Dimensionnement pour l'individuel de SGV à partir d'abaques	4
	Technologies des PAC	2
EDF	Instrumentation d'opérations et retour d'expérience	2
BRGM	Introduction au dimensionnement de grandes installations de SGV	4
REHAU	Asservissement, régulation	4
IUT	Intro. aux écoulements dans milieux poreux	4
BRGM	Conception de PAC sur aquifère	6
BRGM	TP : Dimensionnement d'un champ de SGV	8
IUT	TP : Échangeurs ; Puits canadien - VMC double flux ; Corbeilles géothermiques - PAC	12

*Tableau 1 - Programme pédagogique de l'orientation « géothermie »
du DUT GTE de l'IUT d'Orléans.*

2.4.3. Engagements de partenariats avec d'autres centres de R&D à l'étranger

Institut Fraunhofer für Bauphysik (IBP)

Une délégation du BRGM s'est rendue en février 2010 à l'IBP à Kassel et y a rencontré Dr. Dietrich Schmidt, Directeur du groupe de recherche sur les systèmes énergétiques de l'IBP.

Le Dr. Schmidt y a exposé les travaux de l'IBP en termes d'analyse exergétique de la consommation des bâtiments. Le BRGM y a exposé ses travaux de recherche en géothermie basse et très basse énergie.

École Polytechnique de Montréal

Deux séjours de 2 à 3 mois chacun ont été effectués en 2009 et 2010-2011 à l'Ecole Polytechnique de Montréal par un agent du BRGM et ont permis notamment l'écriture de deux publications en revue à comité de lecture en co-auteurs avec Michel Bernier, professeur mondial reconnu, spécialiste de l'étude des systèmes géothermiques de faible profondeur. Cette collaboration avec ce professeur pourrait déboucher sur le co-encadrement d'une thèse de doctorat ou d'un travail de post-doctorat mettant en œuvre notamment les moyens expérimentaux de la plate-forme expérimentale du BRGM.

2.5. AXE 5 : COMMUNICATION ET ÉVÈNEMENTIEL

Les communications écrites du BRGM faisant référence à sa plate-forme Géothermie et réalisées dans le courant de tranche 2 du projet sont répertoriées en chapitre 4.

La mise au point de support de communications, l'organisation de visites de la plate-forme et la participation à des actions de formation sont détaillées dans les parties suivantes.

2.5.1. Organisation des moyens pédagogiques à l'usage des visiteurs de la plate-forme

Huit posters ont été réalisés dans le cadre de la tranche 2 du projet, ceux-ci permettent de proposer un complément d'informations aux visiteurs de la plate-forme et sont également utilisés pour communiquer sur le projet Plate-Forme à l'extérieur du BRGM. Un film d'animation de 2min35s a également été monté et présente la plate-forme de manière didactique, adaptée au grand public. Ce film a été mis en ligne par le BRGM et est consultable sur l'espace brgmTV à l'adresse suivante : <http://www.youtube.com/user/brgmTV> (page consultée le 25/09/2012).

2.5.2. Mise à contribution de la plate-forme pour des actions de formation et d'information

Visites de la PF

Durant la période 2010-2011, 68 visites de la plate-forme Géothermie ont été organisées. Cela représente un total d'environ 570 visiteurs. Les visiteurs sont de catégories variées comme en atteste le camembert de la présentant leur répartition.

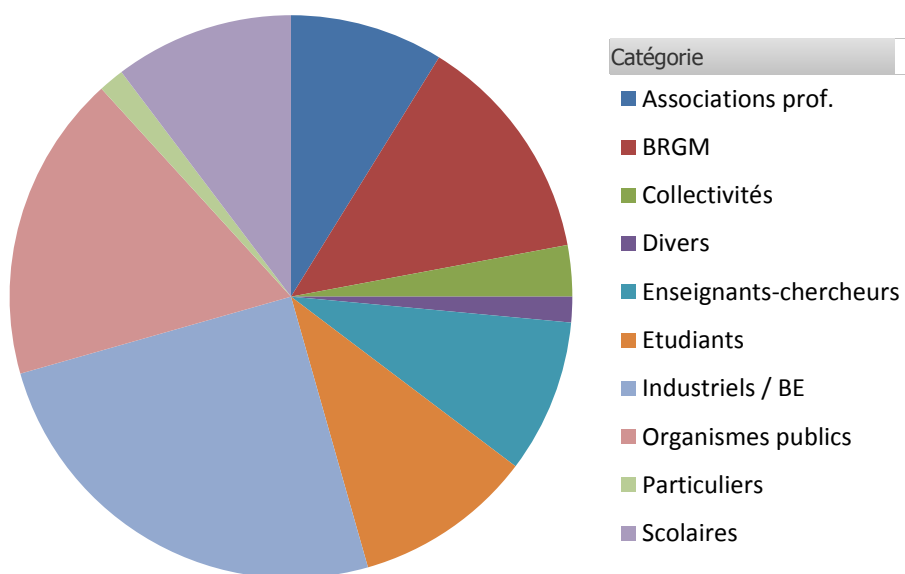


Figure 35 - Répartition des visiteurs de la plate-forme par catégories sur la période 2010-2011.

Parmi les visites les plus marquantes sur la période 2010-2011, on note en particulier la visite conjointe du président et du préfet de la région Centre, M. François Bonneau et M. Gérard Moisselin, le 18 mai 2010 et également la visite de M. René Ricol, commissaire général à l'investissement le 30 mars 2011.

Stages en formation initiale s'appuyant sur l'infrastructure de la plate-forme

Plusieurs étudiants ont effectué en 2010-2011 un stage de deux mois au minimum s'appuyant sur la plate-forme. Les stages recouvrent un large panel de domaines (cf. Tableau 2) :

- Métrologie ;
- Modélisation énergétique ;
- Expérimentation sur l'infrastructure de recherche ;
- Informatique, interfaçage Homme/machine.

Année	Formation	Durée du stage	Intitulé du stage
2010	Institut Galilée Université Paris XIII Master 1 Physique-Chimie pour l'Ingénierie	2 mois	Assistance à la mise en service d'une expérimentation sur des échangeurs géothermiques novateurs
2010	École Nationale Supérieure d'Ingénieur de Poitiers Spécialité Énergétique Stage d'élève ingénieur	3 mois	Élaboration et validation expérimentale d'un modèle de calcul de la température à la surface du sol en fonction des données climatiques
2011	INSA Strasbourg Spécialité Énergétique Stage d'élève ingénieur	6 mois	Étude du comportement thermique d'un échangeur géothermique compact de type corbeille
2011	IUT Orléans DUT Informatique 2 ^{ème} année Stage de fin d'étude	2 mois	Développement d'une base de données SQL interfaçant des expérimentations

Tableau 2 - Stages en formation initiale s'appuyant sur l'infrastructure de la plateforme (2010 – 2011).

3. Conclusions et perspectives

La tranche 2 du projet Plate-Forme a permis d'obtenir de premières avancées scientifiques importantes sur la connaissance des échangeurs géothermiques superficiels en boucles fermées. Ce projet a permis notamment d'initier deux thèses de doctorat dont l'une a été soutenue en octobre 2010 et la seconde pour laquelle la soutenance est prévue pour fin 2012. Par ailleurs, les moyens expérimentaux de la plate-forme ont permis au BRGM de participer en tant que coordinateur ou partenaire au montage de multiples projets collaboratifs. On note en particulier la participation au projet FUI Micro-Géo dont le montage a été déposé en novembre 2011 et qui suite à acceptation, a effectivement débuté en juillet 2012.

La plate-forme a également tenu un rôle important dans la diffusion et la communication au grand public, notamment en Région Centre avec l'organisation de nombreuses visites pour des publics très variés. L'acquisition de connaissances liée à la plate-forme a permis au BRGM de s'investir dans la formation locale sur le sujet des pompes à chaleur géothermiques, notamment dans le cadre d'un partenariat mis en place avec l'IUT d'Orléans.

La tranche 3 visera à poursuivre et développer la valorisation de la plate-forme suivant ces 2 axes principaux, à savoir l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques et la communication sur ces techniques auprès d'un public le plus large possible.

4. Publications et communications scientifiques autour du projet Plate-Forme – tranche 2 (2010-2011)

Articles en revues à comité de lecture

Philippe M., Bernier M., Marchio D. (2010) - "Sizing calculation spreadsheet - Vertical Geothermal Borefields". *ASHRAE Journal*, 52(7): p. 20-28.

Philippe M., Bernier M., Marchio D., Lopez S. (2011) - "A semi-analytical model for serpentine horizontal ground heat exchangers". *HVAC&R Research Journal*, 17(6): p. 1044-1058.

Proceedings de conférence

Philippe M., Marchio D., Lesueur H., Vrain A. (2010) - An evaluation of ground thermal properties measure accuracy by thermal response test of horizontal ground heat exchangers. World Geothermal Congress 2010. April, 25-29 2010. Bali, Indonesia.

Giuseffi M., Ferdinand P., Vrain A., Philippe M., Lesueur H. (2010) - Raman Distributed Temperature Sensing in underground GeoExchange System. EWOFS, 4th European Workshop on Optical Fibre Sensors. September, 8-10 2010. Porto, Portugal.

Philippe M., Bernier M., Marchio M., Lesueur H. (2011) - Experimental validation of a serpentine horizontal ground heat exchanger model. European Geosciences Union General Assembly. April, 4-8 2011. Vienna, Austria.

Garnier F. (2011) - Aquifer bioremediation using heat pumps : sound theoretical basis and results on thermal, geochemical and biological impacts on aquifers. 5th European Bioremediation Conference. July, 5 2011. Chania, Crete, Greece.

Communications en colloque

Ferdinand P., Giuseffi M., Maragna C., Philippe M., Lesueur H. (2010) - Mesures réparties par effet Raman dans les fibres optiques pour l'acquisition de températures le long d'échangeurs géothermiques de pompes à chaleur. Colloque 2010 CMOI (Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie). 15-19 novembre 2010. Toulouse, France.

Vrain A. (2011) - Étude de capteurs géothermiques compacts. Colloque du pôle Cristal « Froid industriel et commercial. Bâtiment économe en énergie ». 6-7 octobre 2011. Dinan, France.

Articles en revue professionnelle

Desplan A., Lesueur H. (2010) - Plate-forme expérimentale pour les échangeurs souterrains des pompes à chaleur. CVC – *La revue des climaticiens*, n° 864. Mai/Juin 2010.

Philippe M., Vrain A., Lesueur H. (2011) - Un test de réponse thermique pour les échangeurs horizontaux. CVC – *La revue des climaticiens*, n° 869. Mai/Juin 2011.

Annexe 1

Posters créés dans le cadre de la tranche 2 du projet Plate-Forme PAC

Plate-forme expérimentale pour les échangeurs géothermiques des pompes à chaleur

Mise en place des installations

> L'ÉCHANGEUR HORIZONTAL DE RÉFÉRENCE

Vue en coupe de l'échangeur horizontal et de la métrologie optique

Pose du puits canadien ceinturant le niveau -1.5m

Recouvrement du niveau -1.5m

Aménagement du niveau 0m

Pose de l'échangeur géothermique au niveau -1.0m

> L'ÉCHANGEUR COMPACT NOVATEUR

Réalisation d'un échangeur compact en cuivre

Mise en place des échangeurs compacts à la tarière

Echangeur compact avant installation

> L'ÉCHANGEUR VERTICAL DE RÉFÉRENCE

Doublet à 100m (diamètre 3m)
Doublet à 50m (diamètre 3m)
Chemin 3m

Réalisation des forages

Sonde en place dans le forage

Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en région Centre avec le Fonds européen de développement régional

Région Centre

brgm
www.brgm.fr



L'OBJECTIF

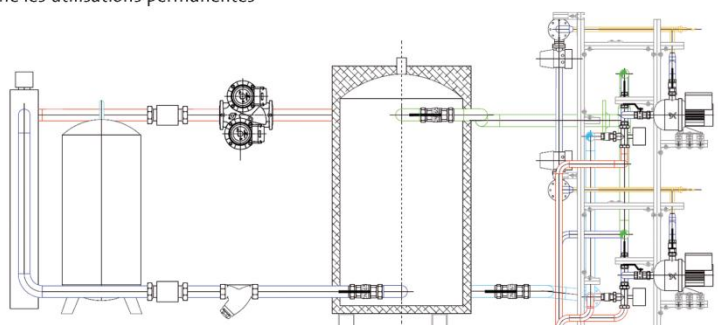
Reproduire les comportements de toute pompe à chaleur et de tout bâtiment

- > Les pompes à chaleur actuelles comme celles qui ne sont encore que sur le papier
- > Les bâtiments neufs super isolés comme les bâtiments anciens, rénovés ou non
- > Les utilisations occasionnelles comme les utilisations permanentes
- > Les contextes climatiques sévères comme ceux plus cléments
- > La fourniture du chaud comme celle du froid ou du frais.

La machinerie est conçue selon des règles industrielles pour garantir la disponibilité des équipements.

Cette démarche facilite l'accueil d'expérimentations conçues et pilotées par les industriels eux-mêmes :

- > Pompe à chaleur
- > Dispositif de régulation
- > ...



Le dispositif thermodynamique peut reproduire les comportements de toutes les pompes à chaleur existante ou en projet chez les constructeurs.

Il permet d'explorer les limites des plages usuelles de températures :

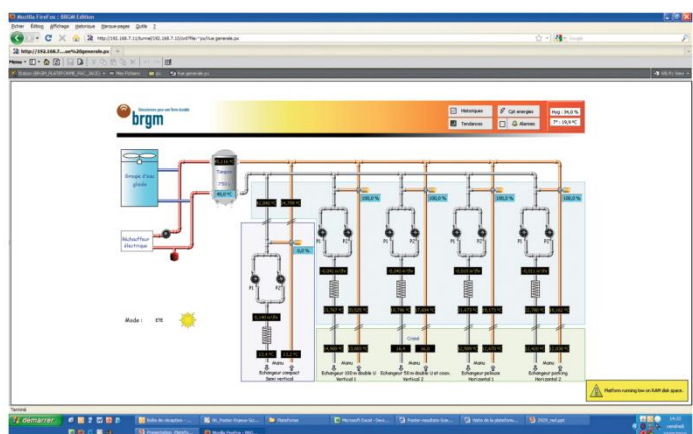
- > Du côté froid, jusqu'à -10°C
- > Du côté chaud, jusqu'à +40°C

A la mise en service, cinq échangeurs pourront être étudiés simultanément :

- > Deux échangeurs horizontaux
- > Deux échangeurs verticaux
- > Un échangeur compact

La puissance nominale d'un échangeur est de 5 kW.

L'automatisme permet un ajustement des consignes de régulation toutes les 15 secondes.



LA SOLUTION

Une machinerie centralisée ...

- > Groupe froid centralisé de 60 kW thermiques
- > Groupe réchauffeur centralisé de 45 kW thermiques
- > Capacité tampon de 750 litres
- > Un automate de qualité industrielle avec interface WEB
- > Programmation Objet en JAVA
- > Des vues & graphiques accessibles par le WEB

... et 5 circuits secondaires pour 5 expérimentations

- > Pompes de circulations sur variateur
- > Vanne 3 voies de recirculation
- > Élément chauffant de 3 kW régulé
- > Régulation du débit et des températures



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en région Centre avec le Fonds européen de développement régional.



Plate-forme expérimentale pour les échangeurs géothermiques des pompes à chaleur



Une métrologie novatrice

EN PRIORITÉ

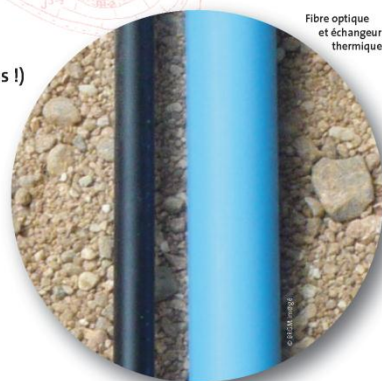
Mesurer les températures dans les sols

- > Des mesures précises en très grande quantité
- > Ne pas perturber les sols avec le dispositif de mesure et ses câbles de liaison
- > Résister aussi longtemps que les échangeurs géothermiques (jusqu'à 100 ans !)
- > Convenir aussi bien en surface qu'à 200 m de profondeur

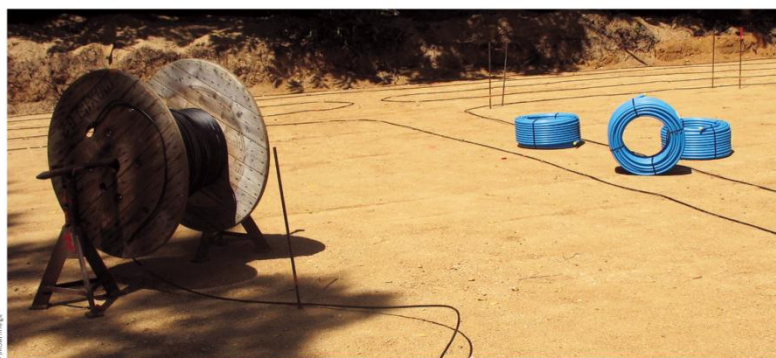
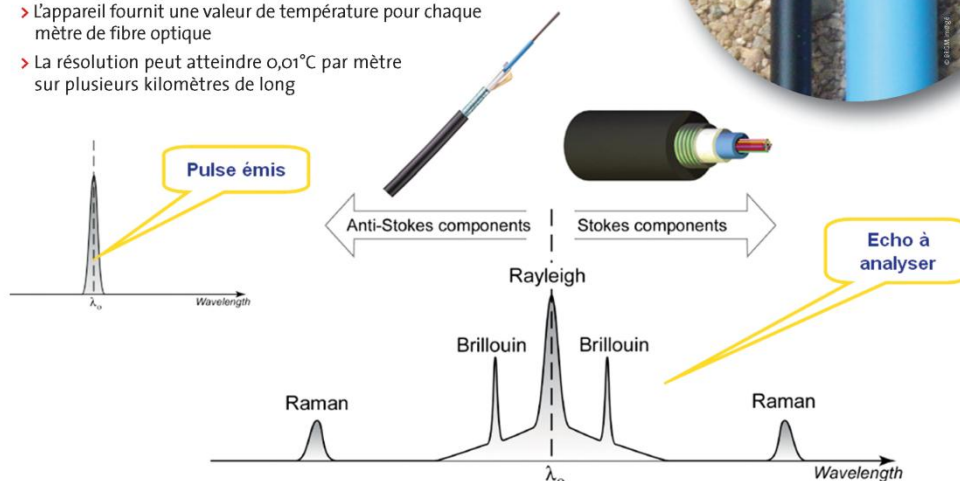
LA SOLUTION

Des fibres optiques comme élément sensible

- > Un pulse Laser est émis dans une fibre optique en verre (silice)
- > L'écho réceptionné est accompagné de diverses raies "parasites", en particulier les raies "Raman" qui ne dépendent que de la température
- > L'appareil fournit une valeur de température pour chaque mètre de fibre optique
- > La résolution peut atteindre 0,01°C par mètre sur plusieurs kilomètres de long



Fibre optique et échangeur thermique



La mise en place des fibres optiques le long des tuyaux de l'échangeur horizontal

- > Plusieurs kilomètres de câbles optiques déployés sur la Plate-forme
- > Trois profondeurs instrumentées : -1.5m, -1.0m et -0.5m
- > La précision de la localisation : quelques centimètres en 3D



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en région Centre avec le Fonds européen de développement régional.





➤ COMMENT FONCTIONNE-T-IL ?

➤ QUELLES SONT SES LIMITES ?

Depuis que sont apparus les premiers échangeurs géothermiques, il y a déjà quelques décennies, les scientifiques peinent à suivre le rythme des innovations régulièrement proposées sur ce marché :

- Echangeurs horizontaux sous jardin, allée ou parking
- Echangeurs compacts de quelques mètres de profondeurs
- Sondes géothermiques à plus de 100 m de profondeur
- Echangeurs en rivières, lacs, nappes phréatiques
- Fondations échangeuses de chaleur
- Champs de sondes géothermiques

Ce sera le rôle de la Plate-forme de caractériser et d'exploiter des échangeurs de référence parfaitement maîtrisées et à partir desquelles viendront s'étalonner les dernières nouveautés.



Pose de l'échangeur instrumenté de la plate-forme BRGM

➤ DES SOLUTIONS TECHNIQUES TRÈS VARIÉES

➤ DES USAGES DE PLUS EN PLUS DIVERSIFIÉS

Certaines des solutions du marché assurent déjà des usages complexes et multiples :

- Chauffage hivernal
- Rafraîchissement en demi-saison
- Climatisation estivale
- Stockage saisonnier de l'excédent d'énergie solaire

Les puissances des échangeurs associés à un pavillon restent de quelques kilowatts mais certaines réalisations revendiquent maintenant des puissances qui se comptent en mégawatts... de quoi chauffer ou refroidir un petit quartier !

La Plate-forme accueillera des échangeurs expérimentaux et novateurs dans des conditions d'utilisation complexes ; y compris celles qui n'existent encore que sur le papier.



Plate-forme expérimentale pour les échangeurs géothermiques des pompes à chaleur

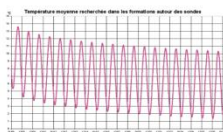


Les enjeux pour la filière

L'OBJECTIF

Contribuer à dynamiser la filière

- > Produire les paramètres de choix des solutions et de dimensionnement
- > Contribuer à la formation des futurs professionnels et des donneurs d'ordre
- > Faciliter l'émergence d'opérations de référence et démonstratives
- > Assurer la dissémination des retours d'expérience.
- > Convaincre par l'exemple les maîtres d'ouvrage
- > Convaincre les professionnels, à commencer par les promoteurs immobiliers



LE PROJET PHARE

Décliner la plate-forme à l'IUT d'Orléans

- > Installer un 1^{er} échangeur géothermique en « champ de sondes »
- > Monter un programme pédagogique pour les étudiants de l'IUT
- > Compléter par un 2nd « champ de sondes » expérimental d'envergure nationale
- > Monter des programmes scientifiques avec les équipes de la Région.

Le projet pédagogique à l'IUT concerne la nouvelle formation GTE (Génie Thermique et Energie). Les étudiants raccorderont eux-mêmes les bâtiments de l'IUT à la géothermie. Les compétences travaillées seront :

Thématique Sous-sol

- > Calculs de pré-dimensionnement
- > Montage de projets de PAC géothermique

Thématique Echangeurs géothermiques

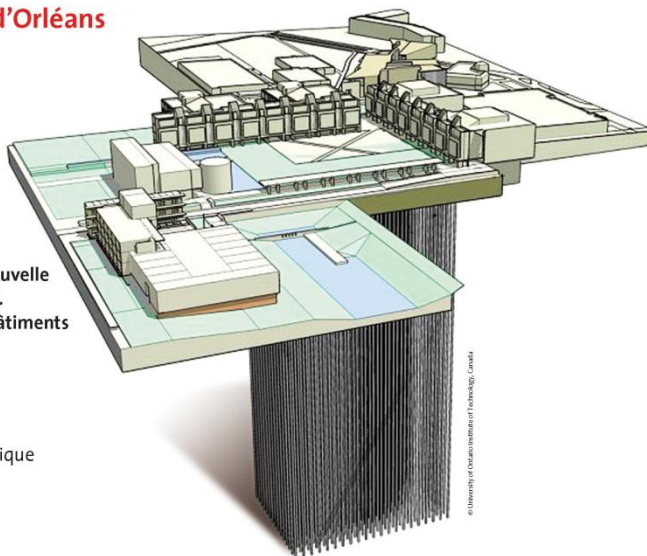
- > Logiciels de simulation
- > Conception des liaisons hydrauliques
- > Conduite d'un projet de forage

Thématique Exploitation

- > Mise en service à l'échelle d'un pavillon (5kW)
- > Mise en service à l'échelle du petit collectif (50 kW)
- > Gestion d'un champ de sondes
- > Notions de stockage géothermique saisonnier

Thématique Projet complexes

- > Couplage de la géothermie aux émetteurs
- > Hybridation avec d'autres énergies renouvelables



LE PARTENARIAT ENVISAGÉ

- > IUT d'Orléans et équipes universitaires régionales
- > Organismes nationaux : BRGM, CSTB, ADEME
- > Scientifiques : INES (Institut national de l'énergie solaire), Ecole des mines, ...
- > Région Centre, Conseil Général du Loiret



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en région Centre avec le Fonds européen de développement régional





Plate-forme expérimentale pour les échangeurs géothermiques des pompes à chaleur



Les enjeux scientifiques

L'OBJECTIF

Fiabiliser la géothermie superficielle

Les enjeux à court terme :

- › Paramétrer les domaines d'excellence des différentes solutions géothermiques
- › Expérimenter l'hybridation de la géothermie avec les autres EnR
- › Améliorer les COP annuels (diminuer la facture énergétique)

LE PROGRAMME ENGAGÉ SUR LA PLATE-FORME JUSQU'EN 2013

Les échangeurs géothermiques de référence

- › Maîtriser tous les paramètres des échangeurs horizontaux et des sondes verticales
- › Quantifier l'impact sur les équilibres physico-chimiques et bactériologiques
- › Comparer les performances des solutions novatrices avec celles des échangeurs de référence

L'innovation

- › Expérimenter divers modes d'exploitation et de stockage
- › Développer les moyens de suivre les performances des installations en situation réelle
- › Développer les moyens d'investigation et la métrologie pour acquérir les connaissances
- › Expérimenter de nouveaux échangeurs géothermiques, sur la Plate-forme et en situation réelle



Sonde géothermique

Une première innovation

Un LOG de réponse thermique permanent pour les sondes géothermiques

A ce jour, la connaissance du comportement thermique du terrain résulte d'une mesure « moyenne » obtenue en relevant la différence entre la température du fluide en entrée de l'échangeur géothermique et la température de sortie dans des conditions de fonctionnement stabilisées. Cette procédure convient pour un pré-dimensionnement mais ignore les contributions des couches géologiques. De ce fait, elle est insuffisante pour une définition optimale des sondes et de leur mode de fonctionnement. Une amélioration du test de réponse thermique est actuellement en cours de développement. Il permettra de quantifier le comportement de

diverses couches géologiques. Il s'agit en fait d'un « LOG » thermique permanent où le capteur sensible est une fibre optique qui se caractérise par un coût très bas pour une durée de vie extrêmement longue.

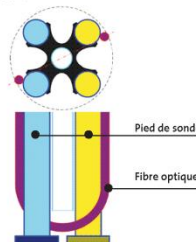
Ce dispositif permettra une caractérisation plus fine des données nécessaires pour modéliser l'impact dans le temps d'un ensemble de sondes et optimiser leur fonctionnement. Par ailleurs, la mesure in-situ de la température sur la profondeur du forage permettra de suivre l'évolution des formations géologiques lorsque le sous-sol est sollicité par une pompe à chaleur.



Machine de forage



Assemblage des fibres optiques



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en région Centre avec le Fonds européen de développement régional





1. Etablir des référentiels
2. Faciliter l'implantation des échangeurs enterrés
3. Etalonner les échangeurs géothermiques novateurs
4. Sortir du périmètre des pavillons individuels
5. Informer

LA SITUATION ACTUELLE

La localisation des échangeurs horizontaux et verticaux

- > Plutôt là où il y a de grands espaces <-> facile à implanter
- > Une faible densité d'opérations <-> pas de risque d'interférence

Les verrous pour un développement

- > Convaincre les maîtres d'ouvrages
- > Convaincre les professionnels, à commencer par les promoteurs

LE PROGRAMME DE R&D

Les échangeurs géothermiques sous-sol

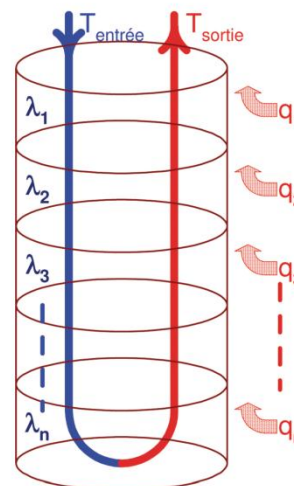
- > Etudier de nouvelles configurations adaptées à la géologie
- > Simplifier les mises en place (chantier) et les raccordements
- > Généraliser le(s) test(s) de réponse thermique
- > Identifier les limites opératoires

Les usages innovants

- > Coupler avec d'autres ENR
- > Adapter aux demandes & contraintes locales

Les modes d'exploitation

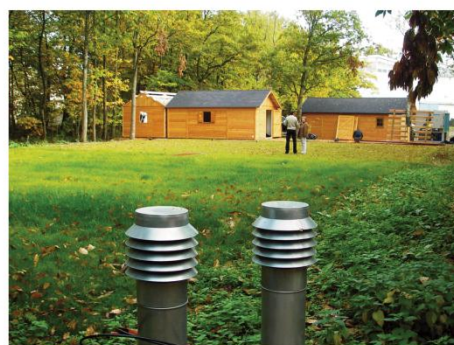
- > Améliorer le COP annuel (facture énergétique)
- > Monitorer la boucle géothermique
- > Optimiser les régulations et l'électrotechnique ...



Etude des contributions des couches géologiques



Etat initial de la clairière avant implantation de la Plate-forme



Vue après la première phase d'aménagement de la Plate-forme



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en région Centre avec le Fonds européen de développement régional



Plate-forme expérimentale pour les échangeurs géothermiques des pompes à chaleur



Les résultats scientifiques préliminaires - mai 2010

OBJECTIF

Caractériser les échanges énergétiques entre les systèmes géothermiques et le sous-sol

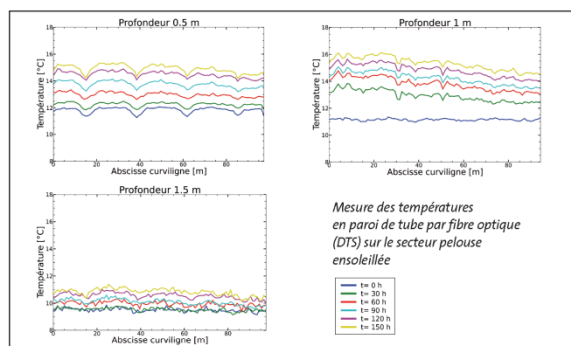
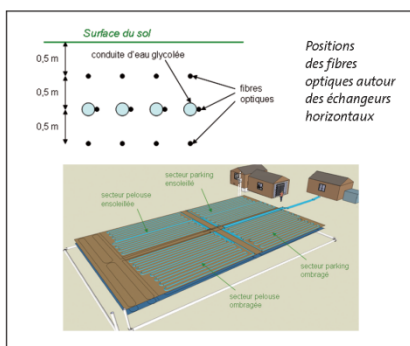
- Validation du dispositif de régulation thermodynamique
- Validation de la mesure répartie de température par fibres optiques (DTS)

Echangeurs horizontaux

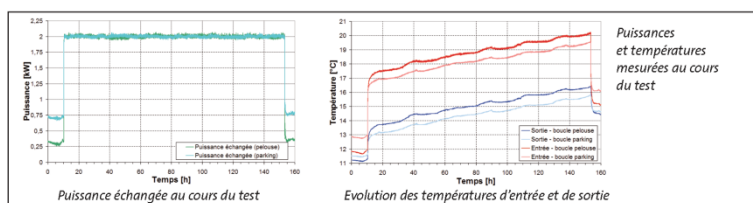
Réalisation d'un test de réponse thermique (puissance échangée et débit imposés constants)

Description du test :

- > 2 circuits de régulation composés de 2 boucles de 100 m de tubes connectés en parallèle sur chaque circuit
 - > Durée : 140 h
 - > Débit de volume : 0,5 m³/h
 - > Puissance de chauffage : 2 kW
- Sur chacun des 2 circuits de régulation (côté pelouse et côté parking)

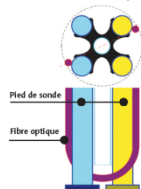


En cours :
Développement d'un modèle numérique décrivant le fonctionnement de l'échangeur horizontal en régime transitoire et validation expérimentale



Echangeurs verticaux

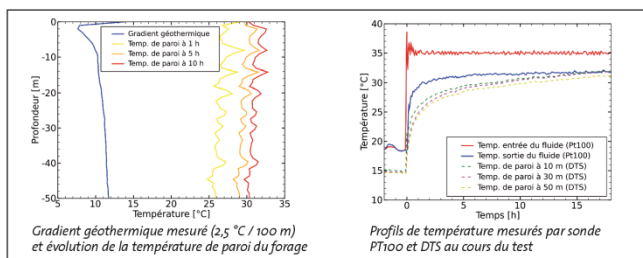
Réalisation d'un test à débit et température d'injection constants (sonde verticale double U profonde de 50 m)



Description du test :

- > Durée : 18 h
- > Débit de volume : 1,2 m³/h
- > Température d'injection : 35 °C

Positions des fibres optiques le long de la sonde verticale double U



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en région Centre avec le Fonds européen de développement régional





Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources – Division Géothermie
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34