

SEPTEMBRE 2020

LA GÉOTHERMIE EN FRANCE

ETUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE DE LA GÉOTHERMIE DE SURFACE



La géothermie,
l'énergie de demain dès aujourd'hui !

 **afpg**
ASSOCIATION FRANÇAISE
DES PROFESSIONNELS DE LA GÉOTHERMIE



Sommaire

	Introduction	5
1.	Méthodologie et hypothèses	6
1.1	Présentation de la méthodologie	7
1.2	Hypothèses générales	7
1.2.1	Les exemples étudiés	7
1.2.2	Pompe à chaleur	9
1.2.3	Solutions de comparaison pour le chauffage	10
1.2.4	Coûts des énergies	11
1.2.5	Hypothèses pour le rafraîchissement	11
1.2.6	Aides et éco-PTZ	12
1.3	Présentation des technologies et hypothèses spécifiques	13
1.3.1	Capteurs horizontaux	13
1.3.2	Corbeilles géothermiques	15
1.3.3	Sondes géothermiques verticales	16
1.3.4	Géothermie sur aquifère	18
2.	Résultats par secteur	20
2.1	Particulier	21
2.2	Collectif	24
2.3	Tertiaire	27
3	Conclusions	30

Liens utiles

ADEME, Agence de la Transition Ecologique :
www.ademe.fr

Amorce :
www.amorce.asso.fr

Association Française des Professionnels de la Géothermie :
www.afpg.asso.fr

Association Française pour les Pompes à Chaleur :
www.afpac.org

Bureau de Recherches Géologiques et Minières :
www.brgm.fr

Espace institutionnel sur la géothermie réalisé par l'ADEME et le BRGM :
www.geothermies.fr

Observ'ER :
www.energies-renouvelables.org/accueil-observ-er.asp

European Geothermal Energy Council :
www.egec.org

FEDENE :
www.fedene.fr

Ministère de la Transition écologique et solidaire (espace géothermie) :
www.ecologique-solidaire.gouv/geothermie

Qualit'Enr :
www.qualit-enr.org

Syndicat des Energies Renouvelables :
www.enr.fr

Syndicat des Foreurs d'Eau et Géothermie :
www.sfeg-forages.fr

Glossaire

Aquifère : Formation géologique poreuse et perméable capable de produire de l'eau naturellement ou par pompage (nappe d'eau souterraine).

Doublet (triplet) géothermique : Ensemble de deux (ou trois) forages associés, l'un étant dédié à la production du fluide géothermal, l'autre (ou les deux autres) à la réinjection de ce fluide dans l'aquifère d'origine.

Forage : Désigne l'opération consistant à réaliser un ouvrage de type « puits géothermique » ou « sonde géothermique ». En langage courant, « forage géothermique » désigne un ouvrage déjà réalisé et équipé.

Géocooling : Mode de fonctionnement de l'installation utilisant directement la capacité de refroidissement du fluide, sans utiliser la pompe à chaleur (qui est contournée).

KWh : Les kW heures (kWh) représentent le travail accompli par une puissance d'un kW pendant une heure. Les kWh/an expriment ainsi la consommation ou la production d'énergie sur une année.

KW thermiques : Le Watt (W) est l'unité légale de puissance et correspond à la quantité consommée ou produite par unité de temps, soit un joule par seconde. 1 kW = 1 000 W. Les kW thermiques correspondent à la puissance installée sous forme de chaleur au cours d'une année.

Pompe à chaleur (PAC) : Dispositif thermodynamique permettant d'extraire de l'énergie d'une source géothermique, à basse température dans le cas de la géothermie de surface, pour la transférer à un autre niveau de température correspondant à un usage précis. Ce transfert thermique se fait grâce à l'exploitation des changements de phase d'un fluide frigorigène (gaz, liquide). Ce changement de phase nécessite un apport d'énergie, le plus souvent via un compresseur mécanique entraîné par un moteur électrique.

SCOP : Coefficient de performance saisonnier, définissant les performances d'une pompe à chaleur sur sa période d'utilisation. Il s'agit du rapport entre l'énergie calorifique produite sur la saison en kWh et l'énergie électrique consommée sur cette même période en kWh.

SEER : Efficacité frigorifique saisonnière, définissant les performances d'un appareil de climatisation sur la période d'utilisation. Il s'agit du rapport entre l'énergie frigorifique produite sur la saison en kWh et l'énergie électrique consommée sur cette même période en kWh.

Seuil de compétitivité : Date au-delà de laquelle la solution étudiée (ici la géothermie) est plus compétitive qu'une seconde solution. Les coûts cumulés de la première solution (depuis sa mise en fonctionnement) deviennent alors inférieurs à ceux de la solution de référence.



La géothermie, *l'énergie de demain dès aujourd'hui !*

L'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) est une association « loi 1901 » créée le 15 juin 2010 à Paris, à l'initiative de l'ADEME. Elle compte une centaine d'adhérents représentatifs des différents métiers de l'énergie géothermique en France métropolitaine et dans les DROM : foreurs, fabricants et installateurs de pompes à chaleur, gestionnaires de réseaux de chaleur, bureaux d'études (fluides/thermique et sous-sol/géosciences), universités et organismes de recherche, fabricants de matériel, investisseurs.

Nos missions

- Représenter et fédérer les professionnels de la filière française.
- Informer les collectivités, les industriels, les associations, et les particuliers des ressources et de la diversité de l'offre géothermique.
- Accompagner les pouvoirs publics en matière de réglementation, de législation et de certification.

Notre rôle

- Promouvoir et accélérer le recours à la géothermie, conformément aux objectifs fixés par la programmation pluri-annuelle de l'énergie (PPE).

Nos actions

- Réfléchir et proposer,
- Communiquer et sensibiliser,
- Former,
- Concrétiser le passage à l'acte en relayant vers nos adhérents.

L'AFPG est structurée en deux filières : la géothermie profonde (usages directs de la chaleur, production d'électricité, co-génération) et la géothermie de surface (production de chaleur et de fraîcheur pour le bâtiment et les process).

Introduction

La géothermie est l'utilisation de la chaleur naturelle de la terre en tant que source d'énergie. Cette énergie renouvelable, présente dans tous les sols, permet de produire de la chaleur, du rafraîchissement mais aussi de l'électricité. Son utilisation s'inscrit pleinement dans le cadre de la transition énergétique en vigueur actuellement et présente de nombreux avantages cumulés. Elle est notamment très faiblement émettrice de CO₂, performante, durable, locale, non délocalisable, sans impact esthétique en surface, régulière et disponible 24h sur 24.

La géothermie de surface valorise l'énergie extraite directement du sol ou d'une nappe d'eau souterraine à faible profondeur grâce à une pompe à chaleur (PAC). En 2018, cette filière représente en France 65% de la production de chaleur géothermique*, le reste étant produit par la géothermie profonde (réseaux de chaleur notamment). La géothermie de surface reste toutefois difficile à aborder par les maîtres d'ouvrage potentiels, souvent peu sensibilisés au fonctionnement des technologies de captage, et à la coordination des aspects sous-sol en lien avec les usages en surface. Alors qu'une meilleure connaissance des aspects économiques et environnementaux des solutions de géothermie permettrait d'accélérer le développement de la filière de géothermie de surface.

Dans l'habitat individuel, collectif ou le secteur tertiaire, l'utilisation de l'énergie géothermique, pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ou le rafraîchissement permet d'améliorer la performance environnementale du bâtiment et donc ce qu'on appelle sa valeur verte. Celle-ci est définie par le Plan Bâtiment Durable comme étant « l'augmentation de valeur d'un bien engendrée par la meilleure performance énergétique et environnementale de ce bien ». En effet, un bâtiment dont l'étiquette énergétique est A ou B aura un prix de vente de 6 % à 22 % supérieur, selon les régions, comparativement à un bâtiment équivalent portant une étiquette D**. Cette tendance est particulièrement perceptible dans le secteur tertiaire où les valeurs de vente ou de revente augmentent pour les bâtiments géothermisés.

Ce document fait suite à l'étude technico-économique de la géothermie assistée par pompe à chaleur, réalisée en juillet 2014 par l'AFPG (Association Française des Professionnels de la Géothermie). Afin de pouvoir informer sur les différents aspects de la géothermie, l'AFPG a ainsi entrepris en 2020 d'actualiser et de compléter les informations présentées, notamment en intégrant le rafraîchissement géothermique dans le calcul des coûts. Pour les quatre principales technologies mises en œuvre en France, tous les investissements à réaliser ont été pris en compte. Les coûts annuels de fonctionnement et de maintenance sont également présentés dans ce rapport, ainsi que les coûts théoriques des émissions de CO₂ (fiscalité carbone).

La vocation de cette étude est de poser des bases financières sur lesquelles les acteurs d'un projet géothermique pour le chauffage, le rafraîchissement et la production d'eau chaude sanitaire pourront s'appuyer. Cette étude a également pour objectif de faire connaître aux maîtres d'ouvrages potentiels :

- **quatre solutions techniques proposées par la géothermie de surface** (sondes géothermiques verticales, doublets sur aquifères, capteurs horizontaux et corbeilles géothermiques),
- **leurs coûts respectifs,**
- **et leur pertinence en fonction du type de bâtiment.**

*

« La Géothermie en France, Etude de filière 2019 », AFPG

**

« La valeur verte des logements en 2017, études statistiques immobilières », Notaires de France

1. Méthodologie et hypothèses



Remerciements

La mise à jour de ce rapport a été coordonnée par Pierre Maquet.

Ont également participé à la constitution et à la rédaction de cette étude :

Christian Boissavy, Régis Eme, Jean-Jacques Graff, Jean-Loup Lacroix, Christophe Luttmann, Xavier Moch, Jean-Marc Percebois, Armand Pomart et Virginie Schmidlé-Bloch.

Nous remercions également le SFEG, l'AFPAC, l'ADEME d'avoir diffusé dans leurs réseaux les demandes d'informations et ainsi contribué à enrichir les données exploitables.

1.1 Présentation de la méthodologie

Trois technologies avaient été présentées dans l'étude réalisée en 2014 : les capteurs horizontaux, les sondes géothermiques verticales et les doublets sur aquifères. Dans ce document, les corbeilles géothermiques (ou échangeurs compacts) ont été ajoutées, en cohérence avec les perspectives encourageantes de ce secteur pour l'année en cours. Les fondations thermoactives et les technologies de récupération sur eaux usées ou sur eau de surface (lac, rivières, mer, ...) ne seront cependant pas abordées.

Afin de pouvoir définir des plages de prix pour chacun des postes d'un projet géothermique, l'AFPG s'est appuyée sur des sources de données multiples en sollicitant les acteurs de la filière via des questionnaires. Leurs données ont été traitées avec un respect absolu de la confidentialité.

La première partie de cette étude sera consacrée à la présentation, d'une part, des hypothèses générales de calcul, et d'autre part, des caractéristiques techniques des différentes solutions. Dans une deuxième partie, les résultats des simulations de coûts permettront de comparer les solutions de géothermie à des solutions de référence pour chaque typologie de bâtiment.

Pour illustrer les différences entre les secteurs du particulier, du collectif et du tertiaire, plusieurs exemples ont été choisis. Afin de limiter le nombre de cas d'étude et d'améliorer la lisibilité de chaque chapitre, des hypothèses simplificatrices ont été appliquées. Elles sont détaillées ci-après.

1.2. Hypothèses de l'étude

Un des objectifs de cette étude est de détailler les coûts complets d'un projet de géothermie selon le type de bâtiment et la technologie utilisée. La partie investissement inclut notamment le coût des études préliminaires, du matériel et de l'installation. La partie maintenance concerne les coûts des contrats de maintenance et le remplacement de pièces usagées.

Pour être en capacité de comparer objectivement les différentes technologies, toutes les études présentées dans ce rapport sont fondées sur des cas généraux. Ceux-ci ne prennent pas en compte les particularités inhérentes à certaines opérations. Ces particularités peuvent considérablement abaisser ou augmenter les coûts de l'opération et ainsi rendre plus ou moins intéressante économiquement la solution de géothermie. Quels que soient le type d'opération envisagé et la puissance géothermique recherchée, l'expertise d'un bureau d'étude thermique (surface) et sous-sol (géosciences) est recommandée afin de déterminer la solution géothermique la plus appropriée.

Tous les coûts de cette étude sont toutes taxes comprises (TTC), à l'exception des investissements dans le collectif et le tertiaire qui sont présentés hors taxe (HT).

1.2.1 Les exemples étudiés

- Les différents exemples présentés dans cette étude correspondent à des projets de rénovation. En effet, pour des projets de construction neuve, donc conformes à la RT2012 ou prochainement, à la RE2020, les puissances de chauffe ainsi que les besoins thermiques sont moins importants. La géothermie y sera donc possible à des coûts plus faibles.
- Les pompes à chaleur géothermiques peuvent fonctionner, en chaud comme en froid, avec tous les types d'émetteurs. Cependant, le rendement du système global sera meilleur si les émetteurs choisis sont basse température comme par exemple un plancher chauffant-rafraichissant. Dans cette étude, le coût du changement des émetteurs n'a pas été inclus.

- Trois exemples de bâtiments ont été retenus, correspondant aux secteurs de l'habitat particulier, de l'habitat collectif et du tertiaire. Ils sont décrits dans le Tableau 1, ci-dessous.

Tableau 1

Caractéristiques des exemples de l'étude

	Particulier	Collectif	Tertiaire
Puissance calorifique de la PAC	8 kW	250 kW	400 kW
Besoins thermiques	16 MWh/an	375 MWh/an	320 MWh/an
Besoins en rafraîchissement	4 MWh/an	94 MWh/an	320 MWh/an

- Les besoins thermiques des différents exemples ont été estimés par une approche en nombre d'heures équivalentes à pleine puissance (hEPP). Les exemples des secteurs de l'habitat particulier et collectif produisent du chauffage et de l'eau chaude sanitaire (ECS) tandis que l'exemple du tertiaire ne produit que du chauffage. Les valeurs suivantes ont été retenues :
 - 2 000 hEPP pour le particulier,
 - 1 500 hEPP pour le collectif,
 - 800 hEPP pour le tertiaire.
- Cette étude s'inscrit volontairement dans le cadre de la réglementation GMI (Géothermie de Minime Importance), c'est-à-dire que sont considérés les projets situés entre 10 et 200 m de profondeur, de puissance captée inférieure à 500 kW et d'un débit inférieur à 80 m³/h pour les projets sur nappe. Il est à noter que les projets avec capteurs horizontaux et corbeilles géothermiques ne sont pas soumis à la GMI, puisque la profondeur d'investigation est inférieure à 10 mètres. Il n'y a donc aucune déclaration à réaliser.
- La durée de vie des systèmes de captage est estimée à plus de 50 ans et celle de la PAC à environ 20 ans, valeur plutôt conservatoire. Dans ce document, les périodes d'étude seront limitées à 20 ans. Pour les solutions de géothermie tout comme pour les solutions de référence, le renouvellement de l'installation ne sera pas pris en compte.

1.2.2 Pompe à chaleur

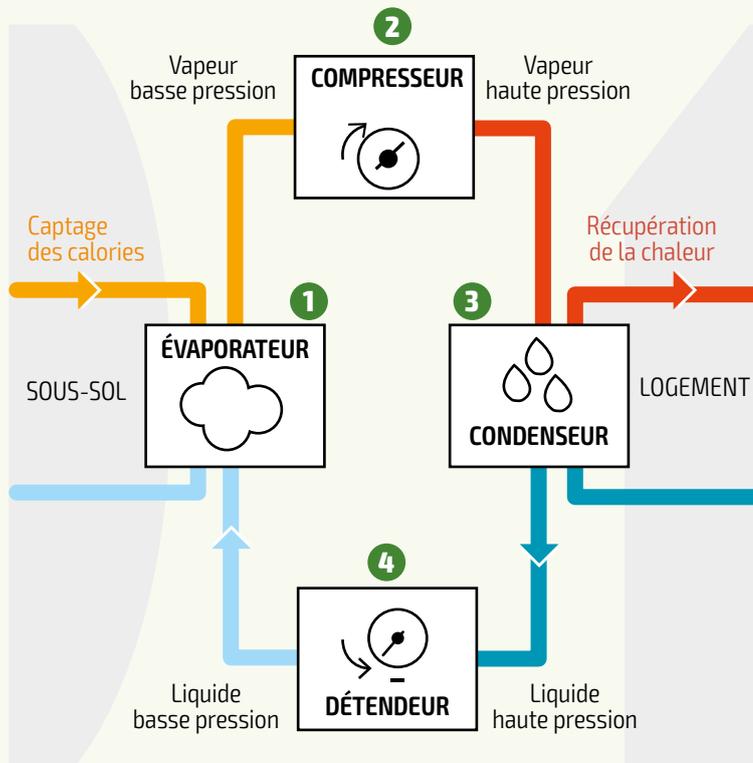
- Le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur géothermique, pour une application en chauffage, est détaillé dans le schéma ci-dessous.

1 Évaporation

Le fluide frigorigène est évaporé à basse pression (BP) et à basse température, en utilisant l'énergie de la source de chaleur (capteur horizontal, capteur vertical, corbeille géothermique ou forage sur eau de nappe).

2 Compression

La vapeur du fluide frigorigène est comprimée à une pression supérieure au moyen du compresseur électrique, ce qui entraîne une élévation de la température.



4 Détente

Le fluide frigorigène liquide est détendu depuis une pression élevée (HP) à une pression basse (BP). Il s'en suit une chute de la température et le cycle recommence.

3 Condensation

La vapeur du fluide frigorigène à haute pression (HP) est condensée à haute température par dissipation de sa chaleur dans l'émetteur (plancher chauffant, radiateurs, ventilo-convecteurs, etc.).

Figure 1

Cycle thermodynamique d'une PAC

Source : Guide ADEME/AFPG « La géothermie pour chauffer et rafraîchir sa maison », Edition Novembre 2017

- Le coefficient de performance saisonnier du système ou SCOP global annuel est défini comme le ratio de la production thermique annuelle de la pompe à chaleur sur la consommation électrique annuelle (en comptant les auxiliaires). Les SCOP retenus pour l'étude sont détaillés dans le Tableau 2.

	Sondes verticales	Capteurs horizontaux	Corbeilles géothermiques	Géothermie sur aquifère
SCOP	4 - 4,5	4	4	5,5

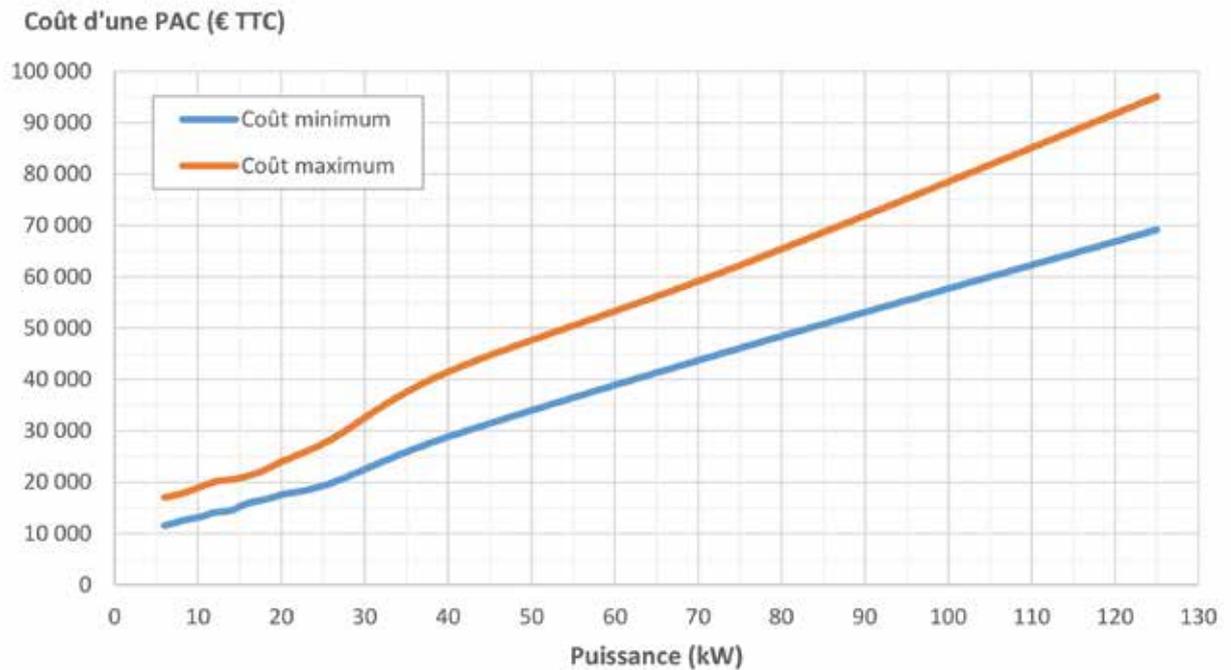
Tableau 2

SCOP retenus pour les différentes technologies de géothermie

Figure 2

Evolution du coût selon la puissance pour une PAC géothermique eau glycolée / eau

- Afin d'estimer le coût de l'investissement pour la partie pompe à chaleur, l'AFPG a contacté plusieurs fabricants sur la base d'un questionnaire. Les résultats obtenus ont permis d'établir des fourchettes de prix des PAC géothermiques pour plusieurs gammes de puissance. La Figure 2 ci-après présente la plage de variation des prix, en incluant la pose, pour une pompe à chaleur eau glycolée / eau en fonction de sa puissance. Pour des puissances de PAC plus élevées, la courbe des prix s'infléchit à la baisse.



- Le Tableau 3 ci-après résume les coûts utilisés dans cette étude pour l'investissement et la maintenance des pompes à chaleurs (de type eau glycolée/eau sans production d'ECS).

Tableau 3

Coûts des PAC (chauffage seulement) eau glycolée/ eau pour chaque secteur

	Particulier	Collectif	Tertiaire
Investissement et pose	12 700 € TTC	95 000 € HT	120 000 € HT
Maintenance	156 €/an	1 800 €/an	3 120 €/an

1.2.3 Solutions de comparaison pour le chauffage

- Deux solutions de comparaison ont été étudiées dans ce document : le gaz et le fioul. Les coûts et les caractéristiques de ces technologies sont détaillés dans le tableau suivant.

Tableau 4

Coûts des solutions gaz et fioul pour chaque secteur

	Particulier	Collectif	Tertiaire
	GAZ		
Investissement chaudière	5 400 € TTC	36 250 € HT	50 000 € HT
Maintenance	150 €/an	2 100 €/an	1 970 €/an
Rendement (annuel)	90 %	90 %	90 %
	FIUOL		
Investissement chaudière	6 000 € TTC	-	-
Maintenance	180 €/an	-	-
Rendement (annuel)	90 %	-	-

1.2.4 Coûts des énergies

- Les tarifs des 3 énergies présentés dans le Tableau 5 se basent sur les données communiquées par la DGEC et les fournisseurs d'énergie sur les cinq dernières années. Ces valeurs ont été retenues pour tous les calculs comparatifs dans la suite de cette étude.

	Particulier	Collectif	Tertiaire
GAZ			
Tarif TTC du kWh (abonnement inclus)	0,073 €	0,059 €	0,055 €
FIOUL			
Tarif TTC au litre	0,90 €	-	-
Tarif TTC du kWh	0,09 €	-	-
ELECTRICITÉ			
Tarif TTC du kWh (abonnement inclus)	0,155 €	0,13 €	0,12 €

Tableau 5

Coûts des énergies

- L'inflation du coût des énergies et de la maintenance a été prise en compte dans toutes les simulations. Les valeurs retenues sont de + 4 % par an pour les coûts de l'énergie et de + 1 % par an pour le coût de la maintenance.
- Un scénario « taxe carbone 2030 » a été ajouté à l'étude afin de prendre en compte l'évolution de fiscalité carbone, prévue par la loi sur la transition énergétique. Dans ce cadre, il serait question d'une taxe carbone établie à 100 € par tonne de CO₂ en 2030 contre 39 € actuellement.*

*

« Le prix du carbone, Levier de la transition énergétique », Ministère de la Transition Ecologique

1.2.5 Hypothèses pour le rafraîchissement

- Les besoins de rafraîchissement correspondant à chaque exemple ont été calculés comme un pourcentage des besoins de chauffage et d'ECS. Le rafraîchissement correspond ainsi :
 - à 25 % des besoins de chauffage et d'ECS pour le particulier et le collectif
 - à 100 % pour le tertiaire, soit une production équivalente de chaud et de froid.
- Le sous-sol a une température constante à partir de quelques mètres de profondeur, comprise entre 8°C et 16°C en France. Le principe du géocooling consiste à utiliser cette fraîcheur naturelle, en été, pour assurer le refroidissement direct d'un bâtiment par contournement (bypass) de la pompe à chaleur. Son fonctionnement est assuré par une pompe de circulation, dont la consommation d'énergie est très faible. Ce système permet donc d'atteindre des valeurs d'efficacité énergétique de 25 à 60.
- Dans cette étude, il a été considéré que la totalité du rafraîchissement était assurée grâce au géocooling pour les secteurs du particulier et du collectif. Dans l'exemple du tertiaire, le rafraîchissement est assuré à 40 % par géocooling et à 60 % en froid actif (avec un SEER de 2,5), c'est-à-dire grâce au mode réversible de la pompe à chaleur.
- Le Tableau 6 ci-après résume les coûts d'investissement associés aux différentes technologies de rafraîchissement présentées dans cette étude, ainsi que leurs caractéristiques techniques. Le SEER ou efficacité énergétique saisonnière représente la performance de la PAC en mode rafraîchissement.

Tableau 6

Coûts d'investissement et caractéristiques des solutions de rafraîchissement

	Particulier	Collectif	Tertiaire
	GÉOCOOLING		
Surcoût géocooling	1 200 € TTC	5 000 € HT	5 000 € HT
SEER (géocooling)	30	30	30
	PAC AIR/AIR QUADRISPLIT RÉVERSIBLE		
Achat et installation	10 200 € TTC	-	-
SEER	2,5	-	-
	CLIMATISATION MONOBLOC RÉVERSIBLE (3 MODULES)		
Achat et installation	8 400 € TTC	-	-
SEER	2,5	-	-
	GROUPE D'EAU GLACÉE		
Achat et installation	-	40 000 € HT	60 000 € HT
SEER	-	2,5	2,5

1.2.6 Aides et éco-PTZ

Deux aides ont été prises en compte dans cette étude :

- Le CITE (Crédit d'impôt transition énergétique), remplacé progressivement par la prime MaPrimeRénov', qui concerne les particuliers.
- Les aides du Fonds Chaleur qui subventionnent les projets en collectif ou tertiaire.

Il existe également des dispositifs territoriaux, notamment au niveau régional. Ils n'ont pas été intégrés dans cette étude.

MaPrimeRénov' et le CITE

Lancée le 1^{er} janvier 2020, MaPrimeRénov' remplace le crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE), pour les ménages aux ressources modestes et très modestes. Elle est versée par l'Anah et finance les travaux de rénovation énergétique réalisés par une entreprise RGE.

Les ménages aux revenus intermédiaires peuvent bénéficier, sous certaines conditions, d'un CITE transitoire jusqu'au 31 décembre 2020. Son montant pour l'achat d'une pompe à chaleur géothermique est de 4 000 €.

A titre d'information, les ménages aux ressources modestes ou très modestes peuvent bénéficier d'une aide respectivement de 8 000 ou de 10 000 € par maison individuelle, et d'une aide de 2 000 ou de 3 000 € par logement collectif. Une aide complémentaire pour la dépose d'une cuve fioul est également disponible, elle n'a pas été incluse dans la présente étude.

Le détail de ces aides et des critères d'éligibilité est disponible en ligne : <https://economie.gouv.fr>.

Dans cette étude, les simulations prennent en compte le CITE pour le secteur du particulier.

Les aides du Fonds Chaleur

Pour les secteurs du collectif et du tertiaire, l'ADEME subventionne les opérations sur nappe et sur sondes respectant les critères détaillés dans le Tableau 7.

	Nappes	Champs de sondes	Géocooling
Production minimum en MWh EnR/an	50	25	25
Nombre minimum d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale	1 000 h/an	1 000 h/an	-
COP machine minimum	4,5	4	-
Performance globale annuelle	SCOP > 3	SCOP > 3	SEER > 20
Aide (sur 20 ans) en €/MWh EnR/an	20	40	5

Tableau 7

Critères d'éligibilité et montants des aides du Fonds Chaleur de l'ADEME

Les MWh EnR correspondent aux MWh thermiques extraits du sol par l'installation.

Pour les installations dont la production est supérieure à 1 000 MWh EnR/an, l'ADEME réalise une analyse économique se basant sur les aides forfaitaires avec comme minima sur 20 ans 400 k€ et 800 k€ respectivement pour nappe et sondes.

Éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ)

L'éco-PTZ s'adresse aux propriétaires réalisant des travaux de rénovation énergétique dans leur logement. Il permet de bénéficier d'un prêt à taux zéro d'un montant de 30 000 € maximum pour financer les travaux, s'ils sont réalisés par des entreprises RGE.

Ce système est cumulable avec les deux aides présentées précédemment.

Pour les exemples ne bénéficiant pas de l'éco-PTZ, un prêt à 2 % a été envisagé afin de financer l'installation. Il s'agit pour le particulier des solutions gaz et fioul. Pour le collectif et le tertiaire, toutes les solutions étudiées ont été présentées avec un prêt à 2 %.

1.3 Présentation des technologies

1.3.1 Capteurs horizontaux

Le système de captage horizontal, décrit dans la Figure 3 ci-contre, est constitué de tubes enterrés entre 60 cm et 1,50 m de profondeur selon la zone géographique, dans lesquels le fluide caloporteur (eau glycolée) circule en circuit fermé. L'énergie géothermique est ensuite valorisée par le biais d'une pompe à chaleur.

Les installations occupent une surface de l'ordre de 100% à 200% de la surface à chauffer selon l'isolation du bâtiment.

La surface de captage ne doit pas être recouverte d'un revêtement étanche (terrasse, parking, ...). Elle peut cependant être engazonnée, recouverte de massifs de fleurs, de buissons ou d'un potager, etc.

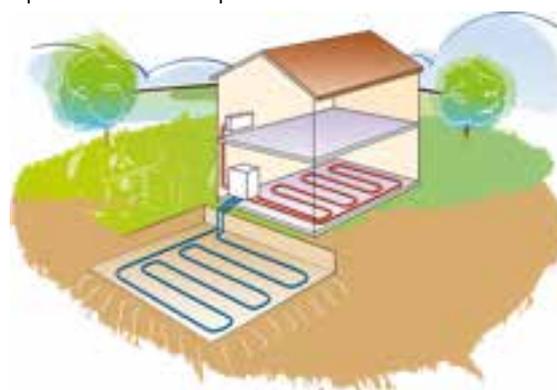
**Figure 3**

Schéma d'une installation de géothermie sur capteurs horizontaux

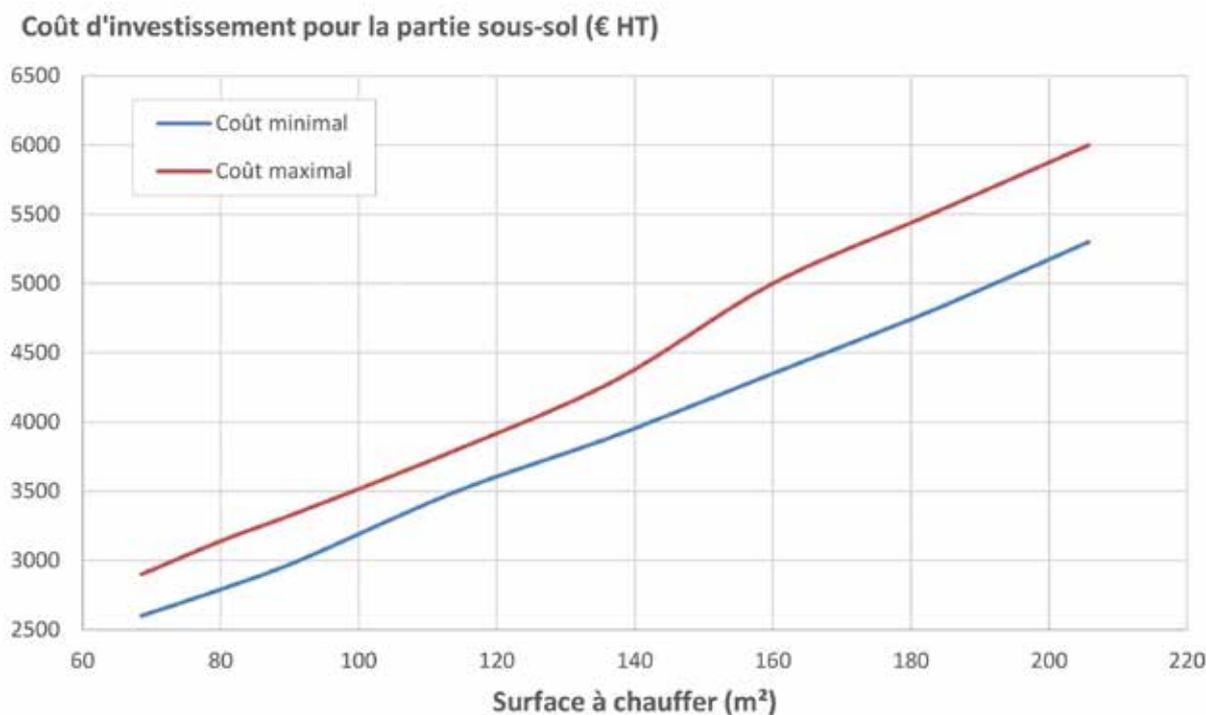
Source : AFPG

Etude préliminaire

Figure 4

Evolution du coût d'investissement pour la partie sous-sol (hors PAC) en fonction de la surface intérieure à chauffer

Afin de pouvoir estimer le coût des opérations sur capteurs horizontaux, des informations tarifaires ont été récupérées auprès de quelques entreprises actives sur le marché du particulier. La Figure 4 ci-après résume les résultats obtenus.



Le coût d'investissement pour la partie sous-sol (hors PAC) dépend quasi linéairement de la surface à chauffer, c'est-à-dire des besoins thermiques de l'habitation.

Hypothèses

- L'exemple étudié est celui du particulier habitant en maison individuelle et dont les besoins thermiques sont de 16 MWh/an. La PAC permet à la fois de chauffer l'habitation et de produire de l'ECS. Le SCOP est de 4 pour le chauffage et la production d'ECS. Le nombre d'heures équivalentes à pleine puissance est de 2 000 h.
- Dans le cas des capteurs horizontaux, la puissance captée varie entre 15 et 30 W/m² selon le type de sol. Pour les calculs, la valeur moyenne usuelle de 25 W/m² a été retenue. Elle correspond à un sol cohésif humide, c'est-à-dire à une situation suffisamment favorable à l'installation de ce type de captage.
- Les capteurs considérés sont disposés en couronnes. Ils ont une longueur de 100 m et contiennent chacun 20 L de fluide caloporteur (monopropylène glycol). Pour l'exemple étudié, la surface de captage représente 240 m², c'est-à-dire 6 couronnes géothermiques.
- L'investissement pour la partie sous-sol comprend l'ensemble des postes de dépense d'un projet de capteurs horizontaux. Il inclut notamment les coûts des couronnes, des cavaliers de

fixation, du collecteur, du regard, du fluide caloporteur, des raccords, de la liaison collecteur/PAC et du terrassement. Pour le terrassement, il a été considéré 4h fixes puis 2h par couronne géothermique.

- La partie sous-sol ne nécessite pratiquement aucun entretien. Le poste de maintenance de la solution géothermique sur capteurs horizontaux ne concerne donc que la PAC.
- Le Tableau 8 ci-dessous résume l'ensemble des coûts de cette technologie comparativement à ceux du gaz et du fioul.

GÉOTHERMIE (CAPTEURS HORIZONTAUX) (TTC)	
Investissement sous-sol	5 000 €
Investissement PAC	16 320 €
Investissement total	21 320 €
CITE	- 4 000 €
Maintenance	156 €/an
Facture d'électricité (PAC)	620 €/an
GAZ (TTC)	
Investissement chaudière	5 400 €
Maintenance	150 €/an
Facture de gaz (chauffage)	1 300 €/an
FIOUL (TTC)	
Investissement chaudière	6 000 €
Maintenance	180 €/an
Facture de fioul	1 600 €/an

Tableau 8

Coûts du système géothermique horizontal et des solutions gaz et fioul

1.3.2 Corbeilles géothermiques

Les échangeurs compacts ou « corbeilles géothermiques » sont installés à faible profondeur. Le fluide caloporteur descend dans un tube enroulé en forme de ressort et remonte par le centre de la spirale, comme le montre le Figure 5 ci-dessous. Cette technologie constitue une alternative intermédiaire aux capteurs horizontaux et aux sondes verticales notamment du point de vue de l'encombrement.

Les corbeilles géothermiques mesurent généralement 3 m de haut et 1 m de diamètre. Certains nouveaux modèles sont cependant plus petits, sans pour autant perdre en capacité d'extraction de la chaleur, ce qui facilite leur installation. La distance optimale entre deux corbeilles est d'environ 4,5 m.

Jusqu'à présent, le marché des corbeilles ne concernait que le particulier et était peu développé. Toutefois, les perspectives de développement de la filière sont très encourageantes comme le montre une augmentation récente du nombre de projets. Cette technologie se prête aux bâtiments peu gourmands en énergie, de sorte qu'une petite habitation, récente ou bien rénovée, pourrait facilement en être équipée.

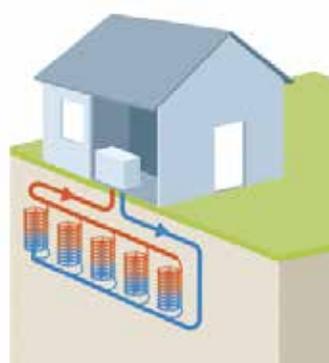


Figure 5

Schéma d'une installation de géothermie sur corbeilles géothermiques

Source AFPG

Hypothèses

- Comme pour les capteurs horizontaux, l'exemple étudié est celui du particulier habitant en maison individuelle et dont les besoins thermiques sont de 16 MWh/an. La PAC, dont le SCOP est de 4, permet à la fois de chauffer l'habitation et de produire de l'ECS avec un nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à pleine puissance de 2 000 h.
- Dans le cas des corbeilles, la puissance captée varie entre 0,7 kW et 1,2 kW par corbeille selon le type de sol. Pour les calculs, la valeur de 1 kW par corbeille a été retenue. Pour l'exemple étudié, 6 corbeilles seront considérées.
- L'investissement pour la partie sous-sol comprend l'ensemble des postes de dépense d'un projet de corbeilles géothermiques. Cela inclut le coût du matériel, le terrassement et la pose des corbeilles. Pour le terrassement, il a été considéré 3h fixes puis 1h30 par corbeille géothermique.
- La partie sous-sol ne nécessite pratiquement aucun entretien. Le poste de maintenance de la solution géothermique sur corbeilles géothermiques ne concerne donc pas la PAC.
- Le Tableau 9 ci-dessous résume l'ensemble des coûts de cette technologie comparativement à ceux du gaz et du fioul.

Tableau 9

Coûts du système sur corbeilles géothermiques et des solutions gaz et fioul

GÉOTHERMIE (CORBEILLES GÉOTHERMIQUES) (TTC)	
Investissement sous-sol	8 240 €
Investissement PAC	16 320 €
Investissement total	24 560 €
CITE	- 4 000 €
Maintenance	156 €/an
Facture d'électricité (PAC)	620 €/an
GAZ (TTC)	
Investissement chaudière	5 400 €
Maintenance	150 €/an
Facture de gaz (chauffage)	1 300 €/an
FIOUL (TTC)	
Investissement chaudière	6 000 €
Maintenance	180 €/an
Facture de fioul	1 600 €/an

1.3.3 Sondes géothermiques verticales

- La géothermie sur sondes géothermiques verticales (SGV) est un marché qui concerne aujourd'hui aussi bien les particuliers que le secteur tertiaire et l'habitat collectif en France.
- Une sonde géothermique verticale est constituée d'un tube en forme de U dans lequel circule un fluide caloporteur (eau glycolée) en circuit fermé (cf. Figure 6 ci-après). Cette sonde est insérée dans un forage, qui est ensuite cimenté pour éviter toute fuite et favoriser le captage des calories du sol. Les sondes verticales requièrent une moins grande emprise au sol que les capteurs horizontaux et sont donc privilégiées pour les opérations qui ne disposent pas d'une

surface au sol conséquente, notamment en milieu urbain. Les sondes sont généralement espacées de 10 m l'une de l'autre.

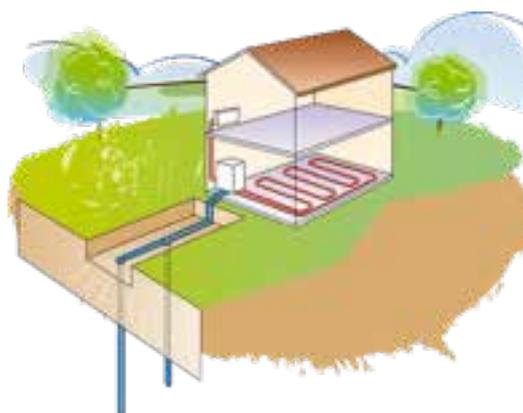


Figure 6

Schéma d'une installation sur sondes géothermiques verticales

Source : AFPG

Etude préliminaire

- Afin de pouvoir estimer le coût des forages sur sondes, l'AFPG a réalisé un questionnaire à destination des foreurs en géothermie. Des tarifs par mètre linéaire (ml) foré ont ainsi été récupérés pour différentes tailles d'installations. En croisant ces informations avec les données des projets soutenus par le Fonds Chaleur, des fourchettes de prix ont été établies. A titre indicatif, le Tableau 10 ci-après résume les résultats obtenus par région.

COÛT COMPLET* D'UN FORAGE SUR SGV (€ HT/ML)	RÉGIONS
45 – 55	Bretagne, Pays-de-la-Loire, Provence-Alpes-Côte d'Azur
55 – 70	Bourgogne-Franche-Comté, Normandie, Occitanie
70 – 90	Auvergne-Rhône-Alpes, Nouvelle-Aquitaine
90 – 120	Centre-Val-de-Loire, Grand-Est, Hauts-de-France, Ile-de-France

Tableau 10

Coûts complets* d'un forage sur SGV en € HT/ml selon les régions

* C.f. paragraphe suivant

Le coût complet d'un forage comprend l'ensemble des postes de dépense d'un projet sur SGV. Il inclut notamment l'amenée et le repli du matériel de forage, le forage, la fourniture et la pose des sondes et de l'antigel, la cimentation, les tranchées et le raccordement à un collecteur.

Hypothèses

- Dans cette partie, trois exemples ont été étudiés, correspondant respectivement aux secteurs du particulier, du collectif et du tertiaire. Ils sont détaillés dans le tableau ci-dessous. La PAC permet à la fois de chauffer l'habitation et de produire de l'ECS, avec un SCOP annuel de 4.

	Particulier	Collectif	Tertiaire
Besoins thermiques	16 MWh/an	375 MWh/an	320 MWh/an
Longueur des sondes	120 ml	3 750 ml	5 400 ml

Tableau 11

Paramètres des systèmes géothermiques sur SGV étudiés

- Une valeur de 40 W/ml d'extraction de chaleur par mètre de sonde est considérée comme basse tandis qu'une valeur de 60 W/ml est considérée comme favorable. Pour les calculs, la valeur de 50 W/ml a été retenue pour le particulier et le collectif.
- Les coûts de forage ont été calculés avec une valeur médiane de 75 € HT/ml.
- La partie sous-sol ne nécessite pratiquement aucun entretien. Le poste de maintenance de la solution géothermique sur sondes verticales ne concerne donc que la PAC. Le Tableau 12 ci-après résume l'ensemble des coûts de cette technologie comparativement à ceux du gaz et du fioul.

Tableau 12

Coûts du système sur
SGV et des solutions gaz
et fioul

GÉOTHERMIE (SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES)			
Investissement sous-sol	10 800 € TTC	281 250 € HT	405 000 € HT
Investissement PAC	16 320 € TTC	125 000 € HT	125 000 € HT
Investissement total	27 120 € TTC	406 250 € HT	530 000 € HT
CITE / Fonds Chaleur	- 4 000 €	- 162 500 €	- 192 000 €
Maintenance	156 €/an	1 800 €/an	3 120 €/an
Facture d'électricité (PAC)	620 €/an	12 190 €/an	9 600 €/an
GAZ			
Investissement chaudière	5 400 € TTC	36 250 € HT	50 000 € HT
Maintenance (TTC)	150 €/an	2 100 €/an	1 970 €/an
Facture de gaz (chauffage) (TTC)	1 300 €/an	24 580 €/an	19 560 €/an
FIOUL (TTC)			
Investissement chaudière	6 000 €	-	-
Maintenance	180 €/an	-	-
Facture de fioul	1 600 €/an	-	-

1.3.4 Géothermie sur aquifère

En présence d'une nappe d'eau dont la qualité et le débit sont suffisants, la technologie de l'aquathermie (doublet géothermique) permet de capter les calories contenues dans l'eau (cf. Figure 7 ci-après).

Deux forages, au minimum, sont nécessaires pour la mise en œuvre de cette technique : un forage d'alimentation pour pomper l'eau à la surface, et un forage de réinjection pour le rejet de l'eau refroidie (ou réchauffée dans le cas de la climatisation ou du géocooling) dans le même aquifère. Dans certains cas d'injectivité réduite, un second forage de réinjection est nécessaire (triplet géothermique). Pour limiter les coûts de foration, la plupart des opérations sont réalisées sur des nappes situées à moins de 100 mètres de profondeur.

Selon les caractéristiques de la ressource, le captage sur nappe peut alimenter un bâtiment (aquifère superficiel) ou un quartier entier (aquifère profond pour alimenter une boucle d'eau tempérée). Le système de boucle d'eau tempérée ne sera pas abordé dans ce document. Un guide technique dédié à ce sujet et publié en 2020 est disponible gratuitement sur le site internet de l'AFPG*.

Les prix communiqués dans cette partie correspondent aux projets réalisés en Ile-de-France, sur Bordeaux ou dans le Nord de la France. Ils sont généralement supérieurs au reste des régions (en moyenne 1,5 fois plus élevés). Pour les autres régions françaises, des coûts plus faibles peuvent donc être envisagés.

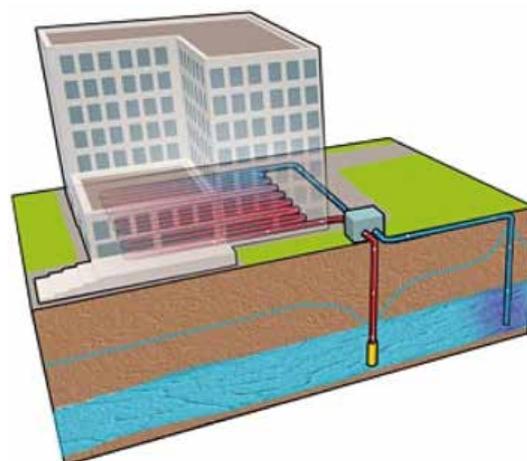
**Figure 7**

Schéma d'une installation
de géothermie sur
aquifère

Source : AFPG

*

http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2020/07/APFG_GUIDE_BoucleEau_WEB.pdf

Hypothèses

- Dans cette partie, trois exemples ont été étudiés, correspondant aux secteurs du collectif et du tertiaire. Ils sont détaillés dans le Tableau 13 ci-dessous. La PAC permet à la fois de chauffer l'habitation et de produire de l'ECS, avec un SCOP annuel de 5,5. En effet, les pompes à chaleur sont plus performantes en fonctionnement sur nappe, du fait des régimes de température plus favorables.

	Collectif	Tertiaire	Tertiaire
Besoins thermiques	375 MWh/an	320 MWh/an	320 MWh/an
Débit	35 m ³ /h	60 m ³ /h	60 m ³ /h
Profondeur de la nappe	40 m	40 m	80 m

Tableau 13

Paramètres des systèmes géothermiques sur aquifère

- Le coût d'un projet de géothermie sur aquifère dépend principalement de trois facteurs : le débit d'eau de la nappe, la profondeur de la nappe et la géologie du sol (détritique ou carbonaté). Pour simplifier la présentation des résultats, le nombre de cas d'étude a toutefois été limité à 3.
- L'investissement pour la partie sous-sol comprend l'ensemble des postes de dépense d'un projet sur nappe. Il inclut notamment les coûts de la foration, de l'équipement du forage, du déploiement et du repli du matériel, des liaisons hydrauliques et électriques, du matériel de filtration et de régulation, des études et de l'ingénierie. Les postes de filtration et de régulation d'un devis de forage assurent un suivi efficace et une bonne performance de l'installation.
- La maintenance est répartie en trois postes : l'entretien et le remplacement du matériel, la régénération du doublet (qui a lieu tous les 10 ans) et la maintenance de la pompe à chaleur.
- La pompe immergée permet de pomper l'eau de la nappe à la surface. La consommation électrique associée à cet élément a été estimée à l'aide d'abaques.
- Le Tableau 14 ci-dessous résume l'ensemble des coûts de cette technologie comparativement à ceux du gaz et du fioul.

GÉOTHERMIE (SUR AQUIFÈRE)			
Débit (m ³ /h)	35 m ³ /h	60 m ³ /h	60 m ³ /h
Profondeur de la nappe	40 m	40 m	80 m
Investissement sous-sol (HT)	254 000 €	349 000 €	458 000 €
Investissement surface (HT)	107 000 €	100 000 €	100 000 €
Total investissement (HT)	361 000 €	449 000 €	558 000 €
Fonds Chaleur	- 122 700 €	- 117 500 €	- 117 500 €
Total maintenance (TTC)	6 960 €/an	7 560 €/an	9 840 €/an
Electricité pompe immergée	1 460 €/an	1 060 €/an	2 110 €/an
Electricité PAC	8 860 €/an	6 980 €/an	6 980 €/an
Facture d'électricité (TTC)	10 320 €/an	8 040 €/an	9 090 €/an
GAZ			
Investissement chaudière (HT)	36 250 €	50 000 €	50 000 €
Maintenance	2 100 €/an	1 970 €/an	1 970 €/an
Facture de gaz (chauffage)	24 580 €/an	19 560 €/an	19 560 €/an

Tableau 14

Coûts des systèmes sur aquifère et des solutions gaz

2. Résultats par secteur



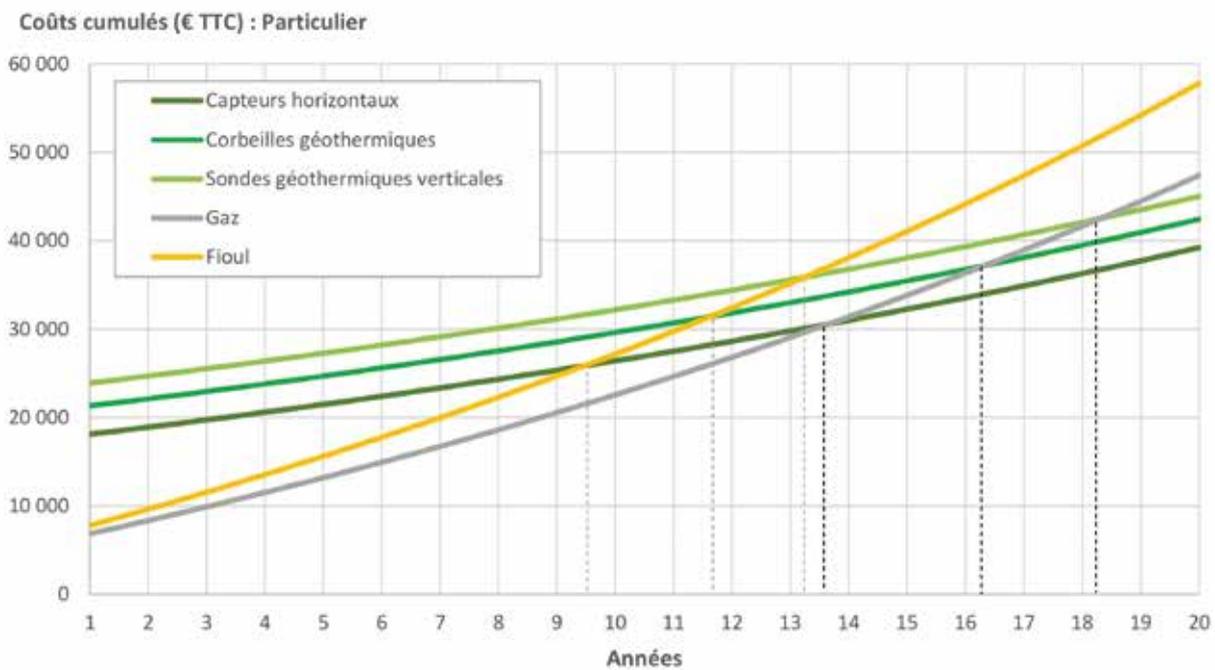
2.1 Particulier

Les résultats présentés dans cette partie correspondent à l'exemple du particulier habitant en maison individuelle et dont les besoins thermiques sont de 16 MWh/an. La simulation réalisée se base sur les coûts détaillés dans la partie « Méthodologie et hypothèses ».

La Figure 8 ci-dessous représente les coûts cumulés sur 20 ans des cinq solutions étudiées, pour la production uniquement de chauffage et d'eau chaude sanitaire.

Figure 8

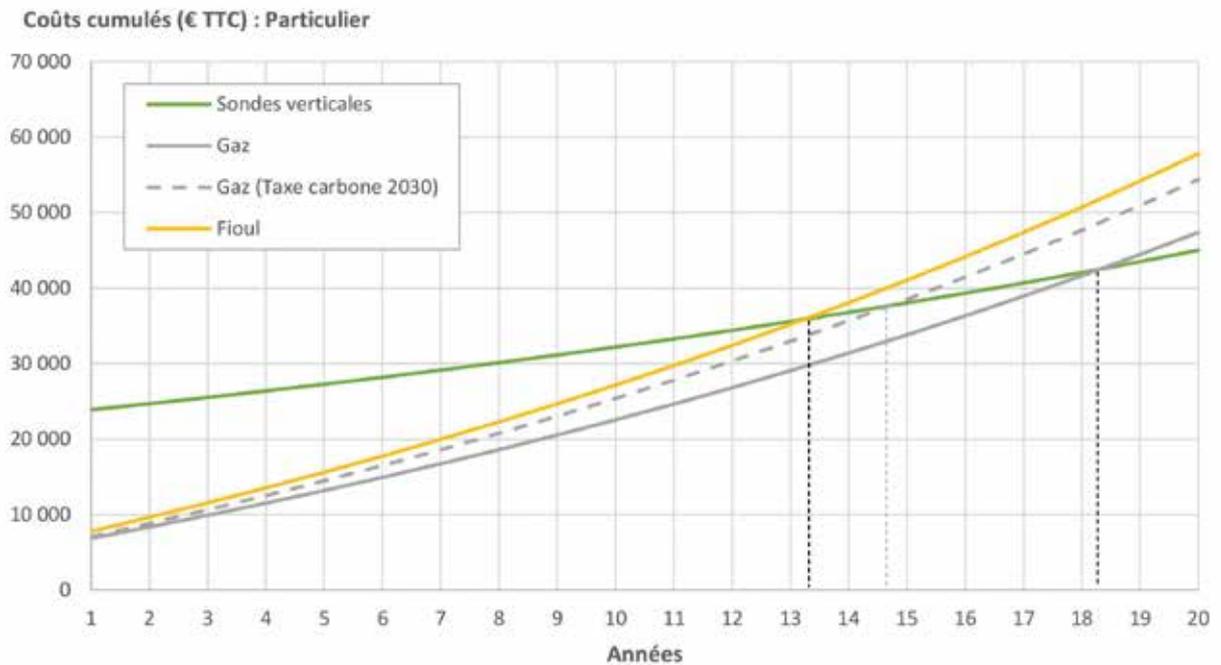
Coûts cumulés pour le particulier des systèmes géothermiques et des solutions gaz et fioul



D'après la Figure 8, les solutions de géothermie deviennent plus compétitives que la solution gaz entre la 14^{ème} et la 18^{ème} année et entre la 10^{ème} et la 13^{ème} année par rapport au fioul. Les économies réalisées par rapport à une solution gaz au bout de 20 ans varient de 2 400 € (sondes) à 8 150 € (capteurs horizontaux).

On observe que les capteurs horizontaux sont les plus rentables économiquement, grâce à des coûts d'investissement plus faibles. Toutefois, l'aspect économique n'est pas le seul facteur à étudier pour la réalisation d'un projet de géothermie. En effet, les capteurs horizontaux nécessitent un terrain de taille suffisante et non recouvert d'un revêtement étanche ou d'arbres.

Le scénario « taxe carbone 2030 » est présenté dans le graphique suivant. Les coûts du gaz ont été déterminés en prenant en compte l'augmentation de la composante carbone telle que le prévoit la loi de transition énergétique.

**Figure 9**

Coûts cumulés pour le particulier avec un scénario « taxe carbone 2030 » pour le gaz

On observe que le seuil de compétitivité des sondes géothermiques verticales par rapport au gaz passe de 18 à 15 ans. Dans le cas des corbeilles géothermiques et des capteurs horizontaux, il est respectivement réduit à 13 et 11 ans.

L'augmentation du coût des énergies fossiles a donc un impact important sur les coûts annuels de facture énergétique pour les solutions gaz et fioul. Dans ce scénario, les solutions géothermiques sont ainsi plus compétitives.

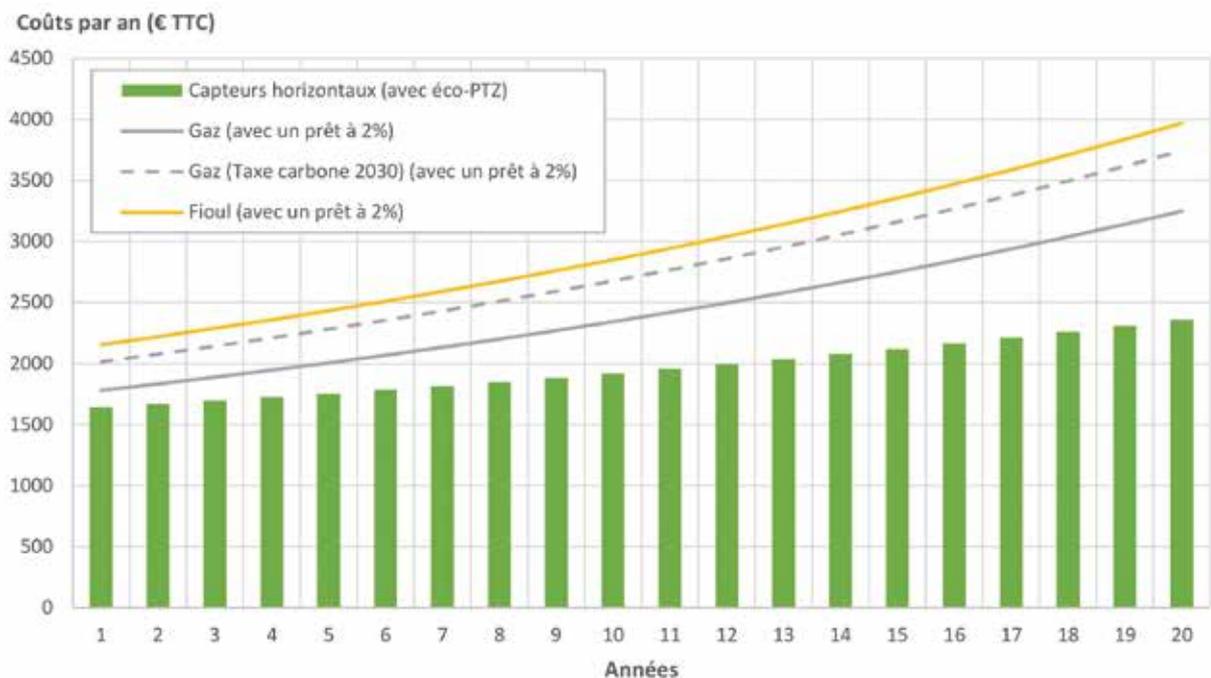
L'investissement est d'autant plus intéressant en choisissant de le répartir sur plusieurs années grâce à l'éco-PTZ. Ce système de prêt à taux zéro est décrit dans la partie « Méthodologie et hypothèses ».

Dans la simulation suivante, le particulier emprunte la totalité de la somme nécessaire pour l'investissement initial et la rembourse sur 20 ans, sans intérêts dans le cas des solutions de géothermie. Pour les solutions gaz et fioul, un prêt à 2 % sur 20 ans a été choisi pour que la comparaison soit cohérente.

Les graphiques des Figures 10 et 11 représentent les résultats pour les capteurs horizontaux et les corbeilles géothermiques.

Figure 10

Coûts par an du système géothermique horizontal en prenant en compte l'éco-PTZ



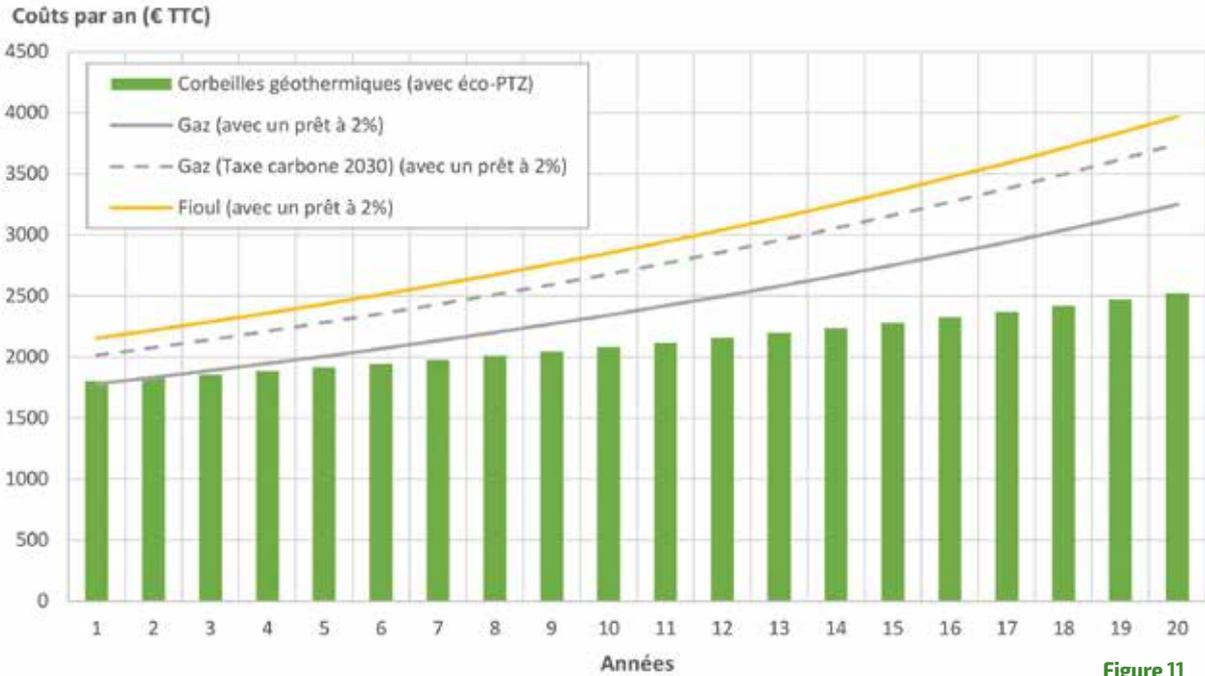


Figure 11

Coûts par an des corbeilles géothermiques en prenant en compte l'éco-PTZ

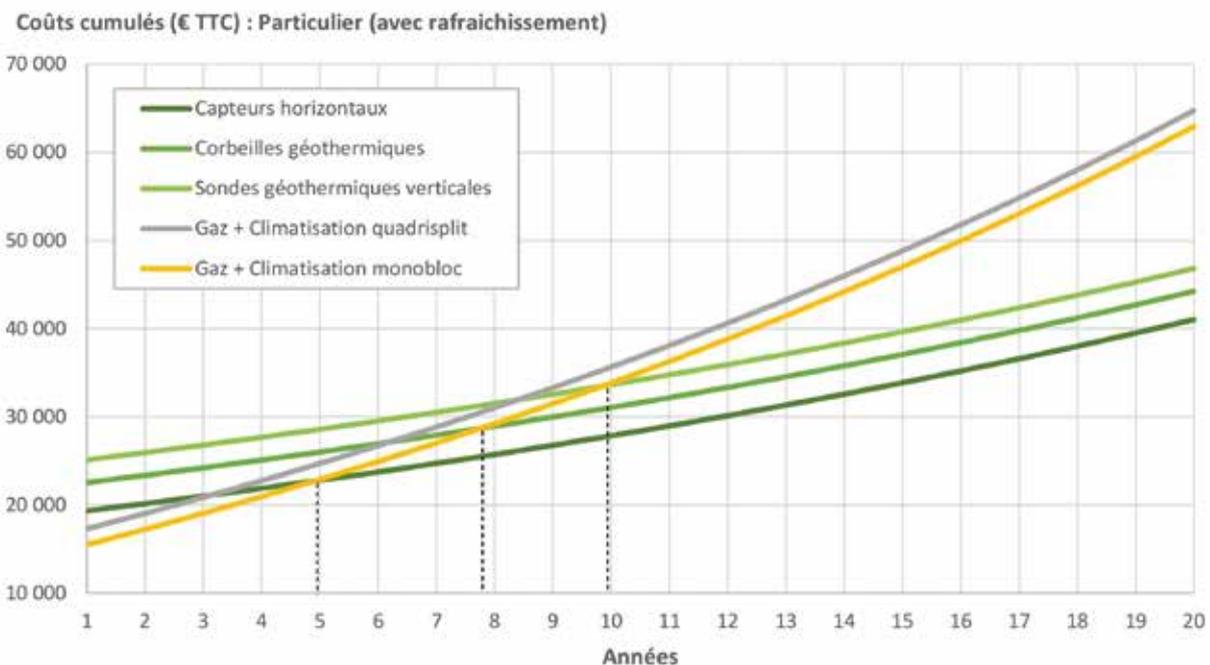
On remarque que le système de l'éco-PTZ permet de répartir l'investissement sur une longue période de temps. De plus, il permet d'obtenir des coûts par an toujours inférieurs à ceux des solutions gaz et fioul. La solution de géothermie est ainsi compétitive dès la mise en place de l'installation.

La simulation réalisée pour les sondes géothermiques verticales met en évidence un léger surcoût pour la géothermie lors des 5 premières années (450 € au total), puis des coûts annuels inférieurs au gaz sur le reste de la durée d'étude.

Une dernière simulation a été réalisée afin de prendre en compte le rafraîchissement, en plus du chauffage et de l'ECS (cf. Figure 12 ci-après). Les solutions comparées ci-dessous sont présentées plus en détail dans la partie « Hypothèses pour le rafraîchissement ». Il s'agit du géocooling, pour lequel un surcoût a été ajouté au prix de la PAC, et de deux solutions de climatisation associées à la chaudière au gaz.

Figure 12

Coûts cumulés de cinq solutions pour le particulier combinant chauffage et rafraîchissement



Le fait d'intégrer le rafraîchissement dans l'analyse des coûts améliore grandement la pertinence économique d'une solution géothermie face aux solutions fossiles. Le seuil de compétitivité de la géothermie est atteint 8 ans plus tôt par rapport à une solution produisant uniquement du chaud. En effet, le rendement élevé du géocooling par rapport aux solutions classiques de climatisation permet d'obtenir une facture énergétique bien plus faible. De plus, le surcoût au niveau de l'installation géothermique est faible en comparaison du coût d'un système de climatisation classique.

Il est également possible d'obtenir un éco-PTZ pour financer une installation géothermique avec rafraîchissement. En effet, les coûts des investissements pour les trois solutions de géothermie sont inférieurs à 30 000 €.

Ce dernier graphique met en évidence la compétitivité du rafraîchissement géothermique qui représente un atout déterminant pour le développement de la géothermie dans le secteur du particulier.

2.2 Collectif

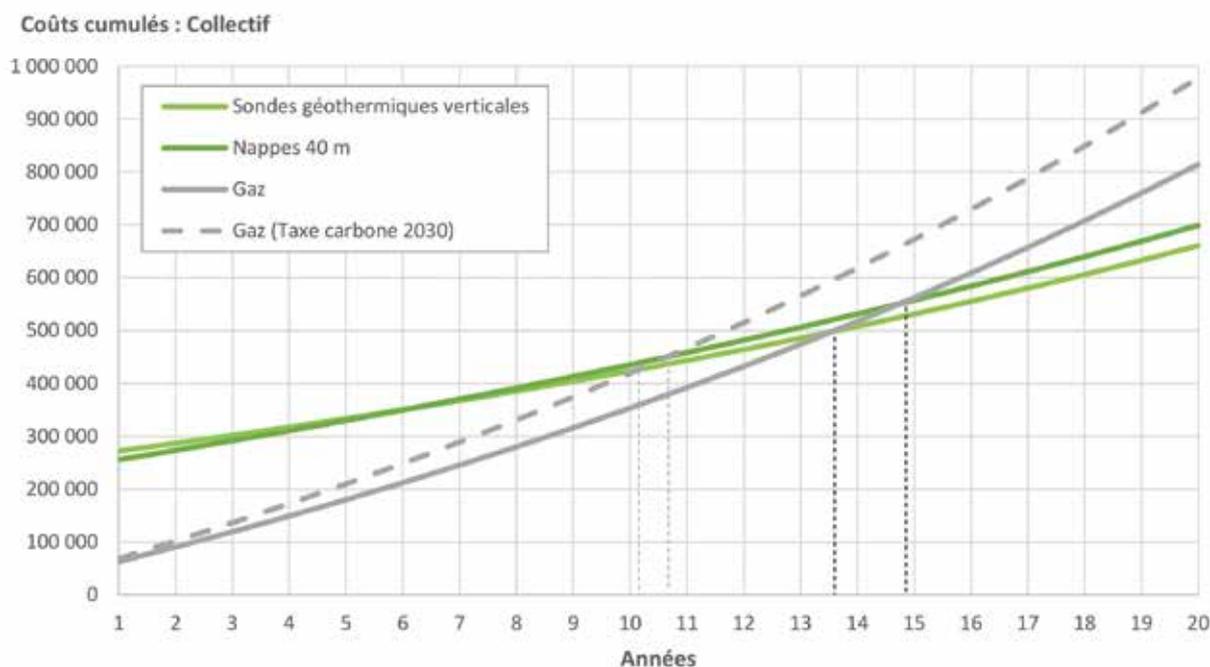
Cette partie concerne le secteur de l'habitat collectif dans lequel la production d'énergie géothermique est mutualisée à l'ensemble du bâtiment. L'exemple retenu est une installation dont les besoins thermiques sont de 375 MWh/an.

Les coûts des solutions de géothermie et des solutions de référence sont indiqués dans la partie « Méthodologie et hypothèses ». Les besoins en froid ont été inclus à l'étude bien que peu d'installations disposent actuellement d'un système de rafraîchissement. Toutefois, des réflexions sont en cours dans plusieurs agglomérations pour étudier l'impact de la production de froid qui va en croissant avec l'augmentation des températures en période estivale. Il a ainsi paru important d'intégrer cet élément dans la présente étude.

Le graphique ci-dessous représente les coûts cumulés sur 20 ans des trois solutions étudiées, pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Le scénario « taxe carbone 2030 » a également été superposé.

Figure 13

Coûts cumulés pour le collectif des systèmes géothermiques et de la solution gaz



Les seuils de compétitivité sont atteints à 15 ans pour la géothermie sur nappe à 40 m et à 14 ans pour les SGV. Dans le cas du scénario « taxe carbone 2030 », ces durées sont réduites de 4 ans.

Les coûts annuels de fonctionnement sont plus importants pour la solution de géothermie sur nappe. En effet, l'installation nécessite un entretien régulier et une régénération du doublet tous les 10 ans.

Afin de financer le projet de géothermie, il est possible de prendre un prêt. Les deux graphiques suivants (Figures 14 et 15) comparent les solutions de géothermie avec la solution gaz pour un prêt à 2 %.

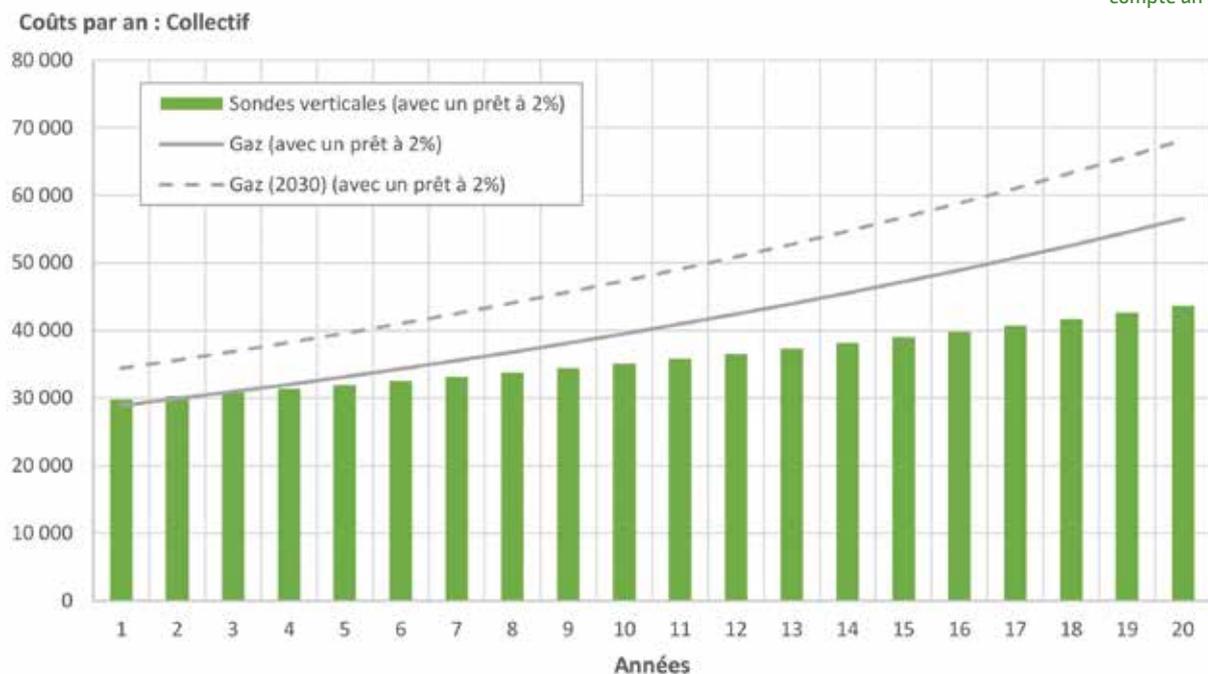
Figure 14

Coûts par an du système sur nappe à 40 m en prenant en compte un prêt à 2 %



Figure 15

Coûts par an du système sur SGV en prenant en compte un prêt à 2 %



Le fait de prendre un prêt permet de réduire le surcoût de l'investissement. La géothermie est alors très rapidement rentable par rapport au gaz.

Enfin, comme pour le secteur du particulier, une simulation a été réalisée afin de prendre en compte le rafraîchissement dans l'analyse des coûts. Le géocooling assure ici 100 % des besoins.

Les besoins en rafraîchissement pour cet exemple sont de 94 MWh. Dans le cas de la solution gaz, un groupe d'eau glacée est ajouté à l'installation. Les coûts associés à cette technologie sont détaillés dans la partie « Méthodologie et hypothèses ».

La Figure 16 compare les SGV et la géothermie sur nappe à 40 m, fonctionnant en géocooling pour le rafraîchissement, et une solution gaz associée à un groupe d'eau glacée.

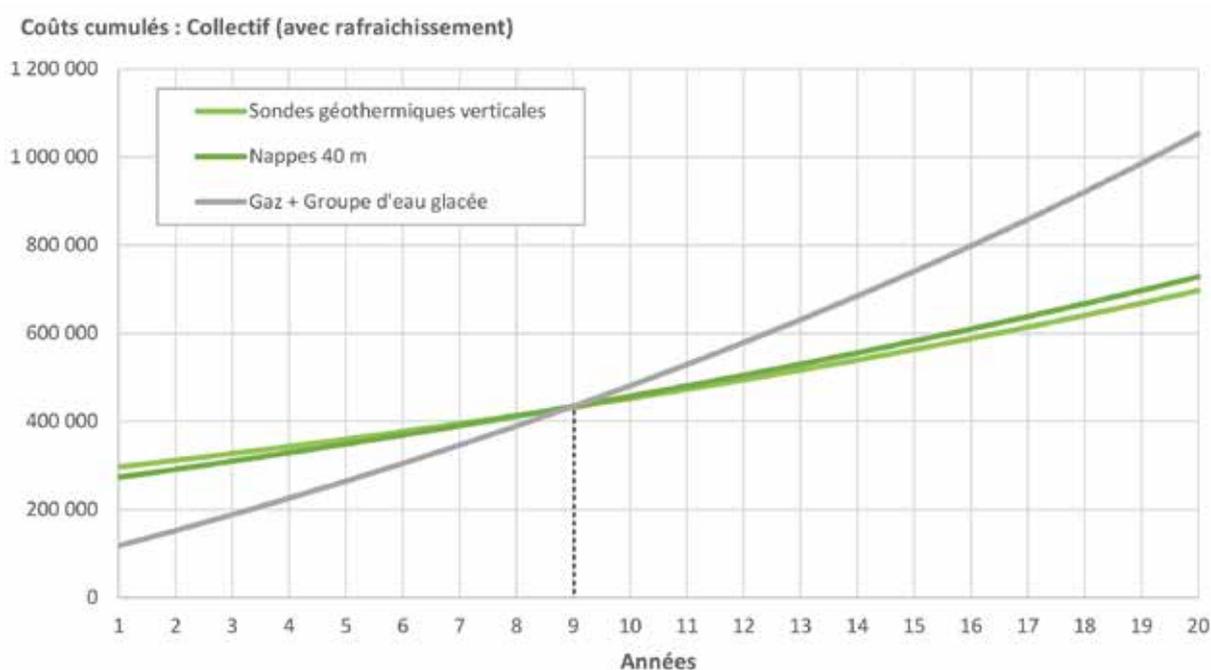


Figure 16

Coûts cumulés de trois solutions pour le collectif combinant chauffage et rafraîchissement

L'ajout du rafraîchissement à la simulation améliore la compétitivité des solutions géothermiques. Les seuils de compétitivité sont atteints à 9 ans pour les deux solutions étudiées. Il est aussi possible, pour cette situation, d'emprunter la somme correspondant à l'investissement afin de répartir les coûts sur plusieurs années.

Après 20 ans d'exploitation, les économies réalisées grâce aux solutions géothermiques sont de 356 000 € pour les SGV et de 325 000 € pour le doublet à 40 m.

Ce dernier graphique (Figure 16) met en évidence l'impact de la prise en compte du géocooling dans l'étude d'un projet de résidence collective. En effet, une installation est bien plus compétitive si elle inclut du rafraîchissement. De plus, dans ce cas, les résidents n'ont pas à s'équiper d'appareils de climatisation lors des périodes de canicule, ce qui représente un coût pour un foyer et évite les îlots de chaleur dans une zone urbaine dense.

Enfin, il est à noter que les propriétaires d'un appartement dans une résidence collective peuvent également bénéficier du système de l'éco-prêt à taux zéro.

2.3 Tertiaire

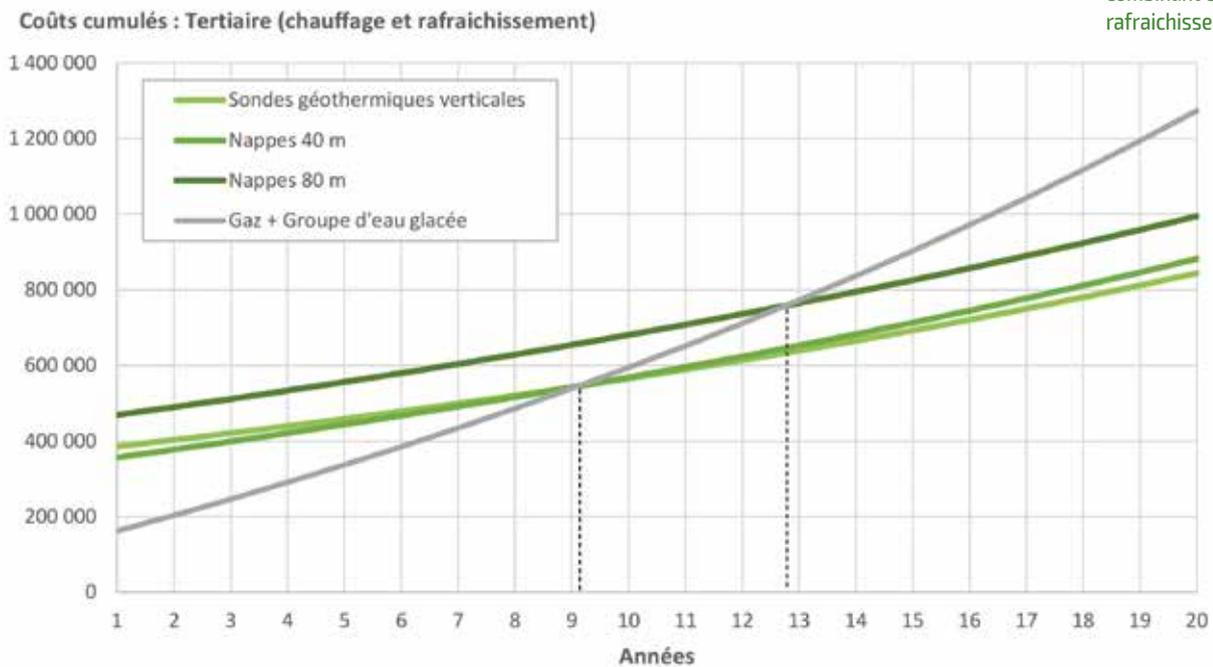
Le troisième secteur abordé dans ce rapport est celui du tertiaire. Il concerne les bâtiments de bureaux, de commerces ou plus largement de services.

L'exemple développé dans cette partie présente des besoins thermiques égaux en chaud et en froid, dont la valeur est 320 MWh/an. La situation en chauffage seul ne sera pas étudiée dans la mesure où la grande majorité des projets de géothermie dans le tertiaire a des besoins de rafraîchissement. Les coûts des technologies présentées en Figure 17 sont détaillés dans la partie « Méthodologie et hypothèses ».

La première simulation réalisée compare quatre solutions combinant chauffage et rafraîchissement : un champ de sondes géothermiques verticales, un doublet sur nappe à 40 m, un doublet sur nappe à 80 m et une chaudière à gaz associée à un groupe d'eau glacée.

Figure 17

Coûts cumulés de quatre solutions pour le tertiaire combinant chauffage et rafraîchissement



Les seuils de compétitivité sont atteints à 9 ans pour le champ de sondes géothermiques verticales et le doublet sur nappe à 40 m. Le doublet sur nappe à 80 m est rentable à plus long terme : le seuil est à 13 ans.

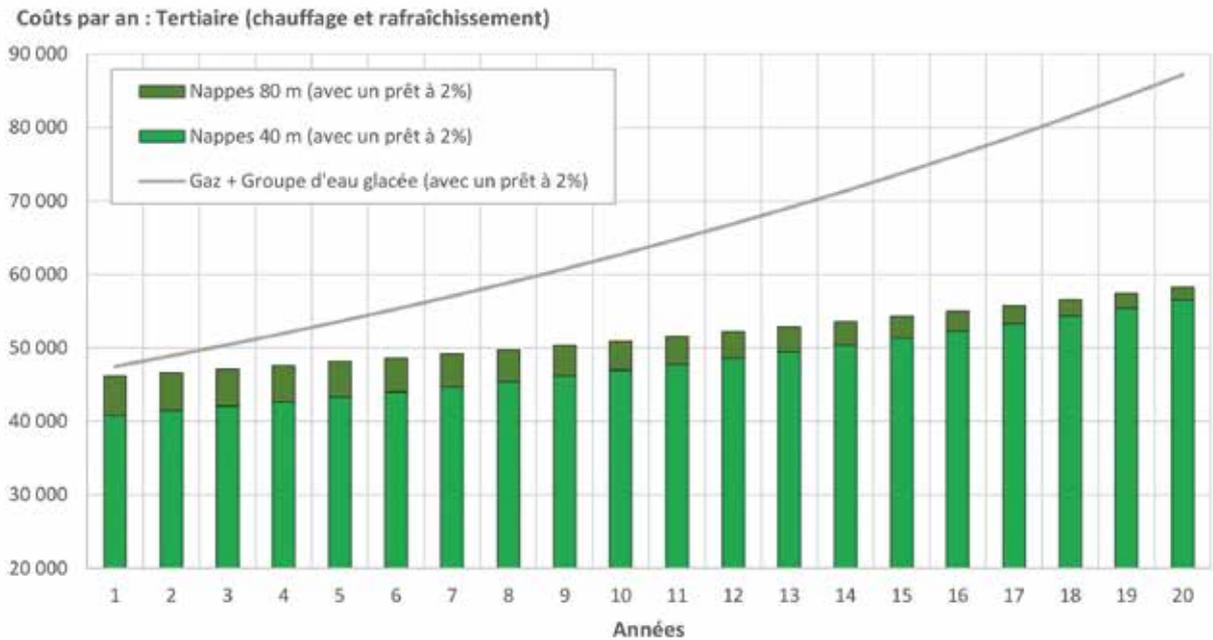
Après 20 ans d'exploitation, les économies réalisées grâce aux solutions géothermiques sont de 430 000 € pour les SGV, de 392 000 € pour le doublet à 40 m et de 379 000 € pour le doublet à 80 m.

Comme expliqué dans la partie présentant la géothermie sur aquifère, la profondeur de la nappe est l'un des facteurs influant sur l'investissement à réaliser.

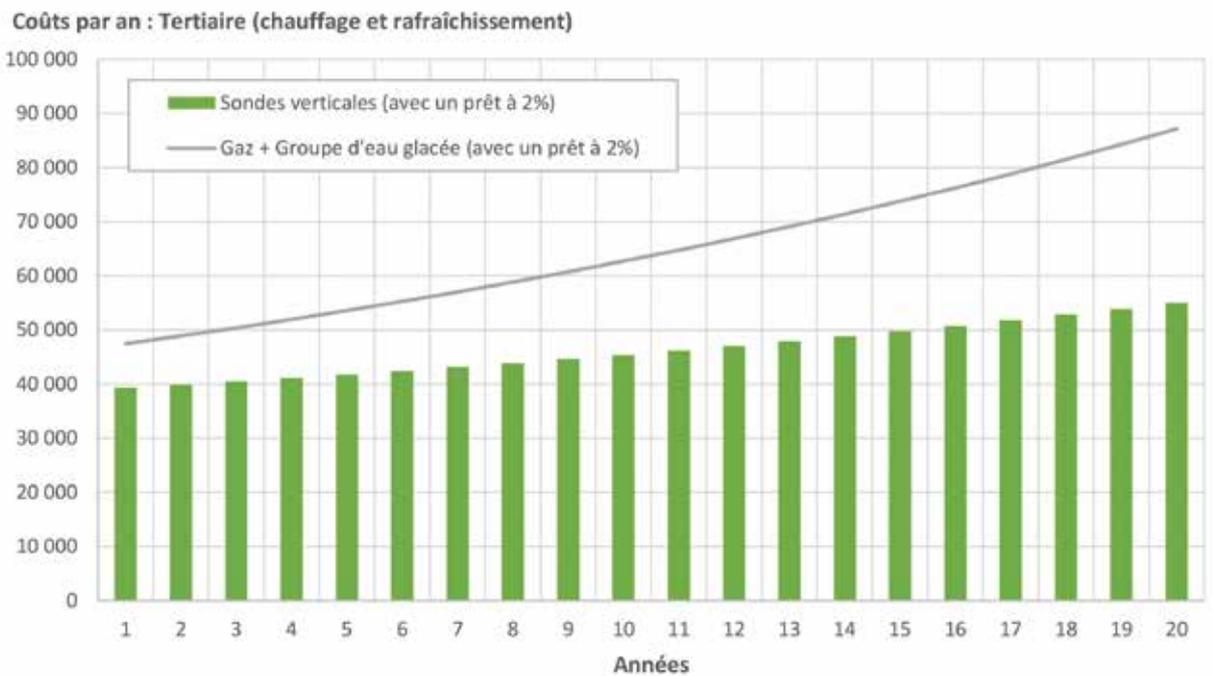
Les deux graphiques en Figure 18 et Figure 19 présentent la situation dans laquelle les installations ont été financées par un prêt à 2 %.

Figure 18

Coûts par an des solutions sur nappe pour le tertiaire combinant chauffage et rafraîchissement

**Figure 19**

Coûts par an d'un champ de sondes pour le tertiaire combinant chauffage et rafraîchissement



Le fait de répartir l'investissement sur une durée de 20 ans grâce à la souscription d'un prêt, permet d'être plus rentable que la solution de référence, et ce dès la première année d'exploitation. Il est donc recommandé de financer l'installation de cette manière lorsque cela est possible.

Afin de réduire les coûts d'investissement pour les solutions de géothermie, il est également possible de coupler le système géothermique avec une chaudière à gaz (déjà existante en cas de rénovation). Cela permet de dimensionner l'installation géothermique à une puissance inférieure au besoin maximal du bâtiment (contrairement à l'exemple étudié précédemment qui est dimensionné à 100 % de la puissance nécessaire). Le fonctionnement est alors assuré grâce à un point de bivalence : au-delà d'une certaine puissance, la pompe à chaleur est complétée par un appoint (la chaudière) afin de satisfaire les besoins de chauffage. Il s'agit alors de trouver le point de bivalence le plus intéressant d'un point de vue économique, c'est-à-dire l'équilibre entre les coûts d'investissement importants pour la solution géothermique et la facture énergétique élevée de la solution gaz.

Pour conclure, la géothermie présente des temps de retour sur investissement de l'ordre de 10 ans dans le secteur tertiaire. Elle permet de réduire les émissions de CO₂ de ce secteur, dues au chauffage à gaz et à la climatisation. Enfin, la géothermie lutte contre le phénomène des îlots de chaleur, particulièrement en ville.



Rénovation du cinéma historique Le Louxor dans le 10^{ème} arrondissement de Paris, terminée en 2013. Le bâtiment est désormais alimenté en chaud et en froid par deux forages de 90 mètres sur nappe, réalisés par Antea Group / Sanfor.

Fiche synthèse de l'opération :

http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2015/04/Le_Louxor.pdf

© Philippe PUMAIN, Architecte,
Image : GFreihalter, 2020, CC
Wikipedia Commons

3. Conclusions



Quel que soit le type de bâtiment concerné, la géothermie de surface est une solution peu émettrice en CO₂, économiquement avantageuse sur le long terme et disponible sur la quasi-totalité du territoire français.

En effet, la géothermie permet de produire non seulement du chauffage et de l'eau chaude sanitaire, mais également du rafraîchissement à un coût très faible grâce au géocooling. Ce mode de fonctionnement amène un véritable confort en été, améliore le rendement de l'installation en rechargeant le sol en calories et réduit le seuil de compétitivité. Cette particularité unique dans le secteur énergétique est un atout déterminant pour la filière, notamment vis-à-vis des nouvelles réglementations thermiques dans lesquelles le rafraîchissement occupe une place essentielle.

Les technologies de géothermie sont utilisables pour chacun des secteurs de l'habitat particulier, collectif et du secteur tertiaire. Cependant, les exemples développés dans cette étude ont été choisis afin d'être représentatifs des installations réalisables. Pour le particulier, les capteurs horizontaux, les corbeilles géothermiques et les sondes géothermiques verticales (SGV) ont ainsi été présentés. Dans le collectif et le tertiaire, deux solutions de géothermie ont été retenues : la géothermie sur aquifère (nappe) et les SGV.

Les simulations économiques effectuées ont permis de mettre en évidence, pour chaque marché, les technologies les plus rentables et de déterminer leurs seuils de compétitivité par rapport à des solutions de référence (gaz, fioul, climatisation classique).

Ainsi, les systèmes sur capteurs horizontaux sont particulièrement bien adaptés pour les particuliers disposant d'une grande surface de terrain. Si ce n'est pas le cas, il est possible de s'équiper en sondes géothermiques verticales ou en corbeilles géothermiques. Les trois systèmes présentés permettent un rafraîchissement par géocooling, très intéressant notamment dans les régions les plus chaudes.

De plus, le particulier peut bénéficier de différentes aides pour une installation de géothermie. D'une part, le CITE / MaPrimeRénov' et les aides régionales permettent de réduire l'investissement initial. D'autre part, l'éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ) peut être attribué aux propriétaires si les travaux sont réalisés par des entreprises « Reconnu Garant de l'Environnement » (RGE).

L'habitat collectif a été étudié en prenant en compte la production d'eau chaude sanitaire pour deux exemples : un champ de sondes (SGV) et une installation de géothermie sur nappe à 40 m. Pour les deux solutions étudiées, les seuils de compétitivité sont environ à 9 ans en incluant le rafraîchissement par géocooling. Or, actuellement, peu d'installations dans l'habitat collectif produisent du rafraîchissement. Au vu de l'intérêt économique et du confort apporté, cette composante rafraîchissement mériterait à être plus souvent envisagée dans ce secteur du collectif.

Dans les bâtiments du tertiaire, les projets en neuf ou en rénovation sont la plupart du temps équipés d'un système double de chauffage et de rafraîchissement. La production de froid ne peut cependant pas être assurée à 100 % par le géocooling. Les seuils de compétitivité sont de 9 ans dans le cas des SGV et de la géothermie sur aquifère à 40 m. Il est aussi possible de financer l'installation par un prêt afin de répartir l'investissement sur plusieurs années et d'être rentable plus rapidement.

Le Tableau 15 ci-après résume les seuils de compétitivité par rapport à une solution gaz et ce pour chaque technologie géothermique et pour chaque secteur.

Tableau 15

Récapitulatif des seuils de compétitivité pour chaque technologie et chaque secteur

		SEUILS DE COMPÉTITIVITÉ PAR RAPPORT AU GAZ (ANS)		
		Chauffage	Scénario « Taxe carbone 2030 »	Chauffage et rafraîchissement
PARTICULIER	Capteurs horizontaux	14	11	5
	Corbeilles géothermiques	16	13	8
	Sondes verticales (SGV)	18	15	10
COLLECTIF	Sondes verticales (SGV)	14	10	9
	Nappe à 40 m	15	11	9
TERTIAIRE	Sondes verticales (SGV)	-	-	9
	Nappe à 40 m	-	-	9
	Nappe à 80 m	-	-	13

Afin de comparer les solutions gaz, fioul et géothermie sur un plan écologique, leurs émissions de CO₂ ont été déterminées sur une année de fonctionnement. Les calculs réalisés se veulent en adéquation avec la fiche technique ADEME sur le calcul du contenu CO₂ de l'électricité, publiée en juillet 2020, se basant ainsi sur la méthode moyenne « mensualisée par usage »*.

* « Positionnement de l'ADEME sur le calcul du contenu CO₂ de l'électricité, cas du chauffage électrique », ADEME, 2020

Tableau 16

Emissions de CO₂ des solutions gaz, fioul et géothermie pour chaque secteur

	TONNES DE CO ₂ EMISES PAR AN pour le chauffage et l'ECS (sauf tertiaire)		
	Particulier	Collectif	Tertiaire
Gaz	3,9	90,4	83,5
Fioul	5,8	-	-
Géothermie	0,3	7,6	9,1

** Dans le cas d'une chaudière gaz à condensation, ce rapport est de 9,1.

Sur toute sa période de fonctionnement, une installation de géothermie chez un particulier émet ainsi 11,9 fois moins de CO₂ qu'une chaudière à gaz** et 18,2 fois moins de CO₂ qu'une chaudière à fioul.

Sur 20 ans, les économies de CO₂ réalisées correspondent à 71 tonnes de CO₂ par rapport au gaz et 110 tonnes de CO₂ par rapport au fioul. A titre de comparaison, d'après la DGAC, une tonne de CO₂ correspond environ à un aller-retour Paris-New-York pour une personne.

Le gaz naturel est la première source d'énergie utilisée pour le chauffage en France. Afin de réduire les émissions françaises de CO₂ liées au chauffage et au rafraîchissement, la géothermie est une solution prête à répondre à 70 % des besoins énergétiques des bâtiments (chauffage, ECS et rafraîchissement), à assurer l'indépendance énergétique de la France grâce à la capacité thermique de son sous-sol, à lutter contre les îlots de chaleur en période de canicule et à créer des emplois en France dans la dynamique de la transition énergétique.

La géothermie, l'énergie de demain dès aujourd'hui !



Liste des tableaux

1	Caractéristiques des exemples de l'étude	8
2	SCOP retenus pour les différentes technologies de géothermie	9
3	Coûts des PAC (chauffage seulement) eau glycolée/eau pour chaque secteur	10
4	Coûts des solutions gaz et fioul pour chaque secteur	10
5	Coûts des énergies	11
6	Coûts d'investissement et caractéristiques des solutions de rafraîchissement	12
7	Critères d'éligibilité et montants des aides du Fonds Chaleur de l'ADEME	13
8	Coûts du système géothermique horizontal et des solutions gaz et fioul	15
9	Coûts du système sur corbeilles géothermiques et des solutions gaz et fioul	16
10	Coûts complets d'un forage sur SGV en € HT/ml selon les régions	17
11	Paramètres des systèmes géothermiques sur SGV étudiés	17
12	Coûts du système sur SGV et des solutions gaz et fioul	18
13	Paramètres des systèmes géothermiques sur aquifère	19
14	Coûts des systèmes sur aquifère et des solutions gaz	19
15	Récapitulatif des seuils de compétitivité pour chaque technologie et chaque secteur	32
16	Emissions de CO ₂ des solutions gaz, fioul et géothermie pour chaque secteur	32

Liste des figures

1	Cycle thermodynamique d'une PAC	9
2	Evolution du coût selon la puissance pour une PAC géothermique eau glycolée / eau	10
3	Schéma d'une installation de géothermie sur capteurs horizontaux	13
4	Evolution du coût d'investissement pour la partie sous-sol (hors PAC) en fonction de la surface intérieure à chauffer	14
5	Schéma d'une installation de géothermie sur corbeilles géothermiques	15
6	Schéma d'une installation sur sondes géothermiques verticales	17
7	Schéma d'une installation de géothermie sur aquifère	18
8	Coûts cumulés pour le particulier des systèmes géothermiques et des solutions gaz et fioul	21
9	Coûts cumulés pour le particulier avec un scénario « taxe carbone 2030 » pour le gaz	22
10	Coûts par an du système géothermique horizontal en prenant en compte l'éco-PTZ	22
11	Coûts par an des corbeilles géothermiques en prenant en compte l'éco-PTZ	23
12	Coûts cumulés de cinq solutions pour le particulier combinant chauffage et rafraîchissement	23
13	Coûts cumulés pour le collectif des systèmes géothermiques et de la solution gaz	24
14	Coûts par an du système sur nappe à 40 m en prenant en compte un prêt à 2 %	25
15	Coûts par an du système sur SGV en prenant en compte un prêt à 2 %	25
16	Coûts cumulés de trois solutions pour le collectif combinant chauffage et rafraîchissement	26
17	Coûts cumulés de quatre solutions pour le tertiaire combinant chauffage et rafraîchissement	27
18	Coûts par an des solutions sur nappe pour le tertiaire combinant chauffage et rafraîchissement	28
19	Coûts par an d'un champ de sondes pour le tertiaire combinant chauffage et rafraîchissement	28



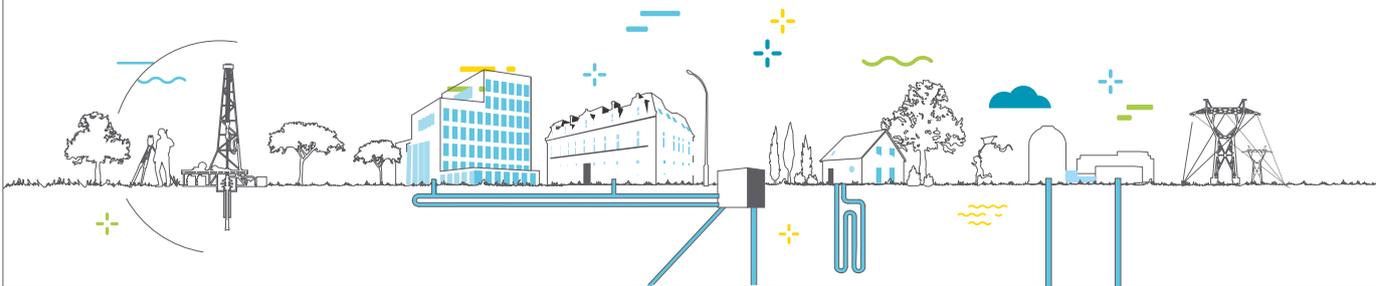
DÉJÀ PARUS

Les guides techniques



Études de filières 2019





LA GÉOTHERMIE EN FRANCE

2020

ETUDE TECHNIÇO-ÉCONOMIQUE DE LA GÉOTHERMIE DE SURFACE

Ce document a pour objectif de détailler et d'analyser les coûts de quatre technologies de géothermie de surface : les sondes géothermiques verticales, la géothermie sur aquifère, les capteurs horizontaux et les corbeilles géothermiques. Le rafraîchissement géothermique, atout déterminant pour le développement de la filière, est également intégré aux simulations présentées.