



AVRIL 2024

LES GUIDES TECHNIQUES AFPG

ÉTUDE SUR **LE RÔLE** **DE LA GÉOTHERMIE** DANS LA **CLIMATISATION** ET LE **RAFRAÎCHISSEMENT**



Résumé

Le secteur de l'énergie géothermique connaît un développement rapide sur le marché français du chauffage renouvelable. Cette croissance est principalement due aux performances élevées et aux faibles coûts d'exploitation des pompes à chaleur géothermiques, ainsi qu'à la disponibilité des ressources géothermiques sur une grande partie du pays.

Alors que les besoins de climatisation augmentent, ce qui s'explique largement par les effets du changement climatique, les parties prenantes du secteur géothermique s'intéressent de plus en plus à mettre en avant les bénéfices de l'énergie géothermique pour le refroidissement, en soulignant ses avantages directs et indirects.

Cette étude compare dans un premier temps les installations géothermiques avec d'autres solutions largement adoptées, en particulier dans le domaine du refroidissement. Dans un second temps, elle explore les externalités positives qui résultent de la mise en œuvre généralisée de solutions de climatisation géothermique.

Pour avoir un panel assez large et significatif des usages de géothermie, une analyse de cinq bâtiments distincts, dont deux bâtiments résidentiels et trois bâtiments tertiaires a été réalisée. Dans tous les scénarios techniques envisagés, qu'il s'agisse des sondes géothermiques verticales et des solutions de géothermie sur nappe, ces analyses démontrent des économies intéressantes par rapport aux solutions alternatives.

Sur la période de comparaison de 25 ans, ces économies cumulées sont supérieures aux coûts associés au remplacement de la pompe à chaleur géothermique, une nécessité qui survient généralement à la fin de cette période. Malgré des investissements initiaux substantiels, les installations de géothermie ont l'avantage de fonctionner avec des coûts opérationnels réduits.

Cet avantage devient de plus en plus pertinent compte tenu de la trajectoire ascendante des prix de l'énergie et de l'électricité. Par ailleurs, l'externalité principale de la climatisation par géothermie consiste à atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. Cela contribue par conséquent à une diminution du taux de mortalité pendant les périodes de températures élevées, ainsi qu'à une réduction de la morbidité et de la perte de productivité.

En prenant la ville de Paris comme exemple, l'analyse coûts-avantages sur 50 ans aboutit à une valeur actualisée nette (VAN) positive d'environ 875 millions d'euros. Ce résultat favorable est également mis en évidence par un ratio coût-avantage de 1,13 qui souligne les avantages de la mise en œuvre du refroidissement géothermique.

Éditeur : **AFPG**
77 rue Claude Bernard 75005 Paris

Directeur de la publication : **Jean-Jacques Graff**
Coordinateur du projet : **Zakhia Abi Raad**
Expertise technique / scientifique : **Xavier Moch**
Gestion de la publication : **Julie Cazal**
Graphisme et mise en page : **Philippe Lapointe**

L'AFPG remercie l'ensemble des contributeurs
et contributrices ayant permis la réalisation
de ce document.

Imprimé chez **ABSURDE Impression à Strasbourg.**

Dépôt légal : **avril 2024**

Table des matières

Résumé	3	Comparaison	21
Table des matières	5	Cas de la maison individuelle	21
Glossaire et nomenclature	6	Cas du Bâtiment collectif	22
Introduction	7	Cas du bâtiment de bureaux	23
Climatisation	7	Cas des centres commerciaux	23
Géothermie	7	Coût actualisé de l'énergie	24
Objectifs de l'étude	8	La géothermie comme solution pour la climatisation	25
Comparaison technico-économique entre les installations	9	Îlots de chaleur urbains et canicules	25
Méthodologie et hypothèses des besoins énergétiques	9	Santé et bien-être	28
Maison et logement collectif	9	Analyse coûts-bénéfices	29
Bureau	11	Coûts	29
Centre commercial	11	Bénéfices	31
Établissement de santé	12	Consommations électriques et émissions carbone	32
Méthodologie et hypothèses sur les coûts et les performances	12	Santé et bien-être	33
Hypothèses sur les coûts	12	Résultats	35
Hypothèses sur les performances	14	Modèles économiques proposés	37
Prix de l'énergie	16	Conclusion	39
Aides	16	Bibliographie	40
Coûts des installations géothermiques et alternatives	17		
Sondes géothermiques verticales	17		
Géothermie sur nappe	18		
Solution de gaz et climatiseurs monobloc dans le résidentiel	19		
Solutions de systèmes unités de toiture pour les bâtiments tertiaires	20		

Glossaire et nomenclature

Géocooling	Mode de fonctionnement de l'installation utilisant directement la capacité de refroidissement du fluide, sans utiliser la pompe à chaleur (qui est court-circuitée).
Aquifère	Formation géologique poreuse et perméable
PAC	Pompe à chaleur
SGV	Sondes géothermiques verticales
Système DRV	Débit de réfrigérant variable : une technologie de chauffage et de climatisation qui ajuste automatiquement le débit du fluide réfrigérant pour optimiser l'efficacité énergétique et le confort thermique.
Externalités	Les effets indirects d'une activité sur l'environnement ou la société. Les coûts cachés liés à la production ou à la consommation d'un certain bien.
Climatisation à tour aéroréfrigérante	Un système de refroidissement qui utilise une tour avec de l'air pour dissiper la chaleur générée par des processus industriels ou des systèmes de climatisation.
Stress thermique	La tension exercée sur le corps humain lorsque la température environnante dépasse sa plage de confort.
Canicule	Une période de chaleur excessive et prolongée, généralement accompagnée de températures élevées, qui peut avoir des conséquences néfastes sur la santé et l'environnement.
Confort thermique	La sensation de bien-être thermique d'une personne dans un environnement donné, qui dépend de facteurs tels que la température, l'humidité, la vitesse de l'air et les vêtements.

Introduction

Climatisation

La demande croissante de refroidissement connaît une expansion exponentielle à travers le monde, même dans des pays où la climatisation représente traditionnellement une part moins importante de la consommation énergétique globale des bâtiments. Plusieurs facteurs contribuent à cette tendance, tels que le changement climatique, les bâtiments mal conçus et la croissance économique. La France est également touchée par ce phénomène, un facteur important étant la fréquence croissante des vagues de chaleur qui se produisent dans le pays. En réalité, des études suggèrent que ces vagues de chaleur devraient continuer à augmenter en fréquence et en intensité tout au long du XXI^e siècle¹.

Pour faire face à cette demande croissante de climatisation, diverses mesures sont mises en place. Parmi celles-ci figurent des réglementations visant à rendre les bâtiments moins énergivores et à réduire leur empreinte carbone. Parallèlement, des efforts sont déployés pour développer des villes moins minérales en encourageant la végétalisation et la création d'espaces verts. Ces initiatives visent à atténuer les besoins en climatisation et à promouvoir des solutions durables.

Toutefois, malgré le caractère durable de ces approches, leur mise en œuvre peut être coûteuse et nécessite un temps considérable. En conséquence, de plus en plus de ménages et d'entreprises ont recours à l'installation de systèmes de refroidissement comme solution rapide et efficace. Selon le rapport de l'ADEME « La climatisation dans le bâtiment », cette situation a conduit à une augmentation significative du taux d'équipement en climatisation en France, avec un taux de pénétration de la climatisation dans les foyers atteignant 25% en 2020 et une consommation de climatisation entre 4 et 5 TWh par an qui devrait atteindre 12 TWh en 2050. Parallèlement, le secteur tertiaire avec 11 TWh par an de consommation d'énergie pour la climatisation affiche un taux moyen de climatisation de 40% de ses bâtiments, avec des variations notables entre ses différents secteurs².

Géothermie

La géothermie est une méthode de valorisation de l'énergie thermique naturellement présente dans le sol, qui devient ainsi une source d'énergie renouvelable pour la production d'électricité, le chauffage et le refroidissement. Cette forme d'énergie peut être classée en deux catégories principales selon la profondeur et les températures : la géothermie de surface et la géothermie profonde. Notre étude se concentre spécifiquement sur la géothermie de surface, qui exploite l'énergie dans le sol ou dans l'eau des nappes souterraines et à des profondeurs allant de quelques mètres jusqu'à 200 mètres. À ces faibles profondeurs, la température naturelle du sol reste relativement constante tout au long de l'année, variant entre 10 °C et 20 °C. Cette énergie peut être utilisée efficacement à l'aide d'une pompe à chaleur, offrant ainsi une source de chauffage et de refroidissement respectueuse de l'environnement largement disponible sur l'ensemble du territoire.

Objectifs de l'étude

En ce qui concerne le refroidissement, la grande majorité des systèmes de climatisation utilisent actuellement une technologie thermodynamique de cycle de réfrigération à compression de vapeur. Dans ce processus, la chaleur extraite du côté chaud du système doit être dissipée dans un autre milieu, qui est généralement l'air ambiant. Cette dissipation de chaleur dans l'atmosphère contribue de manière significative à l'effet d'îlot de chaleur urbain qui se réfère au phénomène où les zones urbaines emmagasinent la chaleur, entraînant des températures plus élevées par rapport aux zones environnantes présentant des climats similaires. Dans ce contexte, la géothermie offre une solution en permettant la dissipation de la chaleur dans le sol, évitant ainsi les effets d'îlot de chaleur urbain et contribuant à recharger le sous-sol, conduisant à une utilisation vertueuse de l'énergie géothermique.

Les objectifs de cette étude sont multiples :

- Réaliser une comparaison de cas d'étude pour évaluer les solutions géothermiques adaptées à des types spécifiques de bâtiments,
- Mener une analyse technico-économique afin de déterminer la faisabilité de l'utilisation de l'énergie géothermique comme alternative de refroidissement,
- Évaluer la viabilité économique des systèmes de refroidissement géothermiques et analyser les coûts associés,
- Identifier des externalités positives générées par l'énergie géothermique habituellement peu prises en compte dans l'évaluation économique de cette technologie,
- Réaliser une analyse coûts-bénéfices afin d'évaluer les avantages globaux de la mise en œuvre de systèmes de refroidissement géothermiques par rapport aux technologies de réfrigération traditionnelles qui dissipent l'air chaud dans l'atmosphère.

Comparaison technico-économique entre les installations

Méthodologie et hypothèses des besoins énergétiques

Afin d'estimer les coûts des installations géothermiques, il est essentiel de sélectionner des types de bâtiments représentatifs pour lesquels les besoins énergétiques sont connus. Étant donné que notre étude vise à mettre en évidence le rôle de la géothermie dans le domaine de la climatisation, il est également important de prendre en compte les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire afin de concevoir un système adapté et de le comparer à d'autres installations de chauffage et de climatisation.

Pour le secteur résidentiel constitué de 37,2 millions de logements d'environ 460 millions de mètres carrés³, les besoins énergétiques moyens d'une maison individuelle et d'un logement collectif vont être estimés. Quant au secteur tertiaire qui comprend plusieurs sous-secteurs d'activité, l'étude se concentre sur trois types de bâtiments identifiés dans le rapport de l'ADEME « La climatisation dans le bâtiment » publié en 2021, comme représentant la plus grande surface climatisée et également la plus grande consommation d'énergie². Ces sous-secteurs seront le secteur des bureaux, des commerces et les établissements de santé.

Maison et logement collectif

Les besoins en chaud et en froid pour les logements résidentiels dépendent largement de la qualité de l'enveloppe du bâtiment et de ses caractéristiques thermiques, et ces besoins varient massivement selon la localisation du logement. Comme le montre la figure 1 ci-après, la réglementation thermique RT2012 a mis en place 8 zones climatiques en fonction des températures en période hivernale (H1, H2, et H3) et températures estivales (a, b, c et d).

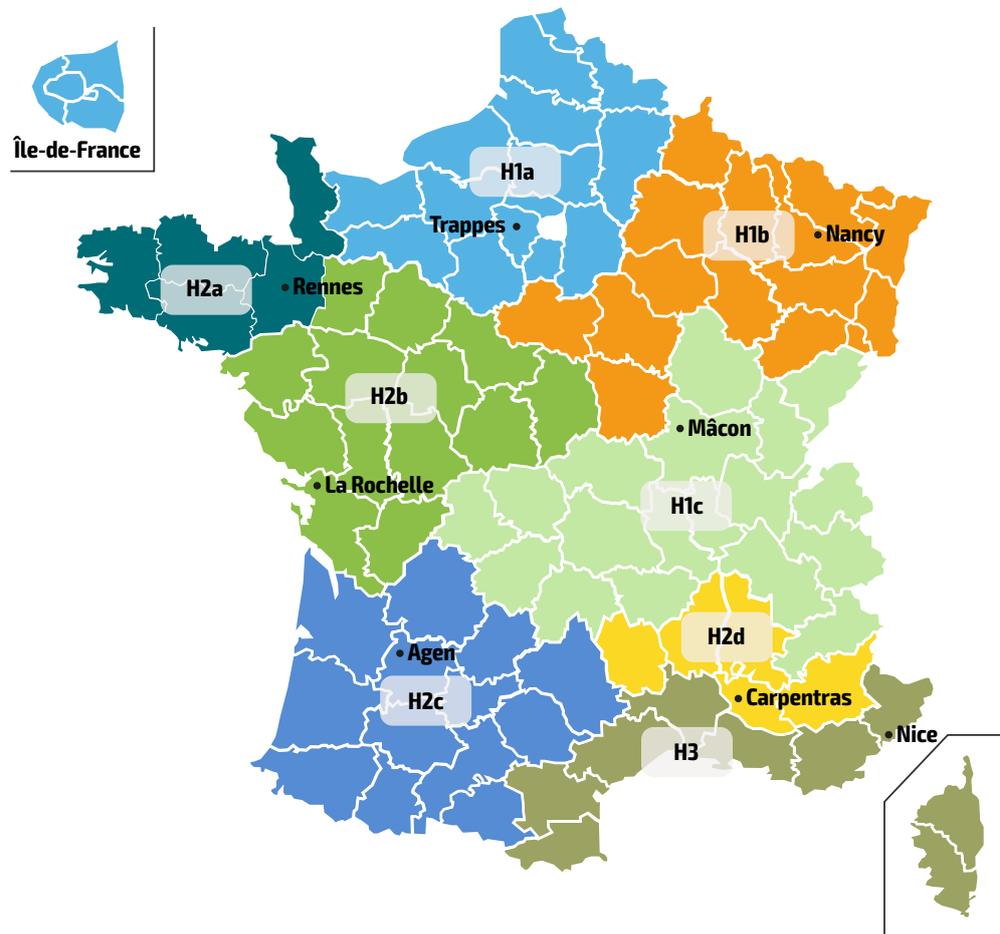


Figure 1 Zones climatiques en France

À la suite de l'analyse de plusieurs documents sur les besoins énergétiques des logements ainsi que sur les puissances des pompes à chaleur vendues dans le secteur résidentiel, et après échanges avec un comité de professionnels, les caractéristiques suivantes ont été retenues :

	Maison	Logement collectif
Surface	100 m ²	1 000 m ²
Besoins thermiques (Chauffage + ECS)	12 MWh/an	100 MWh/an
Puissance thermique	7 kW	50 kW
Besoin de froid	2 MWh/an	18 MWh/an
Puissance de climatisation	5 kW	30 kW

Tableau 1 Caractéristiques des bâtiments résidentiels

Bureau

Le secteur des bureaux est le sous-secteur du tertiaire qui consomme le plus d'énergie, avec une superficie totale de plus de 243 millions de m² et une consommation annuelle d'énergie de plus de 33 TWh⁴. Les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire pour les bureaux sont similaires aux besoins de climatisation, tout comme les puissances requises.

Les bureaux se déclinent en différentes tailles, allant des petites agences à des bâtiments de moins de 1000 m², des surfaces comprises entre 1000 et 5000 m², ainsi que des bâtiments de plus de 5000 m². En fonction de leur répartition, la surface pondérée d'un bureau type est présentée dans le tableau ci-dessous, accompagnée des autres données pertinentes.

	Bureau
Surface	2 400 m ²
Besoins thermiques (Chauffage + ECS)	155 MWh/an
Puissance thermique	110 kW
Besoin de froid	140 MWh/an
Puissance de climatisation	110 kW

Tableau 2 Caractéristiques du bureau

Centre commercial

Les centres commerciaux sont des établissements particuliers car ils ont des besoins à la fois en chauffage et en refroidissement pour assurer le confort des occupants, ainsi que des besoins spécifiques en froid actif pour des utilisations telles que la réfrigération. Leurs besoins de chauffage et de climatisation sont similaires en termes de puissance et d'énergie consommée. Quant à leurs besoins industriels en froid actif, ils sont estimés à environ 480 kWh/m². Les caractéristiques d'un centre commercial type sont données dans le tableau ci-après.

	Centre commercial
Surface	3 500 m ²
Besoins thermiques (Chauffage + ECS)	420 MWh/an
Puissance thermique	110 kW
Besoin de climatisation	420 MWh/an
Puissance de climatisation	110 kW
Besoin de froid actif	1 680 MWh
Puissance de froid actif	190 kW

Tableau 3 Caractéristiques du centre commercial

Établissement de santé

Pour cette étude, un Établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes (EHPAD) a été sélectionné comme exemple d'un bâtiment de santé. Les données énergétiques issues d'un exemple d'EHPAD alimenté par la géothermie⁵, sont présentées ci-dessous.

	EHPAD
Surface	4 240 m ²
Besoins thermiques (Chauffage + ECS)	260 MWh/an
Puissance thermique	185 kW
Besoin de climatisation	24 MWh/an
Puissance de climatisation	185 kW

Tableau 4 Caractéristiques de l'EHPAD

Méthodologie et hypothèses sur les coûts et les performances

Hypothèses sur les coûts

La partie relative à l'investissement des projets de géothermie comprend principalement les coûts des études de faisabilité (étude du sous-sol et étude thermique du bâtiment), des forages et du raccordement, de la pompe à chaleur et de son installation, ainsi que les coûts de maintenance annuelle. Il est important de souligner que ces coûts peuvent varier considérablement en raison de plusieurs facteurs notamment liés à la nature du sous-sol. Il conviendra de prendre la solution géothermique plus intéressante économiquement pour le projet.

Quelle que soit la nature de l'opération envisagée et la puissance géothermique recherchée, il est recommandé de faire appel à l'expertise d'un bureau d'études spécialisé en thermique (pour la partie bâtiment) et en géosciences (pour la partie sous-sol). Cela permettra de choisir la solution géothermique la mieux appropriée en tenant compte des spécificités de chaque projet.

Dans le cadre de cette étude, deux solutions géothermiques sont envisagées : les sondes géothermiques verticales (SGV) et la géothermie sur aquifère, également appelée géothermie sur nappe ou aquathermie. Toutefois, il convient de noter qu'il existe d'autres solutions disponibles pour les installations résidentielles qui peuvent répondre aux besoins en chauffage et climatisation à l'image des échangeurs compacts ou encore des échangeurs horizontaux pour les maisons bien isolées.

Comme mentionné précédemment, les coûts associés à ces solutions peuvent varier considérablement. Les coûts des forages, par exemple, peuvent différer selon le type de roches forées, la profondeur, le débit, et la région, avec des variations pouvant aller du simple au double. Cette grande disparité des coûts rend essentielle la réalisation d'une analyse approfondie pour estimer les coûts des installations proposées.

Pour cette raison, en plus de collecter les différents coûts d'exploitation en sollicitant les acteurs de la filière, une analyse a été réalisée sur les projets de géothermie sur sondes et sur nappes soutenus par le Fonds Chaleur – un dispositif de l'État français, géré par l'ADEME, qui finance le développement de la production de chaleur renouvelable. Cette analyse a permis d'évaluer les coûts des installations dans le secteur tertiaire (bureau, centre commercial, EHPAD), car elles répondent aux critères du Fonds Chaleur. Ces critères exigent une production minimale de 25 MWh/an pour les installations sur sondes, et de 25 ou 50 MWh/an pour les installations sur nappe (selon l'année du dépôt de la demande).

Les coûts analysés correspondent aux projets réalisés au cours des années 2021 et 2022. Ce choix est lié à des changements significatifs dans les prix de l'énergie et du niveau de l'inflation par rapport aux années précédentes. Les fluctuations des prix de l'énergie et l'impact de l'inflation peuvent exercer une influence importante sur les coûts des projets géothermiques. Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte les conditions actuelles du marché lors de l'analyse et de l'évaluation des projets de géothermie.

Les deux figures ci-après montrent l'évolution des coûts selon la puissance installée pour des projets de géothermie sur sondes puis sur nappe.

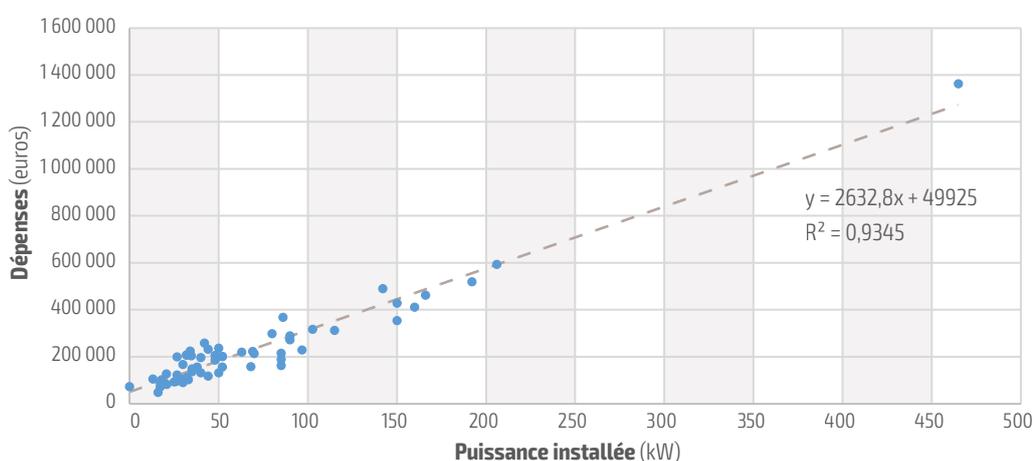


Figure 2 Coût des projets de SGV et puissance installée

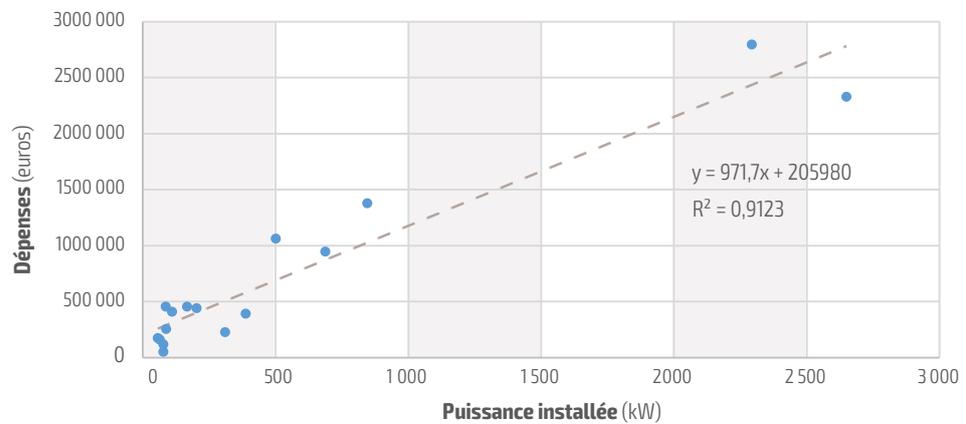


Figure 3 Coût des projets de géothermie sur nappes et puissance installée

Hypothèses sur les performances

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur est le rapport entre l'énergie utile ou restituée et l'énergie consommée, qui est l'électricité dans ce cas. Il s'agit d'un indicateur important pour évaluer la performance de la pompe à chaleur en mode chauffage. Plus le COP est élevé, plus la pompe à chaleur est efficace et capable de produire de la chaleur à partir d'une quantité réduite d'énergie électrique consommée.

Pour mesurer la performance de la pompe à chaleur en termes de refroidissement, on calcule le EER (Energy Efficiency Ratio) qui est le rapport entre l'énergie utile ou la chaleur absorbée et l'énergie fournie à la pompe à chaleur. Il mesure la performance de la pompe à chaleur en termes de refroidissement. Un EER élevé indique que la pompe à chaleur peut absorber une quantité plus importante de chaleur en utilisant une quantité d'énergie électrique donnée.

Enfin, on introduit le concept du géocooling qui est l'utilisation de la fraîcheur naturelle du sol pour le rafraîchissement direct d'un bâtiment par bypass de la pompe à chaleur lorsque les conditions du sol le permettent. Le fonctionnement du géocooling est assuré par une pompe de circulation à très faible consommation permettant d'obtenir des performances élevées en termes de fonctionnement. Dans cette étude, il est considéré que le rafraîchissement par géocooling assure 80% des besoins en froid pour le secteur résidentiel (maison et appartement) et 50% pour le secteur tertiaire.

Les hypothèses de COP et d'EER utilisées dans cette étude sont répertoriées dans le tableau ci-dessous. Ces hypothèses sont basées sur des consultations des fiches de produits auprès des principaux fournisseurs de pompes à chaleur du marché, conformément à la norme EN 14511.

Performances	Sondes verticales	Géothermie sur aquifère
COP (B0/W35)	4,5	-
COP (W10/W45)	-	6
EER (B20/W7)	6	-
EER (W20/W7)	-	7
EER - Géocooling	30	30

Tableau 5 Performances retenues des PAC géothermiques

La durée de vie des systèmes géothermiques dans le sous-sol doit être de 50 ans et plus lorsque les étapes de conception sont faites conformément à la NF EN 17522. Au regard des tests de vieillissement, les professionnels estiment souvent que cette durée de vie devrait être supérieure à 100 ans pour les sondes : à notre connaissance, on ne posait pas encore de sondes géothermiques il y a un siècle, raison pour laquelle cette hypothèse ne peut être confirmée par constat. Elle est issue d'études suisses basées sur l'analyse de l'usure d'anciennes sondes qui ne sont plus utilisées. En ce qui concerne les pompes à chaleur, leur durée de vie moyenne est estimée à 26,7 ans, avec un écart-type de 4,7 ans d'après une étude en Suisse⁶. Par conséquent, dans le cadre de cette étude, les solutions géothermiques et alternatives seront étudiées de manière conservatoire sur une période de 25 ans, sans prendre en compte le renouvellement des installations pendant cette période. Cette valeur permettra de simplifier l'analyse « Levelized Cost of Energy », dont l'approche se fera sur 50 ans.

Hypothèses des solutions alternatives

Les solutions alternatives ont été sélectionnées afin de pouvoir comparer les performances et les coûts des installations géothermiques avec celles des solutions couramment utilisées sur le marché.

Dans le secteur résidentiel, 62% des logements sont chauffés par des solutions non électriques selon un rapport de RTE sur la consommation de ce secteur⁷. Cette étude a pris en compte l'utilisation de chaudières à gaz à haute efficacité (98%) pour le chauffage, ainsi que des climatiseurs monoblocs pour la climatisation.

Pour les bureaux, un système d'unité de toiture (rooftop) a été choisi pour assurer à la fois le refroidissement et le chauffage. De plus, un système rooftop associé à une chaudière à gaz a été retenu pour répondre aux besoins de l'EHPAD en chaud et en froid, ainsi que pour l'eau chaude sanitaire (ECS).

En ce qui concerne le centre commercial, les besoins de chauffage et de climatisation sont satisfaits par un système rooftop tandis que pour les besoins de refroidissement actif, un groupe d'eau glacée a été utilisé.

Les données de performance des équipements choisis sont basées sur l'examen des fiches techniques des différentes options disponibles, sachant qu'elles répondent aux besoins spécifiques de chaque cas. Cette approche permet de s'assurer que les données de performance utilisées dans cette étude reflètent les capacités réelles des équipements sélectionnés. Elles sont résumées dans le tableau ci-après.

Performances	Climatiseur monobloc	Système rooftop	Groupe d'eau glacée
COP (A7-A35)	-	3,3	-
EER	2,8	2,9	2,9

Tableau 6 Données de performance par type d'équipement

Prix de l'énergie

Les tarifs utilisés dans cette étude et détaillées dans le tableau ci-après, correspondent aux tarifs proposés par les principaux acteurs du marché en 2023. Il convient de noter que ces tarifs ont été établis après les importantes hausses des prix du gaz et de l'électricité, en raison notamment du conflit en Ukraine. Et pour tous les contrats choisis, l'option heures creuses est prise avec une répartition de la consommation de 60% pendant les heures pleines et 40% pendant les heures creuses.

Dans cette étude, les coûts d'abonnement d'électricité ont été omis car ils sont indépendants de la solution choisie. Cela permet de se concentrer davantage sur les coûts variables et spécifiques à la mise en œuvre des solutions géothermiques.

De plus, l'inflation des coûts de l'énergie et de la maintenance a été prise en compte dans toutes les simulations de l'étude. Les valeurs retenues pour cette inflation sont de +4 % par an pour les coûts de l'énergie et de +1 % par an pour le coût de la maintenance. Ces augmentations annuelles permettent de tenir compte de l'impact de l'inflation sur les coûts opérationnels au fil du temps.

Coûts d'énergie	Maison	Logement collectif	Bureau et EHPAD	Centre commercial
Tarif TTC heures pleines (€/kWh)	0,2228	0,2228	0,1801	0,40278
Tarif TTC heures creuses (€/kWh)	0,1615	0,1615	0,1433	0,22423
Coût Abonnement Gaz (€/an)	250	113		
Gaz (€/kWh)	0,1054	0,1054		

Tableau 7 Tarifs de l'énergie

Aides

Les aides prises en compte dans cette étude sont MaPrimeRénov pour l'installation d'un système de géothermie dans les maisons, et le Fonds Chaleur pour les installations dans les appartements collectifs et les bâtiments tertiaires.

Pour la maison, il est considéré que le ménage a des revenus intermédiaires, ce qui donne droit à une aide de 5000 € selon MaPrimeRénov.

Pour les aides du Fonds Chaleur, toutes les installations proposées répondent aux critères requis, tels qu'une production minimale d'énergie renouvelable, un nombre minimal d'heures de fonctionnement à puissance nominale et un COP minimum. Les taux d'aides sur 20 ans sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Aides sur 20 ans Production entre 25 et 2 000 MWh EnR/an	Sondes verticales	Géothermie sur aquifère
Production de chaud (€/MWh EnR/an)	50	25
Production de froid (€/MWh EnR/an)	13	13
Production de froid par géocooling (€/MWh EnR/an)	13	13

Tableau 8 Taux d'aides du Fonds Chaleur

Coûts des installations géothermiques et alternatives

Les coûts complets des solutions de production d'énergie en géothermie, en gaz et en aérothermie sont détaillés dans les 4 tableaux qui suivent.

Sondes géothermiques verticales

	Maison	Bâtiment collectif	Bureau	Centre commercial	EHPAD
Puissance de PAC (kW)	7	50	110	310	185
Besoins en chauffage + ECS (MWh)	12	84	154	420	260
Besoins en froid passif (MWh)	1,4	14	69	209	12
Besoins en froid actif (MWh)	0,4	4	69	1 885	12
Longueur des sondes (ml)	109	778	1 711	7 237	2 878
Investissement initial (€)					
Partie sous-sol	12 000	105 000	232 000	630 000	390 000
Investissement surface (PAC + ingénierie)	23 000	65 000	112 000	250 000	150 000
Total	35 000	170 000	344 000	880 000	540 000
Maintenance en € / an					
Contrat d'entretien PAC (TTC)	150	350	550	1 000	700
Fonctionnement en € / an					
Electricité Chaud	505	3 701	5 660	30 853	11 456
Electricité Froid Actif	12	118	1 901	104 100	397
Electricité Géocooling	9	94	380	2 313	66
TOTAL Chaud + Froid	527	3 914	7 941	137 267	11 919
Aides (€)					
MaPrimeRénov'	5 000	-	-	-	-
Fonds Chaleur	-	69 291	142 448	200 000	206 166

Tableau 9 Coûts de la solution SGV pour les différents bâtiments

Géothermie sur nappe

	Bâtiment collectif	Bureau	Centre commercial	EHPAD	
Puissance de PAC (kW)	50	110	310	185	
Besoins en chauffage + ECS (MWh)	84	154	419	260	
Besoins en froid passif (MWh)	14	69	209	12	
Besoins en froid actif (MWh)	4	69	1 885	12	
Débit de la nappe [m ³ /h]	10	20	50	30	
Investissement initial (€)					
Partie sous-sol	50 000	173 000	212 000	201 000	
Investissement surface (PAC + ingénierie)	65 000	112 000	250 000	150 000	
Total	115 000	285 000	462 000	351 000	
Maintenance en € / an					
Contrat d'entretien PAC (TTC)	350	550	1 000	700	
Maintenance sous-sol P2 (entretien)	1 800	3 400	5 400	3 900	
TOTAL	Maintenance (TTC)	2 150	3 950	6 400	4 600
Fonctionnement en € / an					
Electricité Chaud	2 776	4 245	23 140	8 592	
Electricité Froid Actif	101	1 630	89 229	340	
Electricité Géocooling	94	380	2 313	66	
Electricité pour pompe immergée	616	1 823	19 225	3 039	
TOTAL	Chaud + Froid	3 464	7 713	120 674	11 913
Aides (€)					
Fonds Chaleur	39 045	88 528	210 000	112 572	

Tableau 10 Coûts de la solution géothermie sur nappe pour les différents bâtiments

Solution de gaz et climatiseurs monobloc dans le résidentiel

Gaz

	Maison	Bâtiment Collectif
Puissance (kW)	7	50
Besoins en chaud (MWh)	11	84
Investissement initial (€)		
Chaudière à gaz	4 500	11 785
Raccordement chauffage et ECS + Pose	2 150	7 070
Coût total investissement	6 650	18 855
Rendement chaudière à gaz	0,98	0,98
Fonctionnement et Maintenance (€)		
Maintenance / an	150	560
Abonnement /an	250	113
Tarif €/kWh	0,1054	0,10532
Coût Gaz / an	1 233	9 017
Coût total par an (€)	1 633	9 689

Climatiseurs Monobloc

	Maison	Bâtiment Collectif
Puissance (kW)	2,4	72
Besoins de froid (MWh)	2	18
Durée de vie (ans)	10	10
EER	2,8	2,8
Investissement initial (€)		
Prix d'une unité	1 090	1 090
Prix total	2 180	16 350
Fonctionnement en € / an		
Electricité	127	1 271

Solutions de systèmes unités de toiture pour les bâtiments tertiaires

Bureaux

Puissance Thermique (kW)	110
Besoins Thermiques (MWh)	154
Puissance en froid (kW)	110
Besoin en froid (MWh)	138

Rooftop

Puissance Chaud (kW)	110
Puissance Froid (kW)	122
COP	3,28
EER	2,86

Investissement initial (€)

Prix du système	75 630
Installation et autre	22 690
Total	98 318

Fonctionnement en € / an

Electricité Chaud	7 774
Electricité Froid	7 977
Entretien / an	750

Solution Refroidisseur - Froid Industriel

Puissance de Froid (kW)	200
EER	2,9

Investissement initial (€)

Prix système CVC	75 629
Installation du système	22 689
Prix refroidisseur	55 000
Installation et main d'œuvre	8 250
Total	161 568

Fonctionnement en € / an

Electricité Chaud	42 317
Electricité Froid CVC	48 531
Electricité Froid Industriel	191 448
Maintenance	1 500

Centre commercial

Puissance chauffage (kW)	110
Besoins chauffage (MWh)	419
Puissance en froid CVC (kW)	110
Besoin en froid (MWh)	419
Puissance en froid indust. (kW)	200
Besoin en froid indust. (MWh)	1 676

Solution Rooftop - Besoins CVC

Puissance Chaud (kW)	108
Puissance Froid (kW)	122
COP	3,28
EER	2,86

Puissance chauffage (kW)	185
Besoins chauffage (MWh)	180
Puissance ECS (MWh)	35
Besoins ECS (MWh)	80
Puissance en froid (kW)	185
Besoin en froid (MWh)	24

Rooftop + Chaudière Gaz

Puissance Chaud (kW)	177
Puissance Froid (kW)	187
COP	3,27
EER	2,97
Chaudière Gaz Puissance (kW)	35
Rendement	0,98

Investissement initial (€)

Prix du système RT	65 000
Installation et autre RT	13 000
Prix de la chaudière	5 500
Total	83 500

Fonctionnement en € / an

Electricité Chauffage	10 914
Electricité Froid	1 602
Gaz ECS	8 598
Maintenance Rooftop	700
Maintenance Chaudière	50

Comparaison

Dans cette partie, les coûts cumulés des solutions géothermiques et des solutions de comparaison sont présentés sur une période de 25 ans. Ces coûts comprennent à la fois les coûts initiaux d'investissement et les coûts de fonctionnement, qui englobent la consommation d'électricité ou de gaz ainsi que les frais de maintenance. L'objectif est d'évaluer les coûts totaux des différentes options sur une période significative afin de pouvoir comparer leur rentabilité à long terme et d'établir ainsi le moment où le seuil de rentabilité est atteint.

Cas de la maison individuelle

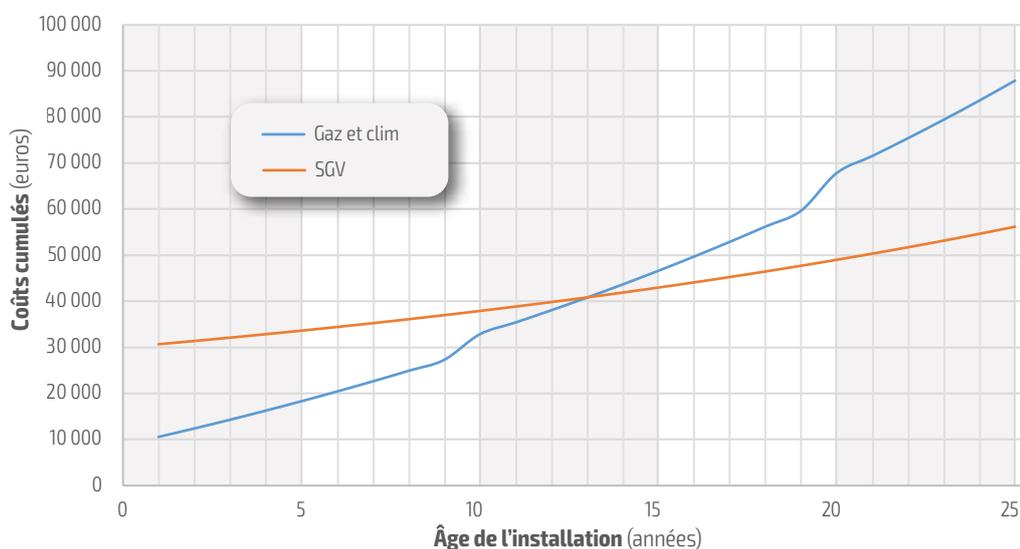


Figure 4 Coûts cumulés pour la maison

Dans le cas d'une maison individuelle, les figures ci-dessus montrent que la solution de sondes géothermiques devient plus rentable que la solution d'une chaudière à gaz et de deux climatiseurs monoblocs après 13 ans. Les décrochages chaque 10 ans pour la solution gaz/clim sont dus aux nouveaux investissements pour les climatiseurs. Sur la durée de vie du système géothermique, principalement la pompe à chaleur (prise ici à 25 ans pour des raisons pratiques, cf. paragraphe ci-avant), les économies directes peuvent s'élever à près de 30 000 €, montant supérieur au coût de remplacement de la pompe à chaleur. Cela met en évidence les avantages économiques à long terme de l'utilisation de la géothermie pour le chauffage et la climatisation d'une maison individuelle.

Cas du bâtiment collectif

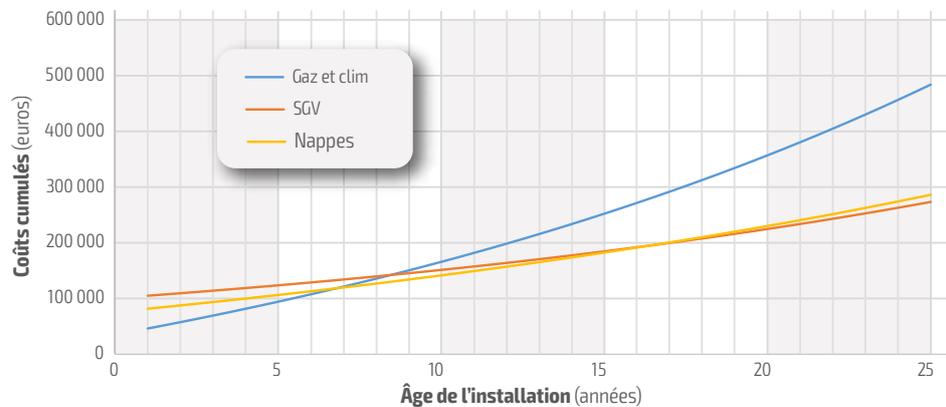


Figure 5 Coûts cumulés pour un bâtiment collectif

Les solutions de géothermie deviennent plus rentables que la solution alternative après seulement 7 ans pour la solution de géothermie sur nappe et 9 ans pour la solution des sondes géothermiques, ce qui représente une durée considérablement réduite par rapport à la maison individuelle.

Cas du bâtiment de bureaux

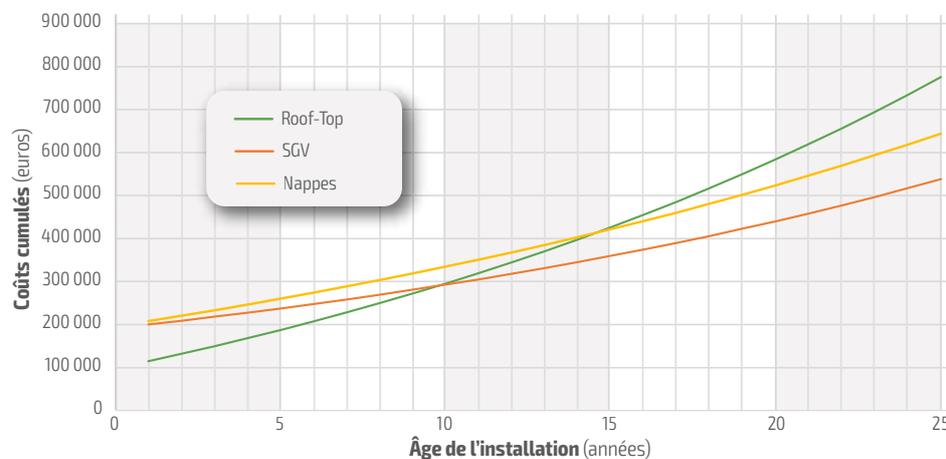


Figure 6 Coûts cumulés pour un bâtiment de bureaux

Les deux solutions géothermiques offrent une alternative rentable à la solution de comparaison. Après une période de 25 ans, la solution des sondes géothermiques permet d'économiser jusqu'à 230 000 € par rapport à la solution de comparaison, tandis que la solution de géothermie sur aquifère permet d'économiser jusqu'à 130 000 €. Dans ce cas encore, ces montants sont supérieurs au coût de renouvellement de la pompe à chaleur. Ces économies significatives mettent en évidence les avantages financiers à long terme de l'utilisation de la géothermie comme solution de chauffage et de climatisation.

Cas des centres commerciaux



Figure 7 Coûts cumulés pour un centre commercial

Les économies réalisées grâce à l'utilisation de la géothermie sont considérables, représentant près de la moitié du coût de la solution alternative. Cela est particulièrement remarquable dans le cas d'un centre commercial, où la demande de refroidissement est élevée. Grâce à une installation géothermique, les coûts de refroidissement sont considérablement réduits, en particulier avec une solution de géothermie sur aquifère si elle est disponible à l'emplacement du centre commercial.

Cas de l'EHPAD

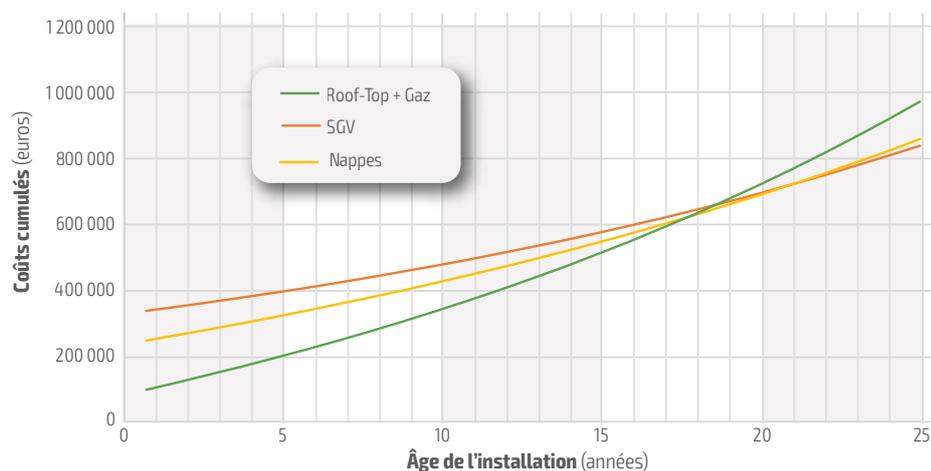


Figure 8 Coûts cumulés pour un EHPAD

Pour le cas de l'EHPAD, les solutions géothermiques deviennent économiquement viables après 18 ans, ce qui représente une période légèrement plus longue que les autres cas précédents. Toutefois, il convient de noter que cette analyse ne tient pas compte des prêts disponibles à des taux très réduits, ce qui pourrait rendre les solutions géothermiques encore plus rentables. Les prêts à taux avantageux peuvent considérablement réduire les coûts initiaux et raccourcir la période de retour sur investissement.

Coût actualisé de l'énergie

Le coût complet moyen de production d'un mégawattheure d'énergie (LCOE) géothermique est un indicateur essentiel pour évaluer la rentabilité de cette technologie, car il prend en compte l'ensemble des coûts d'énergie sur toute la durée de vie des équipements. Cet indicateur est également utile dans la partie suivante de l'étude pour calculer les coûts de l'énergie afin de la comparer avec les bénéfices attendus. Le LCOE a été calculé pour chaque cas étudié afin d'obtenir une évaluation précise des coûts de production de l'énergie géothermique.

La formule de coût actualisé de l'énergie est :

$$\text{LCOE} = \frac{I_0 + \sum_1^n \frac{M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_1^n \frac{Q_t}{(1+r)^t}}$$

où I_0 : Investissement initial (€)

M_t et F_t : Coût de maintenance (€) et coût de fonctionnement (€) de l'année t respectivement.
Une dépense égale au prix de la PAC va être ajoutée à cette partie durant la 25^e année.

Q_t : Production énergétique de l'année t (MWh),
cette production est supposée constante

r : Taux d'actualisation, à savoir 4%, qui est le taux généralement utilisé pour les projets EnR

n : Durée de vie de l'installation fixée à 50 ans pour les installations de SGV et de nappe

LCOE	Maison	Appartements collectifs	Bureau	Centre commercial	EHPAD
SGV (€/MWh)	179	120	82	71	133
Géothermie sur nappe (€/MWh)	-	111	87	65	118

Tableau 11 Coût actualisé de l'énergie des installations géothermiques

La géothermie comme solution pour la climatisation

Dans la partie précédente, la viabilité technique et économique de la géothermie en tant que solution pour climatiser et chauffer les bâtiments a été mise en évidence. Comme mentionné précédemment, les coûts de refroidissement par géothermie sont directement liés aux coûts globaux, car le forage constitue une étape nécessaire et coûteuse, indépendamment de l'usage final de la géothermie. Cette section de l'étude se concentre désormais sur la mise en évidence des avantages quantitatifs et qualitatifs de la climatisation par géothermie, en examinant également un exemple de l'analyse coûts-bénéfices de la géothermie.

La climatisation par géothermie offre des avantages directs et évidents par rapport aux solutions de climatisation couramment utilisées, telles que les climatiseurs monoblocs, les climatiseurs mobiles, les systèmes DRV, etc. Ces avantages sont notamment une réduction de la consommation énergétique grâce au géocooling et/ou aux performances élevées des pompes à chaleur géothermiques, qui sont favorisées par les températures relativement constantes dans le sous-sol et moins élevées en été par rapport à la température de l'air extérieur. En outre, cette réduction de la consommation entraîne naturellement une réduction des émissions de carbone liées à la climatisation par géothermie.

Par ailleurs, la majorité des solutions de climatisation commerciales sont fondées sur le cycle frigorifique, qui repose sur le principe de prendre la chaleur du milieu chaud que l'on souhaite climatiser pour la rejeter dans un autre milieu. Dans la plupart des solutions conventionnelles, ce milieu est l'air atmosphérique. En revanche, pour la géothermie, le rejet de chaleur se fait dans le sous-sol, offrant ainsi un avantage supplémentaire qui est de réduire les externalités liées aux rejets de chaleur dans l'atmosphère. Cela permet notamment de limiter les effets d'îlot de chaleur urbain, qui ont des conséquences négatives sur le bien-être des citoyens en augmentant les températures dans les zones urbaines densément peuplées.

Îlots de chaleur urbains et canicules

L'urbanisation a des effets significatifs sur les conditions climatiques urbaines, notamment en raison de la densité de constructions, des revêtements de sol tels que les rues, et des sources anthropiques de chaleur telles que les émissions d'air chaud provenant des automobiles, des industries et des systèmes de climatisation. Ces facteurs contribuent à l'effet d'îlot de chaleur urbain, caractérisé par des températures plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones avoisinantes.

De plus, le changement climatique aggrave ces effets d'îlot de chaleur en exacerbant les températures élevées. En effet durant les canicules à Paris, les températures dans le centre-ville sont plus élevées de 8°C que les alentours. De plus, ces phénomènes de vagues de chaleur deviennent de plus en plus fréquents en France avec une probabilité croissante qu'elles surviennent une ou deux fois par an

d'ici la fin du siècle. Elles sont également susceptibles de devenir plus longues et plus intenses, en évoluant de 5 à 8 jours vers 10 jours¹.

Pour ces raisons, il est essentiel d'examiner attentivement les causes des îlots de chaleur urbains et de trouver des solutions pour réduire leur impact. Dans cette étude, nous nous concentrons particulièrement sur la contribution des climatiseurs à ce phénomène en raison de leurs rejets de chaleur et leurs consommations électriques. De plus, nous nous intéressons au rôle potentiel que la géothermie peut jouer pour atténuer les effets de la surchauffe urbaine.

Une étude menée principalement par le Laboratoire de génie des procédés pour l'environnement, l'énergie et la santé et publiée en 2012 a fait l'analyse des effets des climatiseurs sur la température de l'air extérieur à Paris⁸. Dans l'étude, plusieurs critères importants ont été considérés comme les données météorologiques, les types d'utilisation du sol (bâtiments, parcs, agriculture, source d'eau, etc.), les données des bâtiments (comme le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues qui est un facteur très important pour calculer les apports solaires), et les propriétés thermiques et radiatives des routes, des murs et des toits.

De plus, l'étude a classifié le rejet de l'air chaud des climatiseurs en trois catégories : les tours de refroidissement par évaporation, les tours de refroidissement à air sec, et les petits systèmes de refroidissement à air sec. Avec une température intérieure fixée à 26°C, quatre scénarios ont été étudiés et comparés à un scénario de référence sans climatisation. Le premier scénario représente la situation actuelle de climatisation, tandis que le deuxième scénario suppose que toute la chaleur dégagée l'est sous forme de chaleur sensible. Le troisième scénario suppose que les installations de climatisation sont doublées et que toute la chaleur est rejetée dans l'atmosphère sous forme de chaleur sensible. Enfin, le dernier scénario suppose les mêmes installations doublées, mais avec l'hypothèse que tout le rejet de chaleur est réalisé dans le sous-sol ou dans la Seine.

Les résultats mettent en évidence que, dans les scénarios où le rejet de chaleur dans l'atmosphère est présent en raison des climatiseurs, les températures extérieures sont plus élevées, tant le jour que la nuit, par rapport au scénario de référence sans climatisation. Ceci concerne les trois premiers scénarios et s'observe en figure 9. Même si l'origine des îlots de chaleur urbains est principalement dû aux structures urbaines, le rejet de chaleur joue fréquemment un rôle non négligeable dans l'augmentation de la température extérieure et la formation de ces îlots de chaleur, avec une contribution à l'augmentation des températures comprise entre +0.7°C et +4°C dans l'étude. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études menées dans différentes localités telles que l'Arizona aux États-Unis⁹, Berlin¹⁰, et Hong Kong¹¹.

Nous pouvons également constater que l'augmentation des températures extérieures liées aux installations de climatisation peut atteindre 2,5°C à 3°C dans les quartiers commerciaux, du fait d'une forte présence de climatiseurs classiques. Cette augmentation de température est significativement moins importante dans les zones desservies par des réseaux de froid, ce qui met en avant l'intérêt de leur utilisation dans la lutte contre les îlots de chaleur.

Cet effet causé par les réseaux de froid est également mis en évidence dans les résultats du scénario 4 (No release) où la chaleur est totalement rejetée dans le sol ou dans la Seine. Ce scénario est associé à une réduction des effets des îlots de chaleurs avec une légère diminution de la température par rapport au scénario de référence (de -0,5°C à -0,25°C) observée dans les zones où l'installation de climatiseurs est courante, notamment dans les zones commerciales très fréquentées. Ainsi, on parvient à réduire l'impact des îlots de chaleur urbains et à créer des conditions plus confortables pour les habitants de ces zones¹².

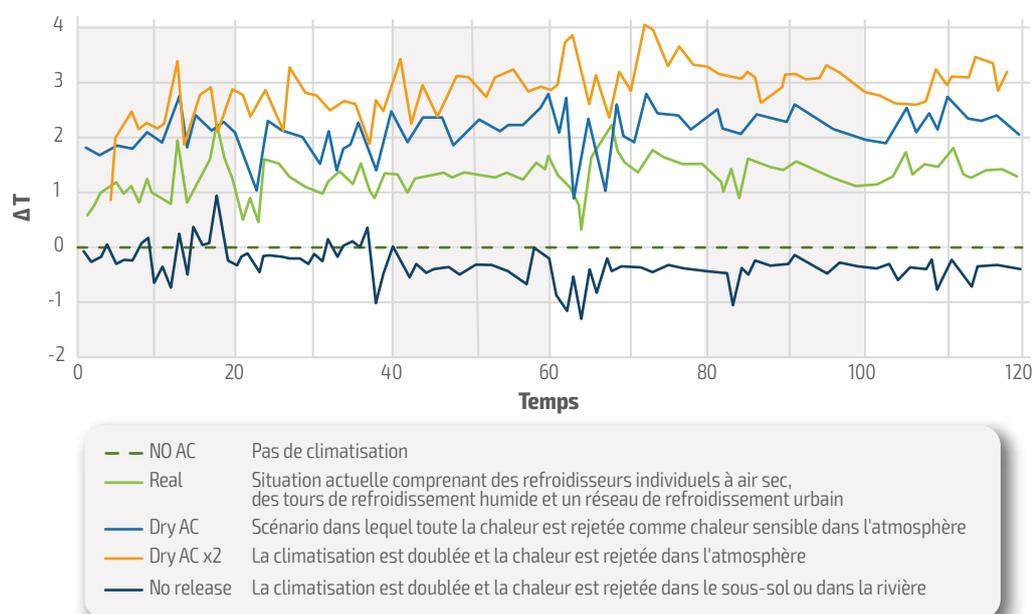


Figure 9 Variation de la température extérieure en fonction de chaque scénario, par rapport à un scénario « sans climatisation » (référence $\Delta T=0$)

Ainsi, l'utilisation de la climatisation à tour aéroréfrigérante sèche contribue à augmenter la température des rues, ce qui engendre un besoin accru de climatisation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur renforcé. Les quartiers où la climatisation à tour aéroréfrigérante sèche est plus répandue sont particulièrement impactés par cet effet¹³. Or, une autre étude menée en 2020 sur la ville de Paris a analysé les effets des climatiseurs sur la température extérieure durant les périodes des canicules et a constaté également une augmentation significative de la consommation électrique¹⁴. Selon cette étude, en utilisant une hypothèse très optimiste d'un taux de rendement énergétique saisonnier des climatiseurs de 12 à 15, la consommation électrique dans la ville augmenterait de 1,134 TWh à cause de la climatisation.

Par ailleurs, l'étude a simulé des solutions ambitieuses d'atténuation et d'adaptation face aux vagues de chaleur, telles que la reconfiguration urbaine avec davantage d'espaces verts, le renforcement des réglementations thermiques des bâtiments et les changements de comportement des individus. Toutefois, les résultats obtenus ont révélé que ces mesures ne suffisaient pas à éliminer le stress thermique causé en l'absence d'utilisation de climatiseurs. Par conséquent, il est de plus en plus probable que la climatisation soit largement utilisée à l'avenir à Paris et dans les grandes villes densément peuplées.

Tous les résultats présentés renforcent l'idée de l'utilisation de la géothermie comme solution de climatisation, où le rejet de chaleur dans le sol ou dans l'eau devient une approche pertinente et bénéfique. En optant pour ces solutions, on parvient à atténuer l'effet des îlots de chaleur urbains et à maintenir des températures plus modérées, offrant ainsi un environnement plus confortable aux habitants des zones concernées. Ces avantages environnementaux, combinés aux économies d'énergie et aux coûts réduits sur le long terme, font de la géothermie une option attrayante pour la climatisation des bâtiments, tant du point de vue de la durabilité que de l'efficacité économique.

Santé et bien-être

Les canicules entraînent des répercussions variées sur la santé, allant de la fatigue et des crampes de chaleur à la déshydratation et aux coups de chaleur. Ces effets entraînent des altérations fonctionnelles qui rendent difficile l'exécution de tâches demandant un effort physique ou de la précision. Par conséquent, les vagues de chaleur sont généralement associées à une baisse de productivité et à une augmentation de la mortalité. Les dépenses de santé liées aux canicules représentent un aspect significatif de l'impact économique global, avec des conséquences importantes sur les activités de production et le secteur touristique. L'impact économique des canicules reste un sujet largement sous-exploré, même à l'échelle internationale.

Durant les trois périodes de canicules en 2022, Santé Publique France a estimé une surmortalité de 2816 décès soit +16,7 %, ainsi que plus de 20 000 recours aux soins. Les personnes âgées de 75 ans et plus sont la tranche de population la plus durement touchée¹⁵. Une étude menée en Chine sur les impacts de la température dans les zones urbaines a également révélé une augmentation de 4,5 % du taux d'hospitalisation pour chaque augmentation de 1 °C au-dessus de 29 °C¹⁶.

Par ailleurs, une étude publiée par Santé Publique France et l'Université Aix-Marseille a estimé que les conséquences sanitaires des canicules sur la période de 2015 à 2020 représentaient un coût économique de 22 ou de 37 milliards d'euros, selon la méthodologie choisie, dont 6 milliards sont attribués à la restriction de l'activité et la perte de bien-être¹⁷. Selon une étude menée à Adélaïde en Australie, un scénario climatique très pessimiste (RCP8.5) entraînera non seulement une augmentation du taux d'hospitalisation liée aux vagues de chaleur, mais également une augmentation de la durée d'hospitalisation et des coûts associés¹⁸.

En outre, il est bien connu que les températures élevées peuvent avoir un impact significatif sur la productivité des travailleurs. Lorsque la température dépasse les 24-26°C, la productivité commence à ralentir, et à 33-34°C, elle chute de manière significative, jusqu'à 50%¹⁹. Ce phénomène est connu sous le nom de « stress thermique », qui se produit lorsque la chaleur excessive dépasse la capacité du corps à tolérer les températures d'ambiance sans subir d'altérations physiologiques. Les effets du stress thermique sur la productivité ne se limitent pas aux travailleurs qui passent beaucoup de temps à l'extérieur. Des études suggèrent que même les travailleurs de bureau peuvent être affectés, et cela peut être dû à divers facteurs, y compris les difficultés de sommeil pendant les nuits chaudes précédant les journées de travail et l'effet de la chaleur lors des trajets vers le lieu de travail²⁰.

Afin d'améliorer les conditions sanitaires pendant cette période critique, il est essentiel de garantir un niveau de confort thermique adéquat dans les bâtiments tout en réduisant l'exposition des citoyens à l'air chaud émanant des climatiseurs. Les hautes températures exacerbées par les effets des îlots de chaleur peuvent entraîner une diminution de la productivité et du bien-être des individus lors de leurs déplacements ou de leurs activités en extérieur.

Des solutions de climatisation renouvelables sont nécessaires pour atteindre ces objectifs, notamment en évitant l'utilisation de l'air atmosphérique comme dissipateur de chaleur. En optant pour des approches telles que la géothermie, on atténue les effets des îlots de chaleur et on réduit, à défaut de supprimer, l'exposition des citoyens aux hautes températures. De telles approches contribuent ainsi à un environnement plus sain et confortable pour tous.

Analyse coûts-bénéfices

Après avoir examiné qualitativement les externalités positives de la géothermie en tant que solution de climatisation, il est important d'effectuer une analyse coûts-bénéfices à plus grande échelle, dépassant les installations individuelles telles que celles étudiées dans la partie technico-économique. Cette analyse permettra de quantifier les avantages de la géothermie en utilisant des hypothèses basées sur les données disponibles. Une approche plus globale de l'analyse coûts-bénéfices permettra ainsi de considérer l'impact à l'échelle d'une ville, d'une région, voire d'un pays, en prenant en compte les économies d'énergie, les réductions d'émissions de carbone, les améliorations de la qualité de vie issues de la réduction des effets des îlots de chaleurs.

Le choix de la ville de Paris pour cette analyse est justifié par plusieurs facteurs importants. Tout d'abord, Paris est une ville de grande importance économique, politique et culturelle, ce qui en fait un cas d'étude significatif pour évaluer l'impact de la géothermie sur une zone urbaine majeure. En outre, Paris dispose de données énergétiques et de santé bien documentées. Un autre facteur clé est la présence d'études antérieures sur les îlots de chaleur urbains (ICU) à Paris. Ces études ont fourni des informations essentielles sur les effets des îlots de chaleur dans la ville. La comparaison coûts-bénéfices est menée sur 25 ans afin d'être en ligne avec les ambitions de décarbonisation en 2050.

Coûts

Selon un rapport de l'Atelier Parisien d'Urbanisme (Apur) publié en 2019, les besoins en froid des bâtiments parisiens sont estimés entre 2 et 3 TWh/an actuellement. Cette estimation devrait augmenter à environ 3,5 à 4 TWh/an en tenant compte à la fois des évolutions climatiques et de l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments dans les prochaines années²¹. En parallèle, le réseau de froid de Paris, nommé «Fraîcheur de Paris», fournit actuellement environ 456 GWh/an pour répondre aux besoins de climatisation. Des plans sont en cours pour développer ce réseau afin d'atteindre une livraison de 1 TWh par an d'énergie frigorifique d'origine renouvelable provenant de la Seine d'ici 2050.

Dans cette analyse, nous allons supposer que les demandes de climatisation restent constantes, avec une valeur de 3,5 TWh par an, tandis que le réseau de froid de Paris continue de fournir 456 GWh/an. Par conséquent, les besoins de climatisation à satisfaire par la géothermie seraient de 3,04 TWh par an. L'objectif est donc de calculer les coûts associés à la satisfaction de cette demande en utilisant la géothermie pour la climatisation.

D'après les données publiées dans le rapport de RTE, qui estime les consommations totales en climatisation et les classes selon le type de secteurs, nous pouvons répartir les pourcentages de consommation pour les 5 cas déjà présentés dans cette étude, en les estimant comme pourcentage de la demande totale de climatisation à Paris²². Cela nous permettra d'avoir une vision plus détaillée de la répartition de la demande de climatisation entre les différents secteurs et d'identifier les

potentiels besoins en géothermie pour chacun d'eux. Cette répartition est décrite dans la figure 10 et le tableau 12 ci-après.

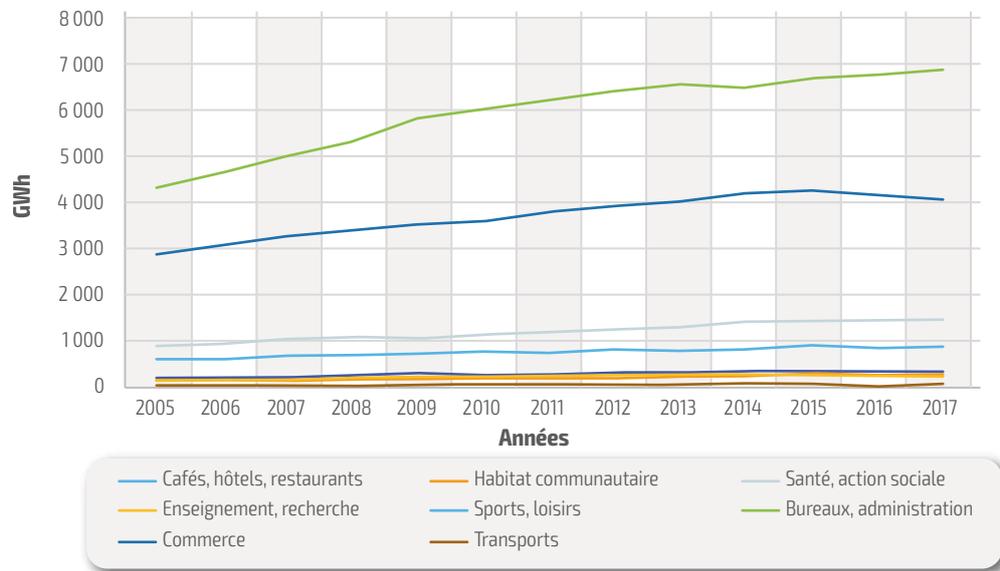


Figure 10 Consommation de climatisation dans le secteur tertiaire entre 2005 à 2017

Avec cette répartition, la demande totale de climatisation à Paris est répartie entre chaque type de bâtiment. Cela permet d'obtenir un nombre équivalent de bâtiments climatisés pour chaque catégorie.

Type de bâtiment	Besoins unitaires du type [MWh]	% du besoin total de froid	Paris	
			Besoins de froid [GWh]	Nbr équivalent de bâtiments
Particulier	2	2%	61	34 107
Collectif	18	6%	183	10 232
Bureaux	138	48%	1 461	10 592
Centre commercial	2 094	28%	852	407
EHPAD	24	16%	487	20 293

Tableau 12 Répartition des besoins de climatisation selon le type de bâtiment

En supposant que la moitié des besoins de climatisation est satisfaite par les installations géothermiques sur sondes et l'autre moitié par la géothermie sur nappe, à l'exception des particuliers qui sont considérés à 100% avec des installations sur sondes, les coûts sur 25 ans sont calculés et tabulés ci-dessous :

Bâtiment	LCOE [€/MWh]		Besoins sur 25 ans [GWh]		Coût d'énergie [€]	
	SGV	Nappes	SGV	Nappes	SGV	Nappes
Particulier	179	-	1 522	-	273 137 760	-
Collectif	120	111	2 283	2 283	274 034 232	254 370 962
Bureaux	82	87	18 264	18 264	1 501 590 864	1 597 558 888
Centre commercial	71	65	10 654	10 654	759 715 378	690 080 661
EHPAD	133	118	6 088	6 088	810 277 588	720 887 047

Tableau 13 Coûts de la climatisation de Paris par géothermie

Alors le coût total pour une climatisation par géothermie à Paris sur 25 ans est **6 881 653 379 €**.

Bénéfices

Les bénéfices quantifiés dans cette analyse sont principalement liés à la réduction de la consommation d'énergie grâce aux performances plus élevées des solutions géothermiques par rapport aux systèmes de climatisation conventionnels. Cette réduction de la consommation d'énergie entraîne également une diminution des émissions de carbone, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. De plus, les autres bénéfices sont ceux qui se produisent en raison de la réduction des effets causés par les îlots de chaleur : réduction de la mortalité, de l'hospitalisation durant les jours chauds, et de la perte de productivité.

Consommations électriques et émissions carbone

Les consommations électriques des installations géothermiques sont basées sur les mêmes hypothèses que celles prises dans la première partie de l'étude. Les installations sur sondes géothermiques ont un EER de 6, tandis que les installations sur nappe ont un EER de 7. Les taux de géocooling sont également les mêmes pour chaque type de bâtiments, avec un EER de 30. Afin d'estimer les économies réalisées grâce à la géothermie, ces consommations sont comparées aux consommations électriques des solutions aérothermiques mentionnées précédemment, qui ont des EER entre 2,75 et 3. D'autre part les autres hypothèses prises sont :

- Prix moyen de l'électricité : 0,2029 €/kWh
- Taux CO₂ par kWh produit : 56 gCO₂/kWh
- Taxe Carbone : 53,5 €/tonneCO₂

	Consommation électrique annuelle [GWh]	Émissions carbone annuelle [tCO ₂]
Solutions alternatives	1354	75 845
Géothermie : 50% SGV - 50% aquifère	281	15 758
Différence par an	1 073	60 087
Bénéfices par an [€]	224 468 096 €	3 214 658 €

Tableau 14 Bénéfices de la climatisation par géothermie

Comme ces installations assurent également le chauffage, leurs bénéfices sont eux aussi présentés ci-dessous :

	Consommation électrique annuelle [GWh]	Émissions carbone annuelle [tCO ₂]
Solutions alternatives	2 523	141 284
Géothermie : 50% SGV - 50% aquifère	1 630	91 307
Différence par an	892	49 977
Bénéfices par an [€]	186 699 578 €	2 673 766 €

Tableau 15 Bénéfices du chauffage par géothermie

Santé et bien-être

Les bénéfices présentés dans cette partie proviennent principalement de la réduction des effets des îlots de chaleur grâce à la climatisation par géothermie. La méthodologie utilisée pour quantifier ces bénéfices est similaire à celle utilisée dans une étude coûts-bénéfices réalisée en Autriche²³. L'étude avait pour objectif de quantifier les bénéfices des méthodes d'adaptation urbaine, notamment en développant des espaces verts pour réduire les effets des îlots de chaleur.

Le point principal de l'étude en Autriche repose sur la réduction du nombre de jours chauds, et les bénéfices qui en découlent. Dans l'étude, une simulation dynamique des villes étudiées a été effectuée en utilisant différents types de données tels que des données météorologiques, des données sur la mortalité quotidienne, des données sur la population et d'autres méthodes pour quantifier les effets de l'îlot de chaleur urbain.

Dans cette étude, en raison de contraintes de ressources, une approche simplifiée pour estimer le nombre de jours chauds réduits grâce à la climatisation par géothermie a été retenue. Cette estimation est effectuée en comparant les températures estivales des années 2016 à 2022 entre Paris et l'aéroport de Paris-Beauvais. Beauvais est une ville située au nord de Paris, qui possède un climat similaire mais peut être considérée comme dépourvue de tout effet d'îlot de chaleur.

L'hypothèse considérée est que les jours chauds affectés par les îlots de chaleur correspondent aux jours où la température maximale à Paris dépasse 30°C et la différence entre la température maximale de Paris et de Beauvais est supérieure à 1,5°C. La comparaison aboutit à une moyenne de 6 jours chauds par an à Paris. Étant donné que les quartiers avec une forte concentration de climatiseurs sont également ceux qui accueillent la majorité des logements et des activités commerciales et économiques, il semble raisonnable d'estimer que l'utilisation généralisée de la géothermie permettrait de réduire de moitié les effets néfastes des îlots de chaleur sur la santé et le bien-être.

Bien que cette approche simplifiée ne permette pas de prendre en compte toute la complexité des îlots de chaleur urbains, elle permet tout de même d'estimer de manière approximative les avantages de la climatisation par géothermie en termes de réduction des journées chaudes et de l'exposition des citoyens aux températures élevées.

Selon le bulletin de Santé Publique France de 2022, la surmortalité en Île-de-France due aux périodes caniculaires s'élève à 325 personnes, dont 92 à Paris. Le taux de réduction de la surmortalité est calculé en utilisant la formule²⁴ ci-dessous :

$$\sum_{c=1}^n D_{red, c} = \frac{AF \times TD}{Y \times Pop_{tot}} \times \frac{HD_{red, c} \times Pop_c}{HD_{avg, c}}$$

où **AF** : Fraction attribuable des décès dus à la chaleur.
Source : Santé Publique France – **AF** = 0,28

TD : Nombre total de décès sur la période dans une ville.
Source : Santé Publique France – **TD** = 92

Y : Nombre total d'années dans la période – **Y** = 1

Pop_{tot} : Population moyenne totale – **Pop_{tot}** = 2 145 906

HD_{red} : Nombre réduit de journées chaudes – **HD_{red}** = 6

Pop_c : Population affectée – **Pop_c** = 2 145 906

HD_{avg} : Nombre annuel moyen de jours chauds – **HD_{avg}** = 17

Selon cette formule, la surmortalité causée par les effets des îlots de chaleur urbains est de 9 décès par an à Paris. Selon notre hypothèse, la réduction grâce à l'adoption de la géothermie serait de 4 à 5 décès par an. Pour quantifier ce bénéfice, une approche utilisant la valeur d'une vie (VSL) de la Commission européenne a été choisie. La VSL représente la valeur qu'une société est prête à dépenser pour éviter une augmentation de la mortalité d'une personne. En France, cette valeur est estimée à 3 170 000 €²⁵. Ainsi, le bénéfice total de la réduction de la surmortalité est estimé à 14 406 531 € par an.

La réduction des hospitalisations a été calculée selon la méthodologie suivante. Les données relatives aux hospitalisations ont été extraites du rapport de Santé Publique France, en incluant le nombre de passages aux urgences et les coûts moyens. Un taux de réduction de 28 % a été appliqué, similaire à celui utilisé pour la réduction de la surmortalité. Les valeurs détaillées sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Coûts directs		
Passages urgence	115	Hyperthermie, coup de chaleur, déshydratation
Coût moyen	151 €	Sans hospitalisation
Actes SOS Médecins	18	Coup de chaleur et déshydratation
Coût moyen consultation SOS Médecins	48 €	
Hospitalisation	63	52% des passages aux urgences
Coût moyen d'hospitalisation	3 866 €	Hospitalisation pour causes respiratoires
Coûts directs totaux sur 1 an	130 005 €	
Coûts indirects		
Salaire moyen journalier brut	104,2 €	
Nbr de jours perdus pour passage aux urgences	1	
Nbr de jours perdus pour hospitalisation	134	
Composante intangible - passage aux urgences	267 €	Consentement à payer pour éviter un épisode morbide
Composante intangible - hospitalisation	1 454 €	
Coûts indirects totaux sur 1 an	674 289 €	

Tableau 16 Bénéfices de la réduction de l'hospitalisation durant les canicules

Enfin, la réduction de la perte de productivité est calculée selon la formule ci-dessous, utilisée dans une étude de 2008 en Allemagne pour quantifier les coûts du changement climatique sur la santé et la productivité²⁶.

$$GRP_{loss} = HD \times \frac{GRP + \left(\frac{p}{1-p} \times GRP \right)}{365} \times w \times p \times Pop$$

où **HD** : Nombre réduit de journées chaudes - **HD** = 6

GRP : Produit régional brut actuel par habitant - **GRP** = 57 600 €

p : Pourcentage de perte de productivité durant les journées chaudes - **p** = 7% ²⁷

w : Partage de la valeur ajoutée - **w** = 59 %
C'est le rapport entre les coûts des mains d'œuvre et le PIB nominal.

Pop : Population - **Pop** = 2 145 906

La réduction de la perte de productivité est ainsi évaluée à 45 115 801 €/an dans notre étude.

Résultats

Les bénéfices, supposés constants pour 25 ans, sont actualisés avec un taux d'actualisation de 4% correspondant au taux utilisé pour les projets sociaux et politiques de la transition énergétique.

Bénéfices actualisés sur 25 ans	
Réduction de mortalité	234 062 381 €
Réduction d'hospitalisation	2 112 188 €
Réduction du temps passé à l'hôpital	10 955 153 €
Réduction de la perte de productivité	732 994 753 €
Économie de refroidissement	3 646 924 885 €
Réduction des émissions carbone	95 669 012 €
Économie de chauffage	3 033 301 158 €
Bénéfices totaux	7 756 019 530 €

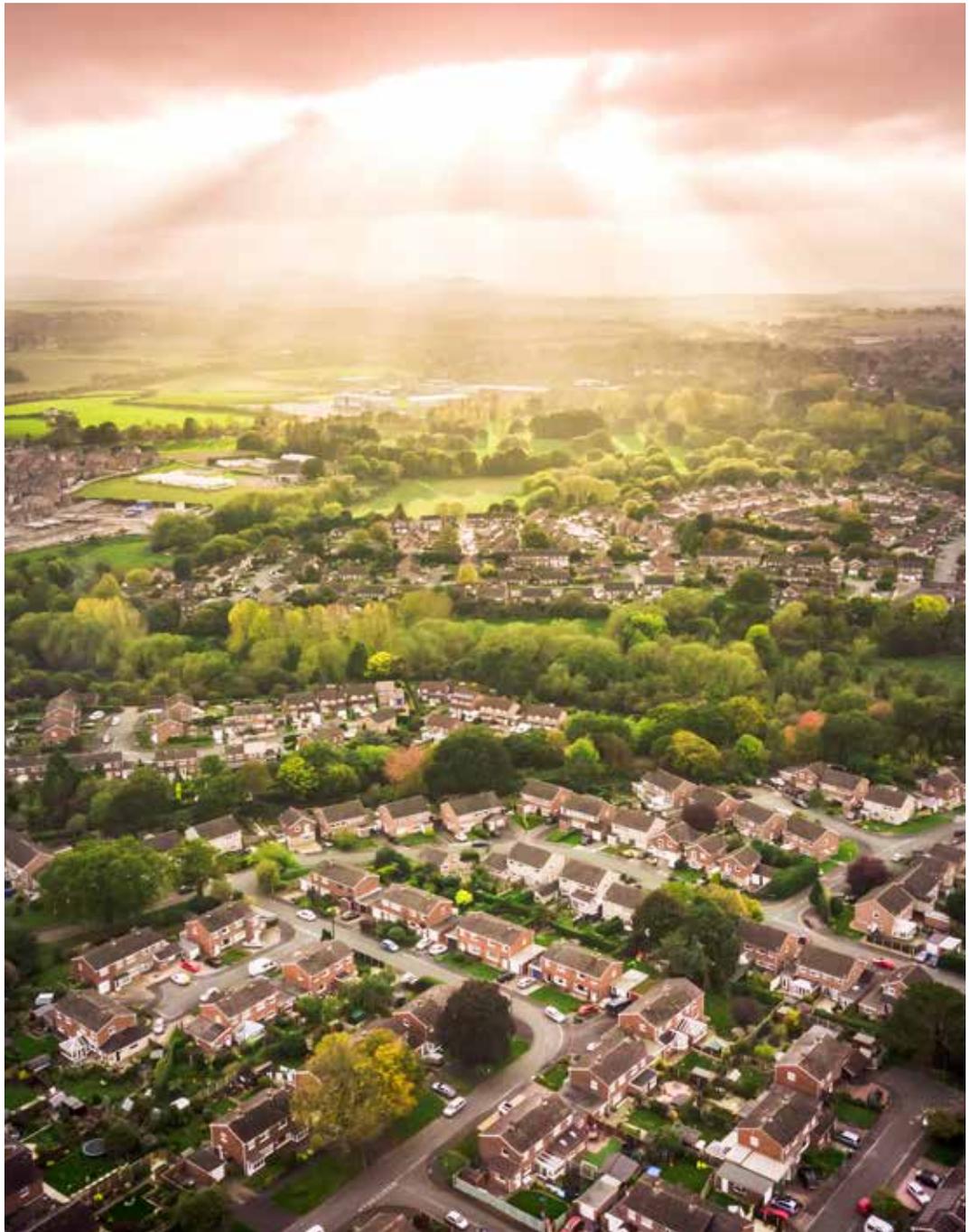
Tableau 17 Bénéfices actualisés

Avec des coûts totaux de 6 881 653 319 €, le projet a une valeur actuelle nette de **874 366 211 €** : il est profitable avec un **ratio de bénéfices coûts de 1,13**.

Cette analyse coûts-bénéfices met en évidence le rôle de la géothermie et ses effets positifs comme moyen de climatisation. Les résultats peuvent certainement être affinés en fonction de nouvelles découvertes, de données et d'estimations plus précises.

En outre, un aspect important à prendre en compte est que toutes les installations géothermiques sont supposées individuelles, et peuvent donc être coûteuses en raison des frais de forage et d'installation qui sont supportés pour chaque bâtiment. En revanche, les réseaux de froid géothermique offrent un avantage significatif, car les coûts élevés de forage et d'installation sont répartis entre tous les utilisateurs du réseau, ce qui permet de réduire les coûts pour chaque utilisateur et donc les coûts totaux.

De plus, bien que des études scientifiques spécifiques ne soient pas encore disponibles dans ce domaine, on peut anticiper une augmentation de la valeur immobilière dans les quartiers bénéficiant de ces améliorations, accompagnée d'un impact positif sur le tourisme pendant les périodes estivales.



Modèles économiques proposés

Cette étude a démontré la faisabilité des installations géothermiques de climatisation dans différents secteurs. Cette faisabilité a mis en évidence leur compétitivité économique et les bénéfices sociétaux qu'elles peuvent apporter. Cependant, il est important de noter que les besoins de froid en France sont en constante augmentation. Selon un rapport de la FEDENE sur les réseaux de chaleur et de froid, ces besoins pourraient passer de 19 TWh en 2022 à 34 TWh en 2050²⁸.

Face à cette augmentation prévisible des besoins de froid, il est nécessaire d'avoir une sensibilisation à la géothermie pour les collectivités locales, en mettant en premier lieu les consommations réduites et stables dans le temps des solutions géothermiques face à la hausse constante des prix de l'énergie.

Par ailleurs, les collectivités locales et les autorités publiques de santé ont tout intérêt à développer la géothermie dans les quartiers où les climatiseurs sont largement utilisés ou ont un potentiel d'installation, étant donné la croissance de la demande liée à l'urbanisation et à l'augmentation des températures estivales. Cette stratégie présente des avantages considérables pour réduire les effets des îlots de chaleur urbains et prévenir la détérioration de la santé et du bien-être des habitants lors des périodes de fortes chaleurs.

En outre, une forte concentration des besoins de refroidissement dans une zone commerciale ou résidentielle est une opportunité pour développer les réseaux de froid géothermique à l'échelle locale. Les utilisateurs (résidences, centres commerciaux, musées, bureaux, etc.) peuvent bénéficier d'une solution de refroidissement efficace et abordable mutualisée pour un grand nombre de personnes. Les coûts d'installation peuvent être partagés entre plusieurs utilisateurs, ce qui rend la géothermie plus accessible et économiquement avantageuse pour les résidents des quartiers concernés.

En France, les réseaux de froid installés ont une capacité totale de 1,4 GW, et une tendance pour le développement de ces réseaux est particulièrement remarquable dans les zones commerciales ayant une demande suffisante, ainsi que dans les zones résidentielles du sud du pays. Avec 34 % de ces réseaux utilisant des nappes géothermiques et 10 % utilisant de l'eau de mer²⁸, l'énergie géothermique occupe déjà une position significative sur le marché. Cela établit un fort potentiel pour le développement ultérieur de l'énergie géothermique en tant que solution principale pour les systèmes de réseaux de froid.

La boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG) est une autre solution collective très polyvalente. Elle répond efficacement aux besoins de chauffage et de refroidissement en utilisant des thermofrigopompes ou des pompes à chaleur géothermiques eau/eau. La BETEG est particulièrement adaptée aux bâtiments où les besoins en chaud et en froid sont similaires, ou aux zones où les utilisateurs ont différents besoins d'énergie durant la même période de l'année.

Un des atouts majeurs de la BETEG est sa capacité à valoriser l'énergie à partir de différentes sources. Elle peut exploiter la chaleur naturelle du sous-sol en utilisant des sondes géothermiques verticales ou des nappes phréatiques. De plus, elle a la capacité de récupérer l'énergie des eaux usées, des rivières ou même de la mer.

La flexibilité des installations BETEG permet de les adapter à une variété de bâtiments et de sites géographiques. De plus, leur capacité à desservir plusieurs bâtiments à partir d'une seule installation centralisée contribue à réduire les coûts et à optimiser l'utilisation de l'énergie géothermique.

Une étude technique de la BETEG est disponible sur le site web de l'AFPG : www.afpg.asso.fr



Conclusion

La comparaison des coûts avec les hypothèses prises, la revue scientifique sur les externalités, ainsi que l'analyse coûts-bénéfices, ont mis en évidence les avantages de l'utilisation de l'énergie géothermique pour répondre aux besoins de climatisation. Ces avantages vont au-delà des simples économies venant de la réduction de la consommation d'électricité, car l'adoption de la géothermie à grande échelle peut offrir aux villes diverses externalités positives, principalement la réduction de l'effet des îlots de chaleur urbains.

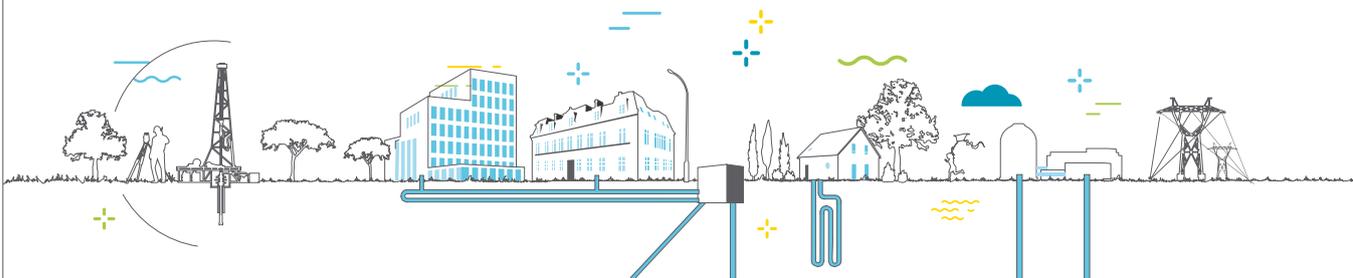
Les résultats de cette étude peuvent certainement être affinés davantage avec des données plus précises, mais les grandes tendances sont visibles. À mesure que la technologie continue de progresser et que le secteur se développe, les bénéfices du refroidissement géothermique deviendront probablement encore plus évidents. Des résultats améliorés pourraient également être obtenus si l'accès aux données sources et aux informations concernant les études menées sur les externalités était obtenu. Cela pourrait permettre à l'AFPG de réaliser des simulations de modélisation dynamique sur des villes spécifiques, afin de prévoir avec plus de précision l'impact positif de la climatisation avec la géothermie dans un endroit donné, et facilitant ainsi l'extrapolation des résultats à d'autres zones urbaines.

Enfin, cette étude apporte une contribution importante à la compréhension du rôle de la géothermie dans le secteur de la climatisation, en mettant en lumière ses avantages dans les bâtiments individuels et son potentiel pour une adoption à grande échelle. Les défis rencontrés dans l'étude montrent la nécessité d'une meilleure précision des données, mais les perspectives de développement de la filière géothermique sont très positives et pourraient jouer un rôle transformateur dans la conception de solutions de climatisation durables pour l'avenir.

Bibliographie

1. Lemonsu A, Viguié V, Daniel M, Masson V. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Clim*. 2015;14:586–605.
2. ADEME. La climatisation dans le bâtiment. 2021.
3. INSEE. Le nombre de logements. 2021.
4. OID. La Barometre Performance Energetique et Environnementale des Batiments. Observatoire de l'Immobilier Durable; 2019.
5. Le journal Energies renouvelables. Etablissement d'hébergement pour les personnes âgées dépendantes ou autre établissement de santé. 2023;
6. Hubbuch M, Vecsei P. Coûts du cycle de vie des pompes à chaleur (traduit de l'allemand). Available from: https://geothermie-schweiz.ch/wp_live/wp-content/uploads/2019/09/Bericht_LCC_EWS_2.pdf
7. RTE. Groupe de travail « consommation d'électricité ». 2019.
8. Tremeac B, Bousquet P, Munck C de, Pigeon G, Masson V, Marchadier C, et al. Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Appl Energy*. 2012;95:102–10.
9. Salamanca F, Georgescu M, Mahalov A, Moustauoui M, Wang M. Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *J Geophys Res Atmospheres*. 2014;119:5949–65.
10. Jin L, Schubert S, Salim MH, Schneider C. Impact of Air Conditioning Systems on the Outdoor Thermal Environment during Summer in Berlin, Germany. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17.
11. Wang Y, Li Y, Di Sabatino S, Martilli A, Chan PW. Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environ Res Lett*. 2018;13.
12. C. de Munck, G. Pigeon, F-E. Meunier, B. Tréméac, P., Bousquet, M. Merchat, P. Poeuf et C. Marchadier. *Projet CLIM2 Climat urbain et climatisation*. 2010.
13. Takane Y, Kikegawa Y, Hara M, Grimmond CSB. Urban warming and future air-conditioning use in an Asian megacity: importance of positive feedback. *Npj Clim Atmospheric Sci*. 2019;2:39.
14. Viguié et al. Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. Vincent Viguié *Al 2020 Env Res Lett* 15 075006.
15. Santé publique France. Bilan canicule et santé: un été marqué par des phénomènes climatiques multiples et un impact sanitaire important [Internet]. 2022 Nov. Available from: <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2022/bilan-canicule-et-sante-un-ete-marque-par-des-phenomenes-climatiques-multiples-et-un-impact-sanitaire-important>

16. Chan EYY, Goggins WB, Yue JSK, Lee P. Hospital admissions as a function of temperature, other weather phenomena and pollution levels in an urban setting in China. *Bull World Health Organ.* 2013;91:576–84.
17. Adélaïde L, Chanel O, Pascal M. Évaluation monétaire des effets sanitaires des canicules en France métropolitaine entre 2015 et 2020. *Bull Epidémiol Hebd.* 2021;(12):215–23. 2021; Available from: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/documents/article/evaluation-monetaire-des-effets-sanitaires-des-canicules-en-france-metropolitaine-entre-2015-et-2020>
18. Wondmagegn BY, Xiang J, Dear K, Williams S, Hansen A, Pisaniello D, et al. Increasing impacts of temperature on hospital admissions, length of stay, and related healthcare costs in the context of climate change in Adelaide, South Australia. *Sci Total Environ.* 2021;773:145656.
19. Organisation internationale du Travail. Travailler sur une planète PLUS CHAUDE [Internet]. 2020. Available from: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_712010.pdf
20. Zander K, Oppermann E, Kjellstrom T, Garnett S. Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nat Clim Change.* 2015;5:647–51.
21. Apur. LES BESOINS EN FROID DES BÂTIMENTS PARISIENS. 2019.
22. RTE. La consommation du secteur tertiaire. RTE; 2019.
23. Johnson D, See L, Oswald SM, Prokop G, Krisztin T. A cost–benefit analysis of implementing urban heat island adaptation measures in small- and medium-sized cities in Austria. *Environ Plan B Urban Anal City Sci.* 2021;48:2326–45.
24. Gasparini A, Leone M. Attributable risk from distributed lag models. *BMC Med Res Methodol.* 2014;14:55.
25. Téhard B, Detournay B, Borget I, Roze S, De Pourville G. Value of a QALY for France: A New Approach to Propose Acceptable Reference Values. *Value Health.* 2020;23:985–93.
26. Hübler M, Klepper G, Peterson S. Costs of climate change. *Ecol Econ.* 2008;68:381–93.
27. Vöhringer F, Vielle M, Thurm B. Assessing the impacts of climate change for Switzerland. 2017;
28. FEDENE. Enquête des Réseaux de Chaleur et de Froid. 2022.



LES GUIDES TECHNIQUES AFPG



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

www.afpg.asso.fr

77 rue Claude Bernard
75005 PARIS

09 81 64 74 12
contact@afpg.asso.fr