

La géo-énergie, l'oubliée du mix énergétique français ?

Quentin Barral*, Alice Chougnnet-Sirapian*

Mots-clés : renouvelables, neutralité carbone, rénovation énergétique, résilience, transition énergétique

Avec le dérèglement climatique, la prise en compte du confort d'été dans la rénovation des bâtiments devient essentielle. Pour cela, exploiter l'inertie thermique du sous-sol, à la fois frais l'été et chaud l'hiver, peut s'avérer très efficace. Cette géo-énergie locale, décarbonée, renouvelable et neutre pour le paysage est encore très loin d'avoir réalisé son potentiel en France : cet article vise à en expliquer le fonctionnement, dans un contexte où sa massification est souhaitable quand elle est pertinente.

Le Haut Conseil pour le Climat alertait en novembre dernier sur la nécessité de « mieux rénover » les bâtiments [1]. Alors que ceux-ci pèsent en Europe pour plus du tiers des émissions de gaz à effet de serre et 40 % de la consommation énergétique, il est indispensable d'aller vers une plus grande sobriété.

On a trop souvent le réflexe d'imaginer qu'il faut uniquement mettre en œuvre des méthodes d'isolation passive de l'enveloppe du bâtiment. Certes, celles-ci peuvent être extrêmement efficaces et doivent être envisagées quand elles sont possibles. Mais une réflexion globale doit être menée, notamment pour le choix de la méthodologie en fonction de son

impact : mieux vaut isoler l'existant plutôt que détruire/reconstruire.

D'après le Haut Conseil pour le Climat, il est indispensable de ne pas se limiter à ces seules rénovations thermiques, mais de travailler à des rénovations énergétiques et même climatiques. La nuance est de taille : dans une rénovation énergétique, on intègre également la décarbonation de la source d'énergie en elle-même ; dans une rénovation climatique enfin, on prend en compte le dérèglement climatique, et en particulier la multiplication des épisodes caniculaires.

Parmi les solutions énergétiques visant à la fois l'atténuation du et l'adaptation au dérèglement climatique, la géo-énergie a un rôle important à jouer. Après avoir clarifié le fonctionnement de cette technologie, nous expliciterons ses bénéfices environnementaux qui justifient son intégration plus massive dans le mix énergétique français et même plus largement européen. En effet, à l'exception de certains pays précurseurs comme la Suisse ou la

* Geosophy (cf. biographies p. 68).

La mission que nous nous sommes fixée à Geosophy est de massifier la géo-énergie, partout où il est possible de le faire de façon responsable. Nous avons notamment développé un moteur de recherche pour permettre aux non-spécialistes de facilement identifier les bâtiments sur lesquels la géo-énergie est pertinente, techniquement et financièrement. Ensuite, toujours pour simplifier l'accès à cette technologie, nous accompagnons nos clients dans la réalisation des installations, sur des aspects techniques et financiers.

Suède, l'Europe a du retard par rapport à l'Asie ou l'Amérique [2].

Géothermie ou géo-énergie

Étymologiquement, géothermie vient du grec ancien γῆ (*guê*), la terre, et θερμός (*thermos*) qui signifie chaud : la géothermie désigne ainsi naturellement ce que l'on qualifie de géothermie profonde, et qui consiste à extraire la chaleur issue de la désintégration de roches radioactives du sous-sol. En fonction de la profondeur visée, celle-ci peut être utilisée soit directement, soit pour produire de l'électricité. En région parisienne, des réseaux de chaleur pour des bâtiments, des piscines, utilisent l'eau du Dogger [3] depuis les années 1970 : cette formation située à environ 1,5 km de profondeur permet de produire de l'eau à 70 °C. La géothermie profonde pour produire de l'électricité s'est malencontreusement illustrée dans l'actualité récente avec le séisme ressenti à proximité de Strasbourg fin 2020. Dans ce cas, même si l'Alsace bénéficie d'un gradient géothermique anormalement élevé, il faut quand même forer à 5 km pour avoir une température de 150 °C. Mentionnons que le séisme n'était pas lié au forage en tant que tel, mais aux opérations de stimulation de réservoir qui ont été effectuées par la suite, pour tenter d'augmenter la productivité des puits.

La technologie qui nous occupe dans le cadre de cet article est souvent désignée également comme une «géothermie», s'éloignant un peu de l'étymologie car son objet n'est pas d'extraire la chaleur terrestre. En effet, aux profondeurs auxquelles les forages sont effectués, typiquement quelques dizaines de mètres, la température du sol est proche de la moyenne des températures saisonnières. Cette température constante, entre 12 °C et 15 °C en France, est ainsi plus fraîche que l'air extérieur en été, et plus chaude en hiver. Et c'est bien sa valeur tempérée qui fait tout son intérêt pour le confort thermique d'un bâtiment, qui comme discuté précédemment aura de plus en plus besoin d'être rafraîchi en été, et non plus seulement chauffé l'hiver.

Ainsi nous préférons la désigner par le mot de géo-énergie qui est d'étymologie plus neutre, ἐνέργεια (*enérgeia*) signifiant «force en action» en grec ancien. Outre son principe différent, la géo-énergie nécessite pour sa mise en œuvre des foreuses bien plus compactes que les plateformes pétrolières utilisées en géothermie profonde. Les techniques de fracturation hydraulique telles que celles employées en Alsace ne sont également pas utilisées. Dans la suite, nous conserverons donc exclusivement le terme de géo-énergie, ce point de vocabulaire permettant d'éviter les amalgames.

Deux techniques en sous-sol

Deux techniques, schématiquement illustrées sur la Figure 1, sont classiquement utilisées pour exploiter la température constante du sous-sol.

La première n'est possible que si le sous-sol du bâtiment a une nappe d'eau sous le bâtiment, ce qui est en général le cas dans les centres-villes. Elle consiste à forer deux puits, de typiquement 25 à 50 cm de diamètre, l'un servant à extraire de l'eau de la nappe, et l'autre à la remettre après avoir prélevé son énergie via un échangeur. La législation impose de restituer toute l'eau prélevée, afin de ne pas assécher la nappe. Ces forages peuvent être facilement réalisés en zone dense, et même dans des parkings. Avec ce principe, c'est l'écoulement naturel de l'eau dans la roche qui permet sa thermalisation, d'où son qualificatif de «système ouvert». Une estimation de la puissance disponible grâce à ces nappes pour la région parisienne a été réalisée par l'ADEME en 2012 [4] : celle-ci est de 20000 GWh/an pour l'Île-de-France, pour un «scénario 2020» fonction de la ressource en lien avec les besoins des bâtiments.

La deuxième technique, de «systèmes fermés», consiste à fabriquer artificiellement un échangeur thermique avec le sous-sol. Cela consiste à réaliser plusieurs forages, appelés «sondes», de 15 cm de diamètre. Chacun de ces forages contient un tube en U, gainé de

La géo-énergie, l'oubliée du mix énergétique français ?

ciment. On fait circuler de l'eau glycolée dans ces tubes, le glycol servant à empêcher le gel de l'eau en cas de températures négatives. Sur la Figure 1, nous illustrons la configuration où les forages sont verticaux, qui permet de maximiser les échanges avec le sous-sol, donc l'énergie extraite. Il faut les espacer de typiquement 10 m pour qu'ils n'interagissent pas les uns avec les autres, ce qui fait que cette technologie est classiquement utilisée à l'écart des centres-villes, dans des zones où l'on trouve peu d'eau souterraine.

Notons que d'autres géométries sont possibles ou en cours de développement :

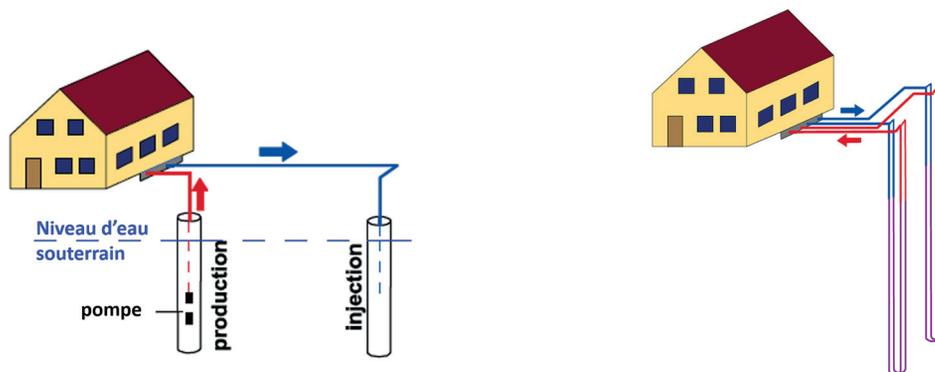
- forages déviés quand la totalité du sous-sol n'est pas directement accessible, inspirés des forages pétroliers qui partent d'un même point, et permettant d'exploiter des systèmes fermés même dans des zones urbaines denses,
- échangeurs souterrains en forme de « corbeilles », de « murs », pour de plus petits bâtiments, ne nécessitant pas de foreuse pour leur installation,
- échangeurs horizontaux (puits « canadiens ») dans lesquels on fait circuler habituellement de l'air et qui ne nécessitent pas de foreuse non plus : ceux-ci portent cependant bien leur nom, car ils nécessitent typiquement de disposer d'un terrain de deux fois la surface du bâtiment qu'on cherche à chauffer/

rafraîchir — au Canada c'est facile, beaucoup moins dans une agglomération européenne...

Côté bâtiment, pompe à chaleur et émetteurs

Quelle que soit la technologie utilisée dans le sous-sol, le transfert de calories depuis la « boucle primaire », qui permet d'extraire l'énergie du sous-sol, se fait via un échangeur : l'eau du sol ne circule jamais dans tout le bâtiment. Après cet échangeur, on utilise une pompe à chaleur, généralement réversible, pour amener l'eau de 12-15 °C au régime de température adapté au bâtiment.

Ce régime de température est important, car le rendement des pompes à chaleur est d'autant plus élevé que la différence de température entre source froide et source chaude est faible. En effet, pour fixer les idées, on peut reprendre quelques notions de base de thermodynamique : une pompe à chaleur est un dispositif permettant, à l'aide d'un travail W de transférer de la chaleur d'une source froide, qui échange une quantité de chaleur Q_f à la température T_f , vers une source chaude, qui échange une quantité de chaleur Q_c à la température T_c . On déduit alors directement de l'écriture des deux premiers principes que le rendement (idéal), quotient de Q_c par W , est



Système ouvert (schéma traduit du *Geotrained Manual*)

Système fermé (schéma traduit du *Geotrained Manual*)

Figure 1. Illustration de techniques classiquement utilisées en géo-énergie

Source : *Geotrained Training Manual for designers of geothermal systems*, Project: IEE/07/581/SI2.499061

inversement proportionnel à la différence des températures $T_c - T_f$:

$$\frac{Q_c}{W} = \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

Cette spécificité des pompes à chaleur a deux conséquences. Tout d'abord, pour un même bâtiment, une pompe à chaleur géo-énergétique est plus efficace qu'une pompe à chaleur aérothermique, car la température du sous-sol est plus élevée que celle de l'air en hiver et plus fraîche en été. De plus, un système avec pompe à chaleur est d'autant plus efficace que la température utilisée pour chauffer le bâtiment est basse. Les émetteurs dits à basse température, comme des planchers ou des plafonds rayonnants, sont donc privilégiés par rapport aux systèmes à haute température, comme de vieux radiateurs classiques, en fonte, adaptés à des chaudières fonctionnant aux hydrocarbures.

Nous estimons que les rendements typiques sont de l'ordre de 400 % : avec un 1 kWh électrique, on produit 4 kWh de chaleur ou de froid. On trouve dans la littérature des valeurs plus élevées [5] (de 800 à 1200 %), mais celles-ci sont obtenues dans des conditions particulièrement favorables, avec des émetteurs basse température, que l'on ne trouve pas classiquement dans des bâtiments existants.

En été, dans le cas où l'on utilise des planchers ou des plafonds rayonnants pour rafraîchir le bâtiment, nous pouvons même envisager un *by-pass* de la pompe à chaleur, utilisant directement les frigories récupérées par un échangeur. On parle alors de « *free cooling* » ou de « *geocooling* », les rendements pouvant dans ce cas s'élever jusqu'à 5000 % [6], car la consommation électrique ne sert alors qu'à faire circuler l'eau.

Les pompes à chaleur et émetteurs sont des technologies assez matures, mais il subsiste des travaux de recherche, notamment sur les fluides frigorigènes. Certains travaux visent à identifier des fluides de plus en plus performants, pour maximiser les rendements obtenus [7]. Il y a également des enjeux environnementaux : les fluides frigorigènes présentent en général un potentiel de gaz à effet de serre important et il est indispensable de réaliser une bonne maintenance pour empêcher tout dégagement accidentel. Certains travaux de recherche ont ainsi pour objet d'utiliser des fluides moins risqués [8], comme le CO₂ voire même de l'eau.

Adopter un point de vue systémique

Pendant une saison donnée, une exploitation géo-énergétique a tendance à modifier la température du sous-sol : en hiver, on le rafraîchit alors qu'en été on le réchauffe.

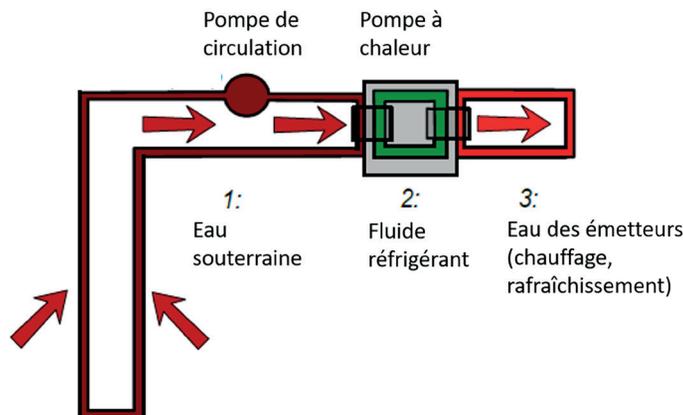


Figure 2. Représentation schématique d'une installation géo-énergétique (traduit du *Geotrained Manual*)

La géo-énergie, l'oubliée du mix énergétique français ?

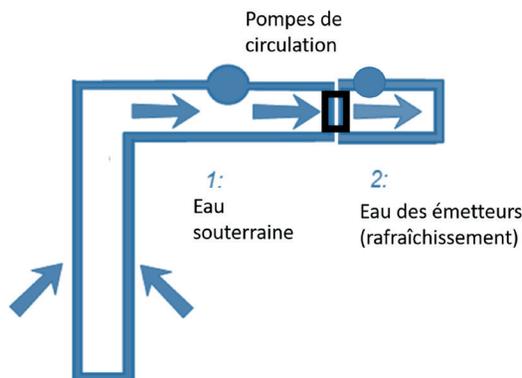


Figure 3. Représentation schématique d'une installation géo-énergétique – cas du «free cooling» ou «geocooling»

Si les besoins du bâtiment sont équilibrés entre chaud et froid, leurs effets s'annulent sur une année. L'inertie thermique du sous-sol permet un stockage intersaisonnier, qui augmente encore la puissance accessible par rapport à un scénario dans lequel on ne rechargerait pas le sol d'une saison sur l'autre.

Ainsi, il est absolument indispensable de coupler les modèles thermiques du sous-sol et du bâtiment pour pouvoir déterminer les ressources disponibles. Ce résultat, un peu contre-intuitif, rappelle la nécessité d'une approche systémique pour analyser finement le sous-sol. Et symétriquement, avec une perspective bâtiment, il montre qu'on ne peut pas faire l'économie d'une analyse incluant le sous-sol. Il implique également la mise à disposition d'outils permettant de le faire, ce qui fait précisément l'objet de nos activités.

Notons également l'excellente complémentarité avec d'autres sources d'énergies renouvelables, en fonction des besoins du bâtiment. Par exemple, pour un bâtiment résidentiel qui a à ce jour exclusivement des besoins de chauffage, et afin d'éviter que le sous-sol ne perde en efficacité au cours du temps, on peut combiner l'installation géo-énergétique avec une installation solaire thermique. Celle-ci peut alors subvenir aux besoins en eau chaude sanitaire et servir à «recharger» le sous-sol en été : en la

dimensionnant pour l'hiver, l'excès de calories produit en été peut être stocké dans le sous-sol.

La fourniture d'électricité faisant fonctionner la pompe à chaleur peut elle aussi provenir d'autres énergies renouvelables, qu'il est alors nécessaire de prendre en compte dans le calcul du bilan carbone et plus largement de l'impact environnemental au sens large (énergie et ressources nécessaires à leur fabrication, biodiversité...). Par exemple, si l'on utilise des panneaux solaires photovoltaïques pour produire l'électricité consommée par la pompe à chaleur, il convient de prendre en compte la provenance de ceux-ci dans le calcul du bilan carbone pour comptabiliser l'impact du transport et le taux d'émissions de GES associé aux énergies utilisées pour leur fabrication.

Enfin, il est également intéressant d'envisager une couverture partielle des besoins par la géo-énergie. En effet, les appels de puissance élevée, à la fois en chaud et en froid, se font sur une courte période de temps : pour maximiser les temps de retour sur investissement, il est alors généralement plus intéressant de dimensionner l'installation pour une couverture de 50 % des besoins de puissance, car cela permet de couvrir plus de 80 % des besoins énergétiques. Le reste de la puissance est alors fourni par une installation complémentaire, sur réseau urbain par exemple, ou directement électrique.

Cela permet une optimisation économique qui peut être un levier essentiel pour certains clients.

Bénéfices environnementaux

Outre les économies d'énergie par production locale d'énergie renouvelable, une installation géo-énergétique peut présenter d'autres intérêts environnementaux.

Tout d'abord, elle permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Pour faire un bilan carbone global, on commence par estimer l'impact des forages en eux-mêmes, en incluant leur fin de vie (rebouchage). Pour deux puits de 65 m de profondeur, celui-ci est de l'ordre de 30 tonnes de CO_{2eq}, avec près de la moitié pour les matériaux eux-mêmes (ciment, acier inox). En exploitation, il faut ensuite faire des hypothèses sur la consommation du bâtiment et son mode de chauffage/rafraîchissement. Par exemple, un bâtiment de 10 000 m² ayant initialement une consommation de 3,15 GWh/an, passe à 0,8 GWh/an avec de la géo-énergie couvrant la totalité des besoins. Si celui-ci était initialement chauffé au gaz et rafraîchi avec un climatiseur classique, on passe d'émissions de l'ordre de 500 tCO_{2eq}/an à 65 tCO_{2eq}/an. Cela représente une économie de plus de 80 % qui rentabilise en un mois le « coût » carbone de la construction des puits. Ce gain provient d'une part de la diminution de consommation (de 75 % dans ce cas), et d'autre part de la non-utilisation du gaz, qui émet 0,25 kgCO_{2eq}/kWh thermique, au profit de l'électricité, qui émet 0,08 kgCO_{2eq}/kWh [9] électrique. Notons ainsi que ce bilan carbone est fonction à la fois de la source d'énergie initialement installée, et de l'empreinte carbone de l'électricité. Il est donc variable d'un bâtiment à l'autre, d'un pays à l'autre, en prenant en compte l'origine de l'électricité si celle-ci est importée.

Par ailleurs, l'impact de la géo-énergie sur la biodiversité n'est pas quantifié à notre connaissance, mais celui-ci concerne principalement les travaux de forage. Ensuite, notamment sur les puits suffisamment profonds (entre 10 et

200 m de profondeur), et en restant dans le cadre réglementaire, on ne s'attend pas à perturber de façon importante les écosystèmes. A contrario, le fait d'enterrer les moyens de production permet, notamment en zone dense, de ne pas intensifier les phénomènes d'îlots de chaleur, contrairement à des systèmes aérothermiques. De même, si une installation géo-énergétique remplace une installation de rafraîchissement fonctionnant avec l'eau de cours d'eau ou de mares, cela diminue également l'impact sur la vie aquatique.

Dans la feuille de route de l'État français

Cela fait déjà plusieurs années que des mesures visant à faciliter le déploiement de la géo-énergie sont mises en œuvre. En 2015, le code minier a été revu afin de faciliter les démarches administratives. Dans les zones qui ne présentent pas de risque géologique particulier, et à condition de respecter un certain nombre de conditions, comme la puissance maximum de l'installation (limitée à 500 kW), ou la profondeur (limitée à 200 m), il est possible de forer des installations sur simple déclaration de travaux. Signalons que pour de plus fortes puissances ou dans des zones présentant des risques, comme certains types de formations argileuses qui gonflent en présence d'eau, il faut toujours demander une autorisation préfectorale.

Par ailleurs, un « fonds chaleur » [10] a été mis en place, pour inciter les propriétaires à s'équiper, en remboursant les surcoûts par rapport à une installation traditionnelle.

La chaleur représente en effet 42,3 % de la consommation finale d'énergie en 2017, soit 741 TWh, le secteur du résidentiel tertiaire y contribuant à hauteur de 65 % de la consommation finale de chaleur et l'industrie 30 %. La loi sur la transition énergétique pour la croissance verte a fixé un objectif de 38 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale de chaleur en 2030 [11]. Ces mesures visent donc à aider à remplir ces objectifs, qui

La géo-énergie, l'oubliée du mix énergétique français ?

représentent environ le double du niveau auquel nous sommes aujourd'hui [12].

Lever les freins

Pour parvenir à cette feuille de route, il est cependant nécessaire de lever un certain nombre de freins en France.

Le premier est la méconnaissance de la technologie et de son potentiel par la plupart des propriétaires et bureaux d'études français. Pour cela, l'ADEME, le SER [13] et l'AFPG [14] multiplient les campagnes de sensibilisation. De nombreuses études de cas, sur des bâtiments de typologies variées (bâtiments de logements, bureaux, centres commerciaux, établissements scolaires...) sont consultables en ligne [15] : en cliquant sur chacun des points représentés sur la carte, on a accès à une fiche descriptive complète indiquant les investissements, leur temps de retour sur baisse de charges, le montant des subventions obtenues, les bénéfices environnementaux des installations. Nous en résumons quelques exemples dans le Tableau 1.

Ensuite, comme le coût des forages est un surinvestissement par rapport à des solutions classiques, il est important de trouver une façon de le financer. De façon générale, les temps de

ROI les plus courts peuvent être obtenus pour des bâtiments de taille importante, pour lesquels la géo-énergie ne couvre qu'une fraction des besoins énergétiques, mais est pleinement utilisée toute l'année. Au-delà du fonds chaleur déjà mentionné, plusieurs énergéticiens proposent aujourd'hui de financer ces installations, se rémunérant ensuite sur la vente de chaleur/froid.

Notons que ces aspects financiers ne sont que l'un des vecteurs pour rentabiliser l'investissement. Dans un cadre plus large de valorisation immobilière d'un bâtiment, d'autres arguments peuvent entrer en considération : la prise en compte de critères ESG (environnementaux, sociaux et de gouvernance) ou carbone par les investisseurs, la diminution des consommations du bâtiment pour souscrire au « décret tertiaire » [16], la transformation de surfaces techniques de toiture en terrasses arborées, ou le caractère silencieux et invisible de la technologie. Enfin, nous l'avons vu, cette technologie est d'autant plus intéressante que les bâtiments sont à la fois chauffés et rafraîchis, ce qui est aujourd'hui déjà la norme dans le tertiaire, mais pas encore dans les bâtiments de logement.

	Résidence Rouget de L'Isle*	Ikea Tourville**	Placo Sefalog***
Type d'usage	151 logements	tertiaire	industriel
Surface	10 000 m ²	30 000 m ²	7 800 m ²
Investissement	300 k€	688 k€	785 k€
Temps de retour	6 ans	8 ans	5 ans
Bénéfices environnementaux	230 tCO _{2eq} /an économisées	630 tCO _{2eq} /an économisées	103 tCO _{2eq} /an économisées

Tableau 1. Exemples d'installations géo-énergétiques

* <https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/pantin.pdf>.

** <https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/IKEA%20TOURVILLE.pdf>.

*** <https://www.geothermies.fr/sites/default/files/inline-files/dadonville%20placo.pdf>.

Réaliser le potentiel de la géo-énergie

Une énergie locale, durable, décarbonée et qui ne se voit pas, donc ne détériore pas le paysage : pourquoi d'autres énergies renouvelables volent-elles la vedette à la géo-énergie? Sans doute parce que celle-ci ne se voit pas justement... mais c'est un potentiel gigantesque qu'elle cache. Avant d'équiper comme la Suède le quart de nos bâtiments [17], il reste un peu de chemin à parcourir, notamment en termes de communication ou d'assistance technique aux propriétaires. Gageons que cet article y contribuera!

RÉFÉRENCES

- [1] Rénover mieux : leçons d'Europe — Haut Conseil pour le Climat (hautconseilclimat.fr).
- [2] Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 World-wide Review (geothermal-energy.org).
- [3] Géothermie au Dogger en Île-de-France – SIGES Seine-Normandie – © 2021 (brgm.fr).
- [4] RP-60615-FR.
- [5] <https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/basedoc/guide-methodologique-geothermie-de-surface.pdf>.
- [6] http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2015/04/Residence_tertiaireLePapillon.pdf.
- [7] *Advances in Mechanical Engineering* 2019, Vol. 11(1) 1–14.
- [8] *Energy Engineering*, 118, (2020). Development of Environmentally Friendly and Energy Efficient Refrigerants for Refrigeration Systems.
- [9] Arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine – Légifrance (legifrance.gouv.fr).
- [10] <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-chaleur/fonds-chaleur-bref>.
- [11] Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE), ministère de la Transition écologique (ecologie.gouv.fr).
- [12] https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/basedoc/ser-filieregeothermie2020_web-rvb.pdf.

[13] Accueil – Syndicat des énergies renouvelables (syndicat-energies-renouvelables.fr).

[14] www.afpg.asso.fr.

[15] https://www.geothermies.fr/viewer/?al=autolayer_operation_surface.

[16] Décret n° 2019-771 du 23 juillet 2019 relatif aux obligations d'actions de réduction de la consommation d'énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire – Légifrance (legifrance.gouv.fr).

[17] Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 World-wide Review (geothermal-energy.org).