



**LE PLUS FACILE, LE PLUS EFFICACE ET LE
MOINS COÛTEUX**
**SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES POUR LA
RÉNOVATION**

2018 - 2023

1

2

3

4

5

6

7

Besoins énergétiques et solutions techniques pour des bâtiments performants

Auteurs : Consortium GEO4CIVHIC

Coordinatrice du projet : Adriana BERNARDI

Coordinatrice du volume : Laura CARNIELETTO

www.geo4civhic.eu

Le projet GEO4CIVHIC a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de l'accord de subvention n° 792355.





Toute diffusion de résultats doit mentionner qu'elle ne reflète que l'opinion de l'auteur et que l'Agence n'est pas responsable de l'usage qui peut être fait des informations qu'elle contient.

RÉDACTRICES :

Adriana Bernardi

Doinița - Iuliana Cucuțeanu

PRÉAMBULE



L'énergie géothermique à faible profondeur est une source d'énergie renouvelable stable et fiable qui est toujours disponible partout. L'énergie géothermique peu profonde et son couplage avec d'autres sources d'énergie renouvelable présentent un potentiel très important, mais restent sous-exploités dans certains pays et nécessitent une plus grande diffusion. L'objectif des sept volumes créés est de poursuivre la diffusion de l'énergie géothermique peu profonde.

Les sept volumes :

VOLUME 1 - Besoins énergétiques et solutions techniques pour des bâtiments efficaces

VOLUME 2 - Géologie et cartographie

VOLUME 3 - Méthodologie de forage, machines et échangeurs de chaleur

VOLUME 4 - Technologie des pompes à chaleur géothermiques

VOLUME 5 - Dimensionnement des pompes à chaleur géothermiques et des technologies hybrides

VOLUME 6 - Environnement et normes

VOLUME 7 - Bâtiments historiques et patrimoine mondial

Ces volumes décrivent et résument les activités de recherche, de l'innovation à leur mise en œuvre, ainsi que les enseignements tirés de 2015 à 2023 dans le cadre de deux projets européens : " **Systèmes géothermiques les plus faciles, efficaces et à faible coût pour la rénovation des bâtiments civils et historiques** " (GEO4CIVHIC) et " **Application bon marché et efficace d'échangeurs de chaleur et de pompes géothermiques fiables** " (Cheap-GSHPs).

Ils constituent une source précieuse d'informations destinées à soutenir et à renforcer les compétences des professionnels, des étudiants et d'autres parties prenantes ciblées importantes (par exemple, les décideurs des politiques publiques, les utilisateurs finaux, les investisseurs, etc.) dans l'application des systèmes géothermiques pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments dans le domaine des économies d'énergie.

Les sept volumes décrivent les principaux résultats en commençant par les principes de base, les obstacles, les approches, les méthodologies, les innovations, ainsi que la législation qui sous-tend l'application de l'énergie géothermique de surface à tous les types de bâtiments. L'application de la géothermie à faible profondeur aux bâtiments historiques se heurte à de nombreux obstacles et à des réglementations très strictes, problèmes qui ont été résolus avec succès lors du projet GEO4CIVHIC. Il s'agit d'une avancée majeure dans le domaine du chauffage/refroidissement et des économies d'énergie dans ces bâtiments particuliers.

Ces volumes ont été créés pour soutenir la formation nationale en Europe. En particulier, les formations des quatre nouveaux "Centres européens d'excellence pour l'application de la géothermie à faible profondeur dans les bâtiments civils et historiques" créés pendant le programme GEO4CIVHIC dans les universités d'Italie, d'Allemagne, d'Espagne et de Roumanie. Un plan de formation de haut niveau est envisagé pour former de nouveaux experts qui garantiront ainsi de nouvelles compétences et de nouveaux emplois.

En outre, ces quatre centres d'excellence européens pourraient devenir un instrument dynamique non seulement pour la formation, mais aussi pour l'amélioration de la réglementation en Europe, un moyen de stimuler la communication entre les spécialistes et, en fin de compte, d'améliorer les progrès à long terme dans le domaine de la géothermie de faible profondeur.

Chaque volume est consacré à des thèmes spécifiques tels que les besoins énergétiques et les solutions techniques pour des bâtiments efficaces, les aspects géologiques des sols européens, les solutions innovantes en matière d'échangeurs de chaleur, de machines de forage et de pompes à chaleur, et enfin les aspects législatifs, environnementaux et économiques.

Le contenu des volumes est le résultat d'une recherche scientifique exigeante, d'un développement technologique, d'expériences sur le terrain et de démonstrations réalisées par les partenaires des deux projets de recherche européens H2020 au cours des huit années de collaboration, de discussions et d'engagements.

La période pendant laquelle le projet GEO4CIVHIC s'est développé a été très difficile (pandémie, post-pandémie, etc.). Cela a considérablement entravé l'activité de recherche ainsi que la mise en œuvre et la gestion du projet. En particulier, les activités sur les sites de démonstration à travers l'Europe (Italie, Belgique, Malte, Irlande) ont pesé lourdement sur les membres de l'équipe, mais ces défis ont finalement été relevés avec succès.

Les difficultés du projet ont rassemblé une solide équipe de chercheurs de toute l'Europe. Ces spécialistes continueront à jouer un rôle important dans la science de la géothermie peu profonde, au-delà des amitiés solides qui se sont formées au cours des années des deux projets.

En tant que coordinateur des deux projets, je voudrais remercier chacun pour ses efforts et pour avoir cru profondément en la géothermie de faible profondeur, qui sera d'une grande aide dans le domaine de l'économie d'énergie dans toute l'Europe détachée des combustibles fossiles.

Enfin, un grand merci à la Commission européenne qui, en finançant ces deux projets, a permis de faire un grand pas en avant dans l'étude de technologies plus efficaces et moins coûteuses dans le domaine de la géothermie de faible profondeur.

Adriana Bernardi

**Coordinatrice des projets européens GEO4CIVHIC et Cheap-GSHPs
Directrice de recherche au CNR-ISAC**

Volume

1

Projet GEO4CIVHIC

Manuel de formation

Besoins énergétiques et solutions techniques pour des bâtiments performants

Auteurs : Consortium GEO4CIVHIC

Coordinatrice du projet : Adriana BERNARDI

Coordinatrice du volume : Laura CARNIELETTO

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	7
AUTEURS/PARTENAIRES.....	8
NOMENCLATURE.....	9
1. INTRODUCTION SUR LES BÂTIMENTS ÉCONOMES EN ÉNERGIE	10
1.1. Rénovation du parc immobilier existant.....	10
1.2. Nouveaux bâtiments (ZEB, nZEB, MEP).....	11
1.3. Étiquetage énergétique et durable	12
1.4. Performance environnementale et durable d'un bâtiment.....	13
2. SCÉNARIOS DE MODERNISATION POSSIBLES	14
2.1. Mesures de modernisation possibles	16
2.2. Dimensionnement des échangeurs de chaleur souterraine	17
2.3. Longueur optimale des sondes géothermiques.....	18
3. ÉTUDES DE CAS.....	19
3.1. Athènes.....	20
3.2. Strasbourg	21
3.3. Helsinki	23
3.4. Longueur optimale des sondes	24
4. INTÉGRATION DES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES A D'AUTRES SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE (RES)	25
4.1. Pompes à chaleur géothermiques alimentées par de l'électricité renouvelable.....	25
4.2. Pompes à chaleur géothermiques couplées à l'énergie solaire thermique.....	26
4.3. Pompes à chaleur géothermiques couplées aux pompes à chaleur à air.....	28
4.4. Pompes à chaleur géothermiques couplées à l'énergie photovoltaïque.....	29
4.5. Application d'études de cas : indices d'autosuffisance et d'autoconsommation pour les archétypes GEO4CIVHIC.....	29
5. CONCLUSIONS ET AUTRES APPLICATIONS.....	33
RÉFÉRENCES.....	35

CHIFFRES

Figure 2-1. Schéma simplifié des stratégies de modernisation appliquées.....	17
Figure 2-2. Scénarios possibles pour les études de cas.....	19
Figure 3-1. Comparaison entre la longueur maximale disponible et la longueur de forage nécessaire pour satisfaire la demande d'énergie pour les trois typologies de bâtiments à Athènes sans (a) et avec (b) isolation de l'enveloppe.....	21
Figure 3-2. Comparaison entre la longueur maximale disponible et la longueur de forage nécessaire pour satisfaire la demande d'énergie pour les trois typologies de bâtiments à Strasbourg sans (a) et avec (b) isolation de l'enveloppe.	22
Figure 3-3. Comparaison entre la longueur maximale disponible et la longueur de forage nécessaire pour satisfaire les typologies de demande d'énergie pour Helsinki sans (a) et avec (b) isolation de l'enveloppe	23
Figure 4-1. Schéma d'un système de pompe à chaleur géothermique couplée à l'énergie éolienne et PV	26
Figure 4-2. Schéma d'un système de pompe à chaleur géothermique couplée à l'énergie solaire thermique.....	27
Figure 4-3. Schéma de raccordement d'une tour de refroidissement ou d'un refroidisseur sec à une pompe à chaleur géothermique	28
Figure 4-4. Schéma de raccordement d'une pompe à chaleur air-eau (Air-Water HP) couplée à une pompe à chaleur géothermique (GSHP)	29



TABLEAUX

Tableau 2-1. Valeurs nominales et saisonnières de la pompe à chaleur connectée aux différents systèmes de chauffage et de refroidissement	18
Tableau 2-2. Propriétés thermiques des trois types de sol considérés	18
Tableau 2-3. Longueur optimale des sondes géothermiques	19
Tableau 3-1. Charges énergétiques pour le chauffage et la climatisation dans les trois sites [kWh/(m ² y)].....	20
Tableau 3-2. Longueur finale choisie pour les sondes.....	24
Tableau 4-1. Consommation horaire moyenne d'énergie électrique [Wh]	30
Tableau 4-2. Utilisation quotidienne de la cuisinière électrique [Wh]	30
Tableau 4-3. Consommation électrique totale incluant la pompe à chaleur, l'éclairage et les appareils [kWh]	30
Tableau 4-4. Énergie annuelle produite par le système photovoltaïque	31
Tableau 4-5. Paramètres de dimensionnement du système photovoltaïque.....	31
Tableau 4-6. Résumé des résultats de l'autosuffisance et de l'autoconsommation pour la maison en terrasse existante	32
Tableau 4-7. Résumé des résultats de l'autosuffisance et de l'autoconsommation pour la maison historique en terrasse	33

RÉSUMÉ

Selon les politiques récentes concernant l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments et le besoin de stratégies de modernisation pour aller vers des bâtiments à énergie zéro (ou presque zéro ou plus). L'objectif du projet GEO4CIVHIC est de favoriser la rénovation des bâtiments civils et historiques en facilitant l'installation, en réduisant les coûts et en augmentant l'efficacité des différents composants grâce à des systèmes géothermiques peu profonds. En particulier, les politiques concernant la réduction des besoins énergétiques des bâtiments devraient être soutenues en proposant des stratégies qui intègrent les échangeurs de chaleur géothermiques avec d'autres sources d'énergie renouvelables. L'objectif principal est de faire prendre conscience du potentiel d'économie d'énergie réalisable avec un dimensionnement optimal et un impact limité sur l'environnement urbain.

La définition d'archétypes de bâtiments est fondamentale pour reproduire les études de cas sous d'autres climats et dans d'autres lieux, ce qui pourrait permettre d'étendre l'analyse à l'échelle urbaine. Des archétypes ont été développés en distinguant les bâtiments existants des bâtiments historiques et en se concentrant sur les maisons unifamiliales en terrasse, qui sont les bâtiments résidentiels typiques des centres historiques européens.

Le potentiel de couplage de la pompe à chaleur géothermique avec d'autres sources d'énergie a été exploré (c'est-à-dire les capteurs solaires thermiques avec des réservoirs de stockage, l'énergie éolienne, les systèmes photovoltaïques (PV), les solutions hybrides PV-thermiques et les pompes à chaleur air-eau), et des solutions optimales pour les différents types de bâtiments et de climats ont été définies à titre d'exemples d'application.

Une méthodologie pour le dimensionnement optimal des pompes à chaleur géothermiques a été développée, envisageant éventuellement des systèmes à double source ou des systèmes à air. Des résultats pour des bâtiments types ont été présentés en combinant des simulations d'un système photovoltaïque pour estimer l'autosuffisance et l'autoconsommation pour cinq orientations du bâtiment.

Des résultats extrêmes ont été obtenus pour les climats chauds, avec une demande d'énergie de chauffage négligeable et éventuellement des systèmes de refroidissement gratuits au lieu des systèmes de refroidissement traditionnels nécessaires en hiver. Avec une inclinaison appropriée, les systèmes photovoltaïques pourraient fournir jusqu'à 40 % de la part d'autosuffisance, y compris dans les climats nordiques.

AUTEURS/PARTENAIRES

UNIPD – Laura Carnieletto, Michele De Carli, Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Davide Menegazzo

SUPSI – Marco Belliardi

CRES – Dimitris Mendrinos

NOMENCLATURE

Abréviations

<i>PAC Aéro</i>	Pompe à chaleur air-eau
<i>MEB</i>	Modèle énergétique du bâtiment
<i>BREEAM</i>	Méthode d'évaluation environnementale du Building Research Establishment
<i>ECS</i>	Eau chaude sanitaire
<i>DPEB</i>	Directive sur la performance énergétique des bâtiments
<i>CPE</i>	Certificat de performance énergétique
<i>ESPC</i>	Contrat de performance en matière d'économies d'énergie
<i>L'UE</i>	Union européenne
<i>GES</i>	Gaz à effet de serre
<i>PAC Géo</i>	Pompe à chaleur géothermique
<i>PAC GSH</i>	Pompe à chaleur à gazéification hybride
<i>CVC</i>	Chauffage, ventilation et climatisation
<i>QAI</i>	Qualité de l'air intérieur
<i>QEI</i>	Qualité de l'environnement intérieur
<i>LEED</i>	Leadership in Energy and Environmental Design (Leadership en matière d'énergie et de conception environnementale)
<i>PANEE</i>	Plan d'action national pour l'efficacité énergétique
<i>CNPE</i>	Certificats nationaux de performance énergétique
<i>ONG</i>	Organisation non gouvernementale
<i>ASBL</i>	Association à but non lucratif
<i>nZEB</i>	Bâtiment quasi zéro énergie
<i>MCP</i>	Matériau à changement de phase
<i>MEP</i>	Maison à énergie positive
<i>PV</i>	Photovoltaïque
<i>SER</i>	Sources d'énergie renouvelable
<i>SNBS</i>	Norme de construction durable Suisse
<i>ZEB</i>	Bâtiment zéro énergie

Indices

<i>h ou H</i>	Chauffage
<i>c ou C</i>	Refroidissement
<i>max</i>	Maximum

Symboles

λ	Conductivité thermique [W/(m K)]
<i>CO₂</i>	Dioxyde de carbone [-]
<i>COP</i>	Coefficient de performance [W/W]
<i>EER</i>	Taux d'efficacité énergétique [W/W]
<i>L_c</i>	(Sonde) Longueur pour le refroidissement des locaux [m]
<i>L_h</i>	(Sonde) Longueur pour le chauffage des locaux [m]
<i>L_{max}</i>	Longueur maximale de la sonde [m]
<i>SCOP</i>	Coefficient de performance saisonnier [W/W]
<i>SEER</i>	Taux d'efficacité énergétique saisonnier [W/W]
<i>PBT</i>	“Pay Back Time” = Temps de retour sur investissement [y]
<i>SC</i>	“Self Consumption” = Autoconsommation [%]
<i>SS</i>	“Self Sufficiency” = Autosuffisance [%]

1. INTRODUCTION SUR LES BÂTIMENTS ÉCONOMES EN ÉNERGIE

1.1. Rénovation du parc immobilier existant

Le projet européen Horizon 2020 GEO4CIVHIC¹ (Most Easy, Efficient and Low-Cost Geothermal Systems for Retrofitting Civil and Historical Buildings) vise à accélérer le déploiement de systèmes géothermiques peu profonds pour le chauffage et le refroidissement en modernisant les bâtiments existants et historiques situés dans les centres urbains et en surmontant les obstacles tels que l'espace disponible et les limitations légales liées à l'importance architecturale et culturelle des bâtiments. Il est basé sur des solutions innovantes pour les échangeurs de chaleur souterrains (sondes) et les pompes à chaleur géothermiques (PAC Géo). L'énergie géothermique à faible profondeur est une solution très prometteuse, comme en témoigne l'intérêt de la Commission européenne pour la directive sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB) et ses versions refondues. (Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne 2010 et 2018). Plus récemment, l'Europe a développé un plan pour accélérer la transition verte, appelé REPowerEU², qui propose plusieurs actions pour soutenir les politiques d'économie d'énergie et promouvoir la diversification des approvisionnements afin de remplacer les combustibles fossiles par des sources d'énergie renouvelable émergentes. La stratégie solaire de l'UE vise à tripler la capacité géothermique d'ici 2030. La législation sera améliorée afin de créer un marché solide pour le chauffage et le refroidissement géothermiques au moyen d'échangeurs de chaleur géothermiques, et de soutenir la décarbonisation des bâtiments et de l'industrie. Dans le cadre du paquet "Fit for 55" de la législation européenne sur le Green Deal³, la Commission européenne a proposé de renforcer les mesures d'efficacité énergétique à long terme, notamment en augmentant de 9 à 13 % l'objectif obligatoire en matière d'efficacité énergétique.

Plusieurs approches dans la littérature ont visé à fournir des stratégies pour augmenter la durabilité de l'environnement urbain, impliquant des perspectives environnementales, économiques et sociales (Directive 2010/31/EU) ainsi que des aspects culturels et institutionnels (Directive 2012/27/EU, Directive 2018/844). Cependant, la production et l'optimisation de l'énergie dans les bâtiments devraient être l'un des principaux axes de mise en œuvre du processus de décarbonisation des villes. Le chauffage et la climatisation des bâtiments sont l'une des utilisations finales les plus consommatrices d'énergie qui doivent être réduites pour atteindre les objectifs de l'Union européenne en matière d'efficacité énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050. Plusieurs études se sont concentrées sur la modélisation énergétique détaillée des bâtiments, en optimisant les charges internes, l'isolation de l'enveloppe et le fonctionnement des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC). Cependant, les stratégies de rénovation devraient être étudiées pour être reproduites à grande échelle ; ainsi, les ensembles de données sur les bâtiments devraient être représentatifs des parcs immobiliers européens ou nationaux afin de faciliter le traitement d'un si grand nombre de bâtiments et de soutenir les outils de simulation à l'échelle urbaine.

Selon des études récentes (Ballarini et Corgnati, 2014), la demande énergétique des bâtiments existants en Europe varie de 150 kWh/(m² an) à 300 kWh/(m² an). Il existe donc un potentiel important en Europe, estimé à environ 25 000 km² de surface de plancher. Cependant, la plupart des bâtiments qui doivent être rénovés se trouvent dans des zones urbaines, où l'espace disponible pour installer le champ de sondes géothermiques pour une pompe à chaleur est un problème important qui doit être résolu en fonction des limites imposées par la loi. L'espace disponible dépend à la fois de l'espace libre réel (jardins, parkings, etc.) et du niveau de rénovation appliqué, car une rénovation en profondeur de l'enveloppe et du système réduira les besoins énergétiques et donc la longueur des sondes et l'espace nécessaire. L'application de la géothermie aux bâtiments historiques a été étudiée par Emmi et al. (2017), qui a montré l'impact d'un dimensionnement optimal malgré le développement urbain particulier de deux études de cas à Venise et à Florence. En comparant les résultats avec ceux d'une pompe à chaleur (PAC) air-eau, c'est la pompe à chaleur géothermique qui a obtenu les meilleures performances. De même, Zarrella et al. (2019) ont montré le couplage entre la géothermie et la pompe à chaleur air-eau lorsque la charge thermique est déséquilibrée en définissant une température de commutation de l'air pour tirer parti de la plus grande efficacité du système. Une autre application de la PAC Géo a été étudiée par Emmi et al. (2020), qui a assuré le refroidissement et le chauffage d'un bâtiment résidentiel à l'aide d'un PSGE capable d'assister un champ solaire dans la production d'eau chaude sanitaire.

Bien que plusieurs articles aient été consacrés à l'intégration efficace des pompes à chaleur géothermiques en tant que systèmes de production pour le chauffage et le refroidissement des locaux, chaque analyse a été réalisée au niveau d'un

¹ Disponible à l'adresse [suivante : https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects](https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects)

² Communication sur REPowerEU : Action européenne commune pour une énergie plus abordable, plus sûre et plus durable, COM (2022) 108 final. Disponible à l'adresse suivante : <https://eur-lex.europa.eu>

³ Disponible à l'adresse [suivante : https://www.consilium.europa.eu](https://www.consilium.europa.eu)

seul bâtiment. Au contraire, la recherche s'oriente vers une perspective plus large à l'échelle du quartier ou de la ville, afin d'optimiser le partage de l'énergie et d'exploiter les sources d'énergie renouvelable. Les informations disponibles concernant les archétypes déjà développés pour le contexte européen, tels que TABULA et EPISCOPE⁴, excluaient les informations concernant la demande énergétique horaire, les charges de pointe, et les données permettant de simuler l'intégration potentielle des sources d'énergie renouvelable étaient manquantes. Par conséquent, une base de données complète pour les profils thermiques et électriques serait utile pour définir la demande énergétique des stocks de bâtiments, ce qui permettrait aux urbanistes et aux décideurs politiques d'établir une liste prioritaire des quartiers ou des villes qui ont besoin d'un soutien urgent pour réduire la consommation d'énergie. Les résultats intégrés concernant la rénovation de l'enveloppe et des installations offrent une nouvelle perspective de modélisation urbaine, y compris la possibilité de partager l'énergie thermique et électrique par le biais du développement de communautés énergétiques.

1.2. Nouveaux bâtiments (ZEB, nZEB, MEP)

Les bâtiments à haute efficacité énergétique sont conçus et construits de manière à consommer moins d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage que les bâtiments conventionnels. Les nouveaux bâtiments, en particulier, ont la possibilité d'intégrer des caractéristiques d'économie d'énergie dès le début, en affectant des aspects qui seraient autrement plus difficiles à modifier (structures, installations, espaces, esthétique, etc.). Parmi les exemples de stratégies de conception économe en énergie pour les nouveaux bâtiments, citons l'optimisation de la lumière naturelle, la ventilation mécanique contrôlée, l'utilisation de murs, de toits et de fenêtres mieux isolés, le choix d'appareils et d'éclairages économes en énergie, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable telles que le soleil et le vent, et de technologies à haut rendement telles que les pompes à chaleur. En diminuant la consommation d'énergie, ces bâtiments peuvent réduire économiquement les coûts de la facture énergétique et l'impact sur l'environnement, et créer des environnements de vie ou de travail plus sains et plus confortables.

Les directives de l'Union européenne établissent une législation sur l'efficacité énergétique des bâtiments. La plus récente est la directive 2018/844/UE, connue sous le nom de directive sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB), qui fixe des objectifs pour l'efficacité énergétique des bâtiments existants et nouveaux dans l'UE. La directive exige que les pays membres prennent des mesures pour atteindre un niveau élevé de performance énergétique des bâtiments et encourage l'utilisation de sources renouvelables pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

Plus précisément, la directive stipule que

- Certificats de performance énergétique des bâtiments (CPE) - Les États membres doivent veiller à ce que des CPE soient délivrés pour tous les bâtiments lors de leur construction, de leur vente ou de leur location.
- Bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle (nZEB) - Les États membres doivent veiller à ce que tous les nouveaux bâtiments occupés et possédés par les autorités publiques soient des nZEB à partir du 31 décembre 2018, et que tous les nouveaux bâtiments soient des nZEB à partir du 31 décembre 2020. Un bâtiment répondant à ce concept présente une norme d'efficacité énergétique très élevée et n'utilise qu'une petite quantité d'énergie provenant de sources renouvelables.
- La rénovation des bâtiments existants - Les États membres doivent adopter une stratégie à long terme pour augmenter le taux de rénovation des bâtiments existants, dans le but d'atteindre un niveau significatif de rénovation énergétique d'ici 2050.
- Indicateur de préparation intelligente - Les États membres doivent veiller à ce que les nouveaux bâtiments, ainsi que les bâtiments faisant l'objet de rénovations importantes, soient conçus et construits de manière à être "prêts pour l'intelligence".
- Contrats de performance en matière d'économies d'énergie (ESPC) - Les États membres doivent encourager l'utilisation des ESPC, qui sont un moyen de financer les améliorations de l'efficacité énergétique des bâtiments grâce aux économies réalisées sur les factures d'énergie.
- Certificats nationaux de performance énergétique (CNPE) - Les États membres doivent veiller à ce que des CNPE soient délivrés pour tous les bâtiments lors de leur construction, de leur vente ou de leur location.
- Plan d'action national en matière d'efficacité énergétique (PNAEE) - Les États membres doivent établir et mettre en œuvre un PNAEE tous les cinq ans afin de définir les mesures qu'ils prendront pour améliorer la performance énergétique des bâtiments.

Les planificateurs, concepteurs et développeurs de bâtiments sont tenus d'utiliser des matériaux et des technologies ayant une valeur d'isolation thermique élevée et un faible impact sur l'environnement. Cela comprend l'utilisation de murs, de toits et de sols isolés, ainsi que de fenêtres et de portes à haut rendement, afin de minimiser les pertes de chaleur. En

⁴ Disponible à l'adresse [suivante](https://episcope.eu/welcome/) : <https://episcope.eu/welcome/>

outre, l'utilisation de systèmes d'énergie renouvelable tels que les systèmes solaires thermiques et photovoltaïques, les pompes à chaleur et les systèmes de stockage d'énergie thermique doit être favorisée pour fournir une proportion significative de l'énergie nécessaire au chauffage et au refroidissement du bâtiment. La directive DPEB encourage également l'utilisation de technologies intelligentes pour surveiller et contrôler la consommation d'énergie des bâtiments et pour permettre à leurs occupants d'ajuster plus facilement leur consommation d'énergie.

La sélection des matériaux et des technologies dépendra du contexte, de la disponibilité, du coût et d'autres facteurs spécifiques à chaque bâtiment et à chaque pays, mais la directive encourage l'utilisation des solutions les plus efficaces sur le plan énergétique.

Les différents pays membres ont adopté des mesures différentes pour se conformer à la législation européenne sur l'efficacité énergétique des bâtiments. Chaque pays européen dispose de sa propre législation, mais tous sont tenus de respecter la directive européenne. En Allemagne, par exemple, il existe une "loi fédérale sur l'efficacité énergétique dans les bâtiments" (2020) qui fixe des exigences minimales pour l'efficacité énergétique des bâtiments existants et nouveaux, et encourage l'utilisation de sources d'énergie renouvelable.

En Italie, le décret législatif du 26 juin 2015 "Application des méthodologies de calcul de la performance énergétique et définition des prescriptions et exigences minimales pour les bâtiments" définit la méthodologie de calcul de la performance énergétique des bâtiments, y compris l'utilisation de sources renouvelables, ainsi que les exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et des unités immobilières, conformément aux critères généraux mentionnés dans le décret législatif n°192 du 19 août 2005.

En France, la loi "Grenelle 1" de 2007 fixe des objectifs d'efficacité énergétique pour les bâtiments existants et neufs et encourage l'utilisation de sources d'énergie renouvelable. La France a adopté un système d'étiquetage de l'efficacité énergétique des bâtiments, similaire à ceux utilisés dans d'autres pays européens, afin de fournir aux consommateurs des informations facilement compréhensibles sur l'efficacité énergétique des bâtiments.

En Suisse, les réglementations nationales pour les bâtiments à haute efficacité énergétique comprennent la Directive sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB) et l'Ordonnance fédérale sur l'énergie (OEne, 2017). La DPEB fixe des exigences minimales pour la performance énergétique des bâtiments neufs et existants et encourage l'utilisation de sources d'énergie renouvelable. L'OEne fixe des normes d'efficacité énergétique pour les bâtiments et exige des inspections régulières pour en assurer la conformité. La Suisse a également adopté un système d'étiquetage énergétique des bâtiments similaire à ceux utilisés dans d'autres pays européens.

En Espagne, la réglementation nationale relative aux bâtiments à haut rendement énergétique comprend le Documento Básico Ahorro de la Energía (mis à jour en 2022), qui fait partie du Código Técnico de la Edificación (CTE). Ce document fournit des lignes directrices pour la limitation de la consommation d'énergie en fixant des exigences minimales pour le contrôle de la demande d'énergie (HE1), l'installation d'appareils (HE2, HE3) et les contributions minimales des sources d'énergie renouvelable (HE4, HE5). Le Real Decreto 390/2021, qui a remplacé le Real Decreto 47/2007, a approuvé les lignes directrices relatives aux normes d'efficacité énergétique pour les bâtiments. Il établit les procédures techniques et administratives qui doivent régir l'exécution des certifications d'efficacité et la méthodologie de calcul de la note d'efficacité énergétique, afin d'adopter un système d'étiquetage énergétique des bâtiments similaire à ceux utilisés dans d'autres pays européens.

En plus des exigences nationales précédentes, le concept de maison à énergie positive (MEP) devient de plus en plus populaire, car de plus en plus de pays s'efforcent de réduire leur empreinte carbone et de devenir plus durables. Une maison à énergie positive est un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme, contribuant ainsi au réseau. L'objectif d'un HPE est d'être autosuffisant sur le plan énergétique, voire positif sur le plan énergétique. Il est possible d'y parvenir en utilisant une conception et une technologie efficaces sur le plan énergétique, combinées à des sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux solaires.

1.3. Étiquetage énergétique et durable

Un système de certification de l'efficacité énergétique des bâtiments est un instrument utilisé pour évaluer et labelliser les bâtiments en fonction de leur performance énergétique. L'objectif de ces systèmes est de fournir des informations transparentes et comparables sur la performance énergétique des bâtiments, afin de permettre aux propriétaires et aux occupants des bâtiments de prendre des décisions éclairées en matière de consommation d'énergie et de coûts. Les systèmes de certification énergétique des bâtiments évaluent généralement la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique d'un bâtiment dans des domaines tels que le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et l'eau chaude, et attribuent une note ou un label sur la base de cette évaluation. Ces labels peuvent ensuite être utilisés pour comparer la performance énergétique de différents bâtiments.

Les certificats de performance énergétique portent des noms différents selon les pays européens. En voici quelques exemples :

- En Allemagne, le certificat est appelé "certificat de performance énergétique" ou "Energieausweis"
- En France, le certificat est appelé "Certificat de Performance Énergétique" ou "CPE"
- En Italie, le certificat est appelé "Attestato di Certificazione Energetica" ou "ACE"
- En Espagne, le certificat est appelé "Certificado de Eficiencia Energética" ou "CEE"
- En Suisse, le certificat s'appelle GEAK "Gebäudeenergieausweis der Kantone" ou "Certificat énergétique des bâtiments des cantons"
- Au Royaume-Uni, le certificat est appelé "certificat de performance énergétique" ou "EPC"

Il convient de noter que le format du certificat et les informations fournies varient légèrement d'un pays à l'autre.

D'autre part, il existe des systèmes de certification volontaires qui fixent des normes plus élevées en matière d'efficacité énergétique et de confort. Les bâtiments qui répondent à ces normes sont généralement plus efficaces sur le plan énergétique, plus sains et plus agréables à vivre que les bâtiments qui ne répondent qu'aux exigences minimales fixées par chaque "certificat de performance énergétique". Les certifications nationales volontaires visent à promouvoir l'efficacité énergétique et le développement durable dans les bâtiments et à fournir des informations supplémentaires aux consommateurs et aux propriétaires de bâtiments.

Parmi les exemples, on peut citer la "maison passive" allemande (ou "Passivhaus"), la "Minergie" suisse, la "Miljöbyggnad" suédoise, la "CasaClima" italienne et l'"Effinergie" française.

En Suisse, par exemple, les nouvelles constructions ou rénovations de bâtiments publics doivent au moins être conformes à la certification Minergie (ce qui n'est pas obligatoire pour les bâtiments privés).

Tous ces systèmes, d'une certaine manière, tentent d'atteindre le même objectif, à savoir fournir aux consommateurs un moyen simple et compréhensible d'accéder à l'efficacité énergétique des bâtiments et aider les gouvernements et les propriétaires de bâtiments à contrôler et à améliorer la performance énergétique de ces derniers.

1.4. Performance environnementale et durable d'un bâtiment

Les systèmes de certification des bâtiments écologiques sont un ensemble de systèmes et d'instruments d'évaluation utilisés pour évaluer les performances d'un bâtiment ou d'un projet de construction du point de vue de la durabilité et de l'environnement. Ces évaluations visent à améliorer la performance globale des bâtiments et des infrastructures, à intégrer une approche fondée sur le cycle de vie dans leur conception et leur construction et à promouvoir la réalisation par le secteur de la construction des objectifs de développement durable des Nations unies. Les bâtiments évalués et jugés capables de satisfaire à un certain niveau de performance et de qualité reçoivent un certificat attestant de cette réalisation.

Ces systèmes sont généralement développés par des organisations ou des groupes d'experts dans le domaine de la construction durable et sont destinés à être utilisés à l'échelle mondiale. Ils sont conçus pour fournir une méthode cohérente et transparente d'évaluation des performances environnementales et de durabilité des bâtiments, afin que les propriétaires, les promoteurs et les autres parties prenantes puissent prendre des décisions éclairées sur la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments.

Parmi les systèmes internationaux de certification des bâtiments durables, citons LEED⁵ (Leadership in Energy and Environmental Design) et BREEAM⁶ (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), deux systèmes largement reconnus et respectés.

BREEAM est une méthode d'évaluation de la durabilité des bâtiments développée par le Building Research Establishment (BRE) au Royaume-Uni, tandis que LEED est un système d'évaluation développé par le U.S. Green Building Council (USGBC).

Ces certifications comportent un ensemble de critères qu'un bâtiment doit respecter pour être certifié, tels que l'efficacité énergétique et l'efficacité de l'eau, la qualité de l'environnement intérieur, les matériaux et les ressources, etc. Il existe également différents niveaux de certification, tels que l'or, l'argent et le bronze. Les bâtiments qui répondent à ces critères

⁵ Disponible à l'adresse [suivante : https://www.usgbc.org/](https://www.usgbc.org/)

⁶ Disponible à l'adresse [suivante : https://bregroup.com/](https://bregroup.com/)

et obtiennent une certification peuvent démontrer au public, aux locataires et aux autorités de réglementation qu'ils sont respectueux de l'environnement et que leur impact sur l'environnement est moindre.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) et BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) sont des exemples de systèmes internationaux de certification des bâtiments durables utilisés dans de nombreux pays, y compris en Europe.

LEED et BREEAM sont souvent utilisés en plus des systèmes nationaux mentionnés précédemment. Ces certifications peuvent constituer un outil utile pour les propriétaires et les promoteurs immobiliers qui souhaitent démontrer les performances de leurs bâtiments en matière d'environnement et de développement durable.

Les systèmes internationaux de certification des bâtiments durables, tels que LEED et BREEAM, sont généralement élaborés par des organisations ou des groupes d'experts dans le domaine de la construction durable et sont destinés à être utilisés à l'échelle mondiale. Ils se veulent rigoureux et complets, couvrant un large éventail d'aspects environnementaux et durables de la conception, de la construction, de la mise en service et de l'exploitation des bâtiments.

Ces systèmes ne sont liés à aucune règle ou réglementation nationale ou régionale spécifique, mais ils sont conçus pour s'aligner sur les codes et réglementations locaux en matière de construction, et parfois même pour y être intégrés.

Les systèmes de certification internationale ne remplacent pas les réglementations nationales ou locales, mais peuvent être utilisés comme un outil pour s'y conformer. Ils peuvent également servir à démontrer la conformité avec les réglementations et codes locaux et à fournir des informations supplémentaires sur les performances environnementales et de durabilité du bâtiment.

En outre, de nombreux pays disposent de leurs propres systèmes d'évaluation des bâtiments écologiques, qui sont parfois alignés sur les systèmes d'évaluation internationaux tels que LEED ou BREEAM. Cela permet aux bâtiments d'être certifiés à la fois par les systèmes nationaux et internationaux.

Les systèmes internationaux de certification des bâtiments durables tels que LEED et BREEAM présentent certaines similitudes avec, par exemple, la norme suisse SNBS (Swiss National Standard for Sustainable Buildings) en ce qui concerne l'évaluation des performances des bâtiments en matière d'environnement et de durabilité.

Le standard de construction durable Suisse (SNBS) 2.1 est le standard global pour la construction durable en Suisse. Il intègre les instruments et outils existants tels que la recommandation SIA 112/1 "Construction durable - travaux de construction", les objectifs de la société à 2000 watts ou les critères Minergie et s'oriente vers les étapes du modèle de performance SIA. Selon la SNBS, les bâtiments administratifs, résidentiels et éducatifs peuvent être certifiés. Cela s'applique aussi bien aux nouvelles constructions qu'aux rénovations de bâtiments.

Tous ces systèmes sont conçus pour aider les propriétaires et les promoteurs de bâtiments à concevoir, construire et exploiter des bâtiments dont l'impact sur l'environnement est moindre. Ils peuvent être utilisés conjointement, bien que le respect des exigences de l'un d'entre eux ne garantisse pas la conformité avec l'autre.

2. SCÉNARIOS DE MODERNISATION POSSIBLES

La rénovation des bâtiments fait l'objet d'un grand débat et peut être de deux types : rénovation superficielle ou rénovation profonde. La rénovation superficielle est la plus répandue et se concentre sur des mesures d'économie d'énergie à faible risque avec un temps de retour sur investissement (PBT) court, telles que l'amélioration partielle de l'éclairage, le remplacement et la remise en service des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, ou l'installation de sources d'énergie renouvelable (SER) en raison de coûts réels favorables ou d'incitations. D'autre part, une rénovation profonde réduit la consommation d'énergie par rapport aux niveaux antérieurs à la rénovation, généralement de plus de 60 %. Ces interventions comprennent souvent la rénovation de l'enveloppe du bâtiment (isolation de la façade et/ou du toit, remplacement des fenêtres et amélioration significative de l'étanchéité à l'air du bâtiment) et la remise à neuf du système de CVC.

Aujourd'hui, les interventions sont principalement de nature superficielle, en raison des coûts d'investissement initiaux plus élevés des rénovations profondes. En moyenne, une rénovation peu profonde peut coûter environ 650 €/m² (par rapport à la surface de plancher nette), alors qu'une rénovation profonde habituelle coûte environ 830 €/m². De plus, le temps nécessaire pour les travaux de rénovation profonde est 25 % plus élevé que pour les travaux de rénovation superficielle. D'autres problèmes se posent : difficultés d'accès à de nombreux bâtiments, perturbations potentielles pour les occupants et le voisinage, faible niveau de sensibilisation, réticence aux risques et/ou manque d'expérience des

opérateurs (architectes, installateurs, propriétaires de bâtiments) et peu de solutions intégrées susceptibles de résoudre différents problèmes en une seule fois, par exemple des réparations structurelles couplées à des mesures d'efficacité énergétique.

L'UE ayant pour objectif de passer à 100 % d'énergies renouvelables dans les bâtiments d'ici 2050, il convient de procéder à des rénovations profondes lorsque c'est possible pour atteindre cet objectif. La réduction du temps nécessaire à la mise en œuvre d'une rénovation profonde et la réduction des coûts d'installation sont deux des questions les plus importantes à traiter. La préfabrication pourrait être une solution intéressante car elle permet de réduire les variations de la qualité des produits et du calendrier des processus, de réduire les temps de cycle pour la production et l'installation et de prendre en charge diverses technologies de suivi qui contribuent à rendre le processus visible.

Les solutions modulaires internes plus petites peuvent être plus efficaces et peuvent être appliquées à différents types de bâtiments : les bâtiments historiques où il est impossible de modifier la façade extérieure, les bâtiments à plusieurs étages où l'isolation extérieure peut être compliquée, les bâtiments situés dans les centres-villes où l'échafaudage extérieur peut représenter un problème et les bâtiments qui ont déjà été partiellement rénovés (rénovation de deuxième étape), par exemple la toiture et/ou la peinture extérieure. L'isolation intérieure peut donc être une solution très intéressante qui pourrait permettre une plus grande diffusion des interventions de rénovation profonde. Cependant, elle est encore peu adoptée. Les solutions modulaires intérieures sont donc très attrayantes et n'ont pas fait l'objet d'études aussi approfondies que l'isolation extérieure, et représentent donc une solution potentielle pour la rénovation profonde des bâtiments. Un point crucial est de savoir comment concevoir, construire et gérer des solutions modulaires et en même temps comment industrialiser le site de travail afin d'augmenter l'efficacité des travailleurs et d'accélérer le processus de rénovation profonde du bâtiment. Une question importante à résoudre est la possibilité de renforcer les structures et de rendre le bâtiment antisismique.

La qualité de l'environnement intérieur (QIE, contrôle de la température et de l'humidité, QAI, protection solaire) est une question cruciale qui doit être examinée avec soin et qui peut représenter une partie des coûts élevés et du calendrier des travaux de rénovation. Des solutions intégrées appropriées, avec des technologies et une maintenance faciles à utiliser, permettent d'assurer une bonne QEI et de maintenir les solutions de confort prévues lors de la phase de conception.

Une grande partie des efforts doit être orientée vers les bâtiments civils qui sont à la fois de type résidentiel et non résidentiel. Un effort particulier doit être fait pour les bâtiments ayant une grande valeur intrinsèque, soit parce qu'ils sont historiques, soit parce qu'ils ont un rôle social, c'est-à-dire les logements sociaux, les bâtiments publics, les organisations à but non lucratif (OBNL), les organisations non gouvernementales (ONG) et les églises. Ces bâtiments peuvent représenter des bonnes pratiques de pointe et l'effet de levier peut être obtenu par l'amplification que les entreprises/organismes publics et les églises, les ONG et les OBNL. En effet, d'une part, ils possèdent un large portefeuille de bâtiments en stock et d'autre part, ils disposent d'un réseau cohérent. Ainsi, grâce aux activités de communication et d'information, les citoyens peuvent être plus conscients des solutions de rénovation profonde. De plus, ils sont présents dans de vastes zones/régions, ce qui permet une large reproductibilité géographique.

Un effort particulier doit être fait pour vérifier l'analyse coût-bénéfice afin de permettre l'utilisation de systèmes faciles à installer (solutions "plug and play") avec différentes sources d'énergie renouvelable locales telles que les panneaux solaires photovoltaïques et les pompes à chaleur géothermiques. Comme cela a été démontré dans la littérature, la combinaison de solutions photovoltaïques et de pompes à chaleur géothermiques est un bon moyen de réaliser des solutions nZEB avec des temps de retour sur investissement raisonnables.

Les bâtiments ciblés dans les quartiers urbains sont des bâtiments résidentiels et non résidentiels existants et historiques où l'isolation extérieure n'est que parfois facilement applicable, avec une attention particulière. La définition de stratégies au niveau urbain nécessite le développement d'archétypes de bâtiments pour élargir la perspective de l'échelle du bâtiment unique (Carnieletto et Ferrando, 2021), représentant la typologie de bâtiments la plus courante à des fins de modélisation. Cette approche est importante pour mieux définir les obstacles potentiels à l'application d'une stratégie de rénovation spécifique. Les archétypes sont généralement définis comme des bâtiments théoriques obtenus par analyse statistique des caractéristiques des bâtiments, regroupés sur la base de similitudes (Carnieletto et Ferrando, 2021). Les archétypes de bâtiments peuvent également être définis comme des modèles permettant l'application d'outils de simulation pour évaluer la demande énergétique d'un large parc immobilier (Ferrando et Causone, 2020). Même si l'application de la modélisation basée sur les archétypes nécessite certaines simplifications, la littérature montre qu'elle permet le développement de stratégies et de technologies innovantes pour augmenter l'efficacité énergétique avec des résultats acceptables à la fois à l'échelle d'un seul bâtiment et à l'échelle urbaine, comme présenté dans les travaux de Fracastoro et Ferraino (2011), Dall'O' et Galante (2012), Pratavia et Romano (2021) et Teso et Carnieletto (2022).. Par conséquent, la réduction potentielle de la consommation d'énergie peut être comparée à d'autres paramètres de gestion économique.

2.1. Mesures de modernisation possibles

Comme nous l'avons déjà mentionné, le projet GEO4CIVHIC s'intéresse à la rénovation des bâtiments existants et historiques dans les centres urbains, en utilisant des pompes à chaleur géothermiques. La structure typique des bâtiments historiques (c'est-à-dire construits avant 1950) consiste en des murs extérieurs en briques pleines (50 cm) éventuellement séparés par une lame d'air de 5 cm en fonction du climat de l'endroit considéré. Les toits typiques des bâtiments historiques ont une charpente en bois qui supporte une couche de bois avec les tuiles. Le grenier situé en dessous peut être séparé des pièces par un grenier non utilisable formé par une autre couche de bois soutenue par des solives.

En ce qui concerne les bâtiments existants, une construction de référence peut être définie comme des blocs perforés de 25 cm ou des blocs cellulaires en briques, éventuellement séparés par une lame d'air de 5 cm. Les toits doivent être définis en fonction de l'emplacement ; à Strasbourg et Helsinki, par exemple, on trouve des toits inclinés en briques et béton avec des tuiles, tandis qu'à Athènes, les toits horizontaux ont des poutres en béton et des blocs plats en briques creuses. Étant donné que de nombreux bâtiments historiques sont classés et qu'il est impossible d'y installer une isolation, le remplacement de la chaudière à gaz par une pompe à chaleur haute température alimentant les radiateurs a également été envisagé. Par conséquent, les solutions doivent prendre en compte à la fois les terminaux à haute température et les systèmes d'émission de chaleur à moyenne et basse température (c'est-à-dire les ventilo-convecteurs et les systèmes radiants).

En cas de rénovation de l'enveloppe, la stratégie proposée suggère d'isoler les parois opaques à l'aide d'un PSE de 12 cm appliqué du côté intérieur afin de tenir compte des limitations potentielles liées à la protection du patrimoine culturel ou à l'agencement urbain. Cette stratégie peut ne pas permettre l'utilisation d'une isolation extérieure dans les centres-villes et peut réduire la zone piétonne en raison de la réduction de la surface de la chaussée. L'épaisseur de la couche d'isolation est une valeur moyenne qui ne réduit pas excessivement la surface intérieure nette disponible, ce qui est considéré comme positif par l'utilisateur. Les planchers intérieurs devraient également être légèrement isolés afin d'envisager l'installation éventuelle de systèmes radiants qui peuvent être mieux couplés avec des pompes à chaleur géothermiques en raison de la température plus basse requise (Carnieletto et Kazanci, 2018). Le remplacement des fenêtres devrait être inclus pour réduire les pertes thermiques globales.

En supposant que la plupart des bâtiments soient alimentés par des chaudières à gaz standard, la première stratégie proposée est le remplacement par une PAC Géo plus efficace (cas 0), combiné au remplacement des systèmes d'émission à moyenne ou basse température (c'est-à-dire les ventilo-convecteurs ou les systèmes radiants) à la fois pour le chauffage et le refroidissement (cas 1), éventuellement couplé à l'isolation thermique de l'enveloppe (cas 2 et 3).

Ainsi, dans l'ensemble, quatre solutions potentielles de modernisation ont été étudiées (Figure 2-) :

- Cas 0 : la chaudière standard est remplacée par une pompe à chaleur à haute température et les radiateurs traditionnels sont conservés.
- Cas 1 : la chaudière standard est remplacée par une PAC Géo et les unités terminales de chauffage et de refroidissement sont remplacées soit par des ventilo-convecteurs (1a), soit par un système radiant (1b).
- Cas 2 : la chaudière standard est remplacée par une PAC Géo, les radiateurs sont maintenus, mais l'isolation du bâtiment est améliorée.
- Cas 3 : la chaudière standard est remplacée par une PAC Géo, les unités terminales de chauffage et de refroidissement sont remplacées par des ventilo-convecteurs (3a) ou un système radiant (3b) et l'isolation du bâtiment est améliorée.

CAS DE BASE

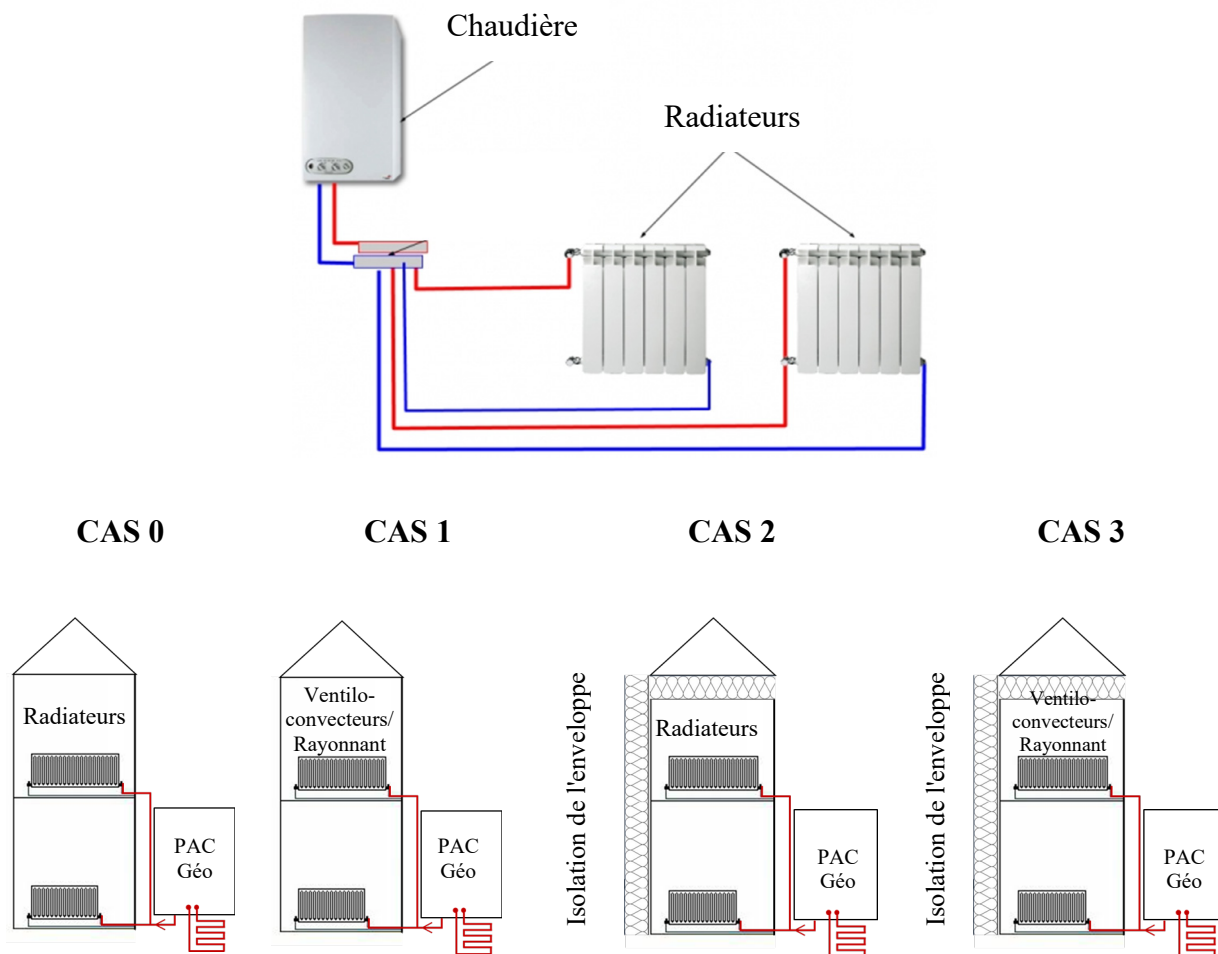


Figure 2-1. Schéma simplifié des stratégies de rénovation appliquées

2.2. Dimensionnement des échangeurs de chaleur souterraine

La longueur totale du forage nécessaire pour assurer le chauffage et le refroidissement des locaux et l'extension du champ des sondes géothermiques double U a été estimée à l'aide de la méthode ASHRAE (ASHRAE, 2011). Les données requises sont la demande saisonnière d'énergie thermique et la charge de pointe pour le chauffage et le refroidissement des locaux. Les résultats peuvent être comparés à des projets antérieurs tels que Cheap GSHPs (pompes à chaleur géothermiques) et avec l'outil Web comme TABULA⁷.

Pour prendre en compte l'interférence des forages adjacents dans le calcul de la longueur totale de forage nécessaire, la méthode ASHRAE a été appliquée deux fois de suite, en appliquant l'outil développé par Capozza et al. (Capozza et Zarrella, 2015). Dans le premier calcul, les longueurs de forage requises pour le chauffage (L_h) et le refroidissement (L_c) sont calculées. Une fois calculée la profondeur globale idéale basée sur le modèle de source linéaire, la valeur la plus élevée entre L_c et L_h est divisée par la profondeur des sondes, qui sont considérées comme étant de longueur égale. L'espacement entre les échangeurs de chaleur de forage a été fixé à 7 m pour limiter les interférences thermiques, conformément aux caractéristiques du site (Lee et Park, 2021). Lors de la deuxième itération, L_h et L_c sont évalués avec plus de précision en tenant compte de la température limite (t_p).

Le dimensionnement optimal de la longueur du forage pour l'installation dépend de la demande d'énergie du bâtiment ; dans les conditions à dominante de refroidissement, par exemple, c'est souvent la saison estivale qui impose la condition la plus critique pour le dimensionnement du système. La réduction des pertes de transmission obtenue par l'isolation de

⁷ Disponible à l'adresse [suiivante](https://webtool.building-typology.eu) : <https://webtool.building-typology.eu>

l'enveloppe du bâtiment peut augmenter la constante de temps du bâtiment, ce qui peut être bénéfique pour la demande de refroidissement dans les endroits où le refroidissement domine.

Les valeurs typiques du COP et de l'EER de la pompe à chaleur raccordée à différentes unités terminales de chauffage et de refroidissement (radiateurs, ventilo-convecteurs, plancher radiant) sont présentées dans le tableau suivant. Le Tableau 2-1 pour trois conditions climatiques représentatives d'un lieu chaud (Athènes), doux (Strasbourg) et froid (Helsinki). Ces valeurs ont été déterminées à partir des fiches techniques de pompes à chaleur réelles, en choisissant les valeurs saisonnières du COP et de l'EER en fonction des critères de conception du système. Sur base des températures locales, on constate que plus le climat est froid, plus le COP est faible et plus l'EER est élevé.

Tableau 2-1. Valeurs nominales et saisonnières de la pompe à chaleur connectée aux différents systèmes de chauffage et de refroidissement

		Entrée/sortie Température [°C]	ATHENES		STRASBOURG		HELSINKI	
			Conception COP/EER	Saisonnier COP/EER	Conception COP/EER	Saisonnier COP/EER	Conception COP/EER	Saisonnier COP/EER
Chauffage	Radiateur	75 - 65	2.4	2.5	2.4	2.5	2.4	2.5
	Ventilo-convecteur	45 - 40	3.6	4.1	3	3.3	2.7	3
	Rayonnant	35 - 30	4.8	5.3	3.8	4.3	3.4	3.8
Refroidissement	Ventilo-convecteur/ Rayonnant	7 - 12	4	4.4	5	5.5	5.9	6.5

Trois valeurs de conductivité thermique et de capacité thermique volumique sont spécifiées dans le Tableau 2-2 comme valeurs de référence pour les types de sol les plus courants. Ces valeurs de propriétés thermiques ont été sélectionnées en fonction des principaux résultats présentés par plusieurs projets de recherche axés sur la détermination des propriétés thermiques du sol pour les applications de pompes à chaleur sur sol peu profond, en recueillant des données sur les dépôts non consolidés, les roches sédimentaires, métamorphiques et ignées (Galgaro et Dalla Santa, 2021). Dans l'application présentée dans les chapitres suivants, seule la composante de conduction de l'échange de chaleur entre la sonde et le sol est prise en compte. La contribution de la convection due à l'écoulement de l'eau souterraine, qui pourrait augmenter la conductivité thermique équivalente du sous-sol et donc réduire la longueur totale requise pour les sondes géothermiques, est ici négligée par souci de simplicité.

Tableau 2-2. Propriétés thermiques des trois types de sol considérés

Conductivité thermique [W/(m K)]	1.5	2.2	3.0
Volume spécifique Capacité thermique [MJ/(m ³ K)]	2.0	2.5	2.6

L'installation de systèmes PAC Géo dans les zones urbaines est généralement compliquée, principalement en raison de l'espace limité disponible, qui correspond généralement à de petites cours intérieures ou à des jardins.

2.3. Longueur optimale des sondes géothermiques

Synthèse des résultats présentés dans le dernier paragraphe, la Figure 2-2 et le Tableau 2-3 montrent les scénarios possibles, en comparant la longueur maximale disponible (L_{max}) avec la longueur des sondes nécessaire pour satisfaire la demande d'énergie du bâtiment pour le refroidissement (L_c) et le chauffage (L_h). Trois options sont possibles :

- A : Espace disponible suffisant pour les sondes afin de satisfaire l'énergie requise
- B : Seule la demande d'énergie pour le chauffage ou le refroidissement peut être satisfaite par rapport à l'espace disponible ($L_{max} < L_h$ ou $L_{max} < L_c$) ;

- C : Il n'y a pas assez d'espace pour satisfaire la demande de chauffage ou de refroidissement du bâtiment ($L_h > L_{max}$ et $L_c > L_{max}$)

Lorsque la longueur des sondes n'est pas suffisante pour répondre à la demande énergétique du bâtiment, la combinaison avec une pompe à chaleur air-eau (PAC air-eau) a été étudiée pour permettre au système combiné de répondre à la demande thermique requise.

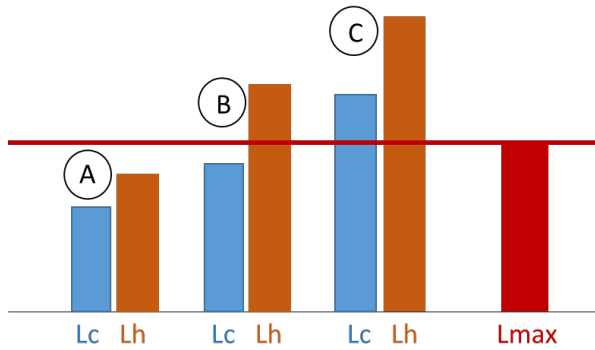


Figure 2-2. Scénarios possibles pour les études de cas

A) LH, LC < Lmax	
1 - $L_h \approx L_c$ (écart de 15 % accepté)	$L = \max(L_h, L_c)$
2 - $L_h > L_c$	2a) $L = L_h$ 2b) $L = L_c + \text{PAC Aéro}$
3 - $L_c > L_h$	3a) $L = L_c$ 3b) $L = L_h + \text{PAC Aéro}$
B) LH ou LC > Lmax	
1 - $L_h > L_{max}$	$L = L_c + \text{PAC Aéro}$
2 - $L_c > L_{max}$	$L = L_h + \text{PAC Aéro}$
C) LH, LC > Lmax	
$L = L_{max} + \text{PAC Aéro}$	

Tableau 2-3. Longueur optimale des sondes géothermiques

En considérant la combinaison des scénarios possibles, différents cas peuvent être étudiés pour décider de la longueur optimale des sondes, en particulier :

- Cas A1 : la longueur des sondes est presque la même pour le chauffage et le refroidissement, le maximum des deux peut être choisi (demande totale du bâtiment avec une pompe à chaleur réversible eau/eau). Un écart d'environ 15% a été adopté.
- Cas A2 et A3 : si la différence entre L_h et L_c est supérieure à 15 %, le choix peut être fait en considérant soit la plus grande longueur des sondes (sous-cas 2a et 3a avec une PAC Géo complète), soit la plus petite longueur des sondes (sous-cas 2b et 3b) avec un système hybride qui utilise deux sources, l'eau et l'air (PAC Géo + PAC Aéro) ; dans ce cas, il est possible d'adopter/considérer une machine appropriée mettant en œuvre deux sources en même temps (Zarrella et Zecchin, 2019).
- Cas B1 et B2 : si l'une des longueurs de forage est inférieure à la longueur maximale disponible et que l'autre est plus longue, un système hybride est la solution unique, permettant à la PAC Géo de gérer la partie équilibrée de la charge de base et à la PAC Aéro de prendre en charge le reste des charges - c'est-à-dire que la longueur totale optimale des forages est la plus courte, et l'énergie qui n'est pas fournie par la PAC Géo est fournie par la source aérothermique (PAC Géo + PAC Aéro). De cette manière, le facteur d'utilisation de la pompe à chaleur est maximisé.
- Cas C : si les deux longueurs sont supérieures à la longueur maximale disponible, la longueur optimale de la sonde à installer est la longueur maximale autorisée, en intégrant l'énergie excédentaire dans une solution hybride (PAC Géo + PAC Aéro). De cette manière, comme dans les cas B1 et B2, le facteur d'utilisation de la PAC Géo est maximisé en équilibrant la charge de base et la charge restante est fournie par l'PAC Aéro.

3. ÉTUDES DE CAS

Les paragraphes suivants présentent les résultats obtenus à partir de trois études de cas réalisées dans le cadre du projet GEO4CIVHIC. Le Tableau 3-1 montre la demande d'énergie pour les bâtiments résidentiels existants et historiques, pour Athènes, Strasbourg et Helsinki comme base de référence pour le dimensionnement du champ de sondes. La réduction de la consommation d'énergie est significative lorsque l'on considère les bâtiments rénovés, à la fois pour les cas existants et historiques, en raison de la réduction des pertes de transmission à travers l'enveloppe. Si l'on compare les résultats obtenus pour les cas de référence (c'est-à-dire les bâtiments existants et historiques sans rénovation), dans les climats doux et froids, la demande d'énergie de chauffage dans les bâtiments est dominante, tandis que les climats chauds présentent une demande d'énergie de refroidissement dominante. En revanche, les demandes d'énergie pour le

chauffage et le refroidissement sont similaires pour les bâtiments rénovés à Strasbourg, ce qui est un résultat important pour le dimensionnement du champ de sondes géothermiques.

Tableau 3-1. Charges énergétiques pour le chauffage et la climatisation dans les trois sites [kWh/(m² y)].

Demande d'énergie [kWh/(m ² y)]		Existants		Historique	
		Base de référence	Rénovation	Base de référence	Rénovation
Athènes	Chauffage	13.1	0.4	32.6	1.1
	Refroidissement	69.5	44.1	78.7	48.8
Strasbourg	Chauffage	72.6	21.5	104.2	26.4
	Refroidissement	30.2	27.3	35.6	31.2
Helsinki	Chauffage	122.3	41.9	158.4	50.5
	Refroidissement	19.1	18.5	23.3	25.4

Comme nous le savons déjà, les performances de la PAC Géo sont influencées par la conductivité thermique du sol. La conductivité thermique moyenne de 2,2 W/(m K) et la capacité thermique volumique spécifique de 2,5 MJ/(m³ K) ont été choisies pour l'analyse détaillée des résultats présentés dans cette section.

Les résultats finaux de la méthode ASHRAE qui seront présentés pour chaque étude de cas correspondent aux longueurs de forage requises pour le chauffage (Lh) et le refroidissement (Lc), qui sont comparées à la longueur maximale possible. L'archétype se réfère à une maison en terrasse typique qui peut accueillir les sondes disposées linéairement dans la cour à environ 3,3 m du voisinage et à 7 m entre eux pour éviter les interférences thermiques. Ces hypothèses conduisent à un maximum de 3 BHE pour l'installation, ce qui limite la longueur des LH et LC à 300 m. L'analyse a été réalisée en supposant que les études de sol et les permis nécessaires ont déjà été requis et obtenus par l'autorité locale responsable, comme l'exige la Convention pour la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel (UNESCO, 1972).

3.1. Athènes

À Athènes, si l'on considère l'installation d'une pompe à chaleur sans isolation de l'enveloppe du bâtiment (Figure 3-a) et avec rénovation de l'enveloppe (Figure 3-b), la charge thermique requise par le bâtiment est déséquilibrée. L'énergie échangée avec le sol en été, et donc la longueur de forage requise pour le refroidissement (Lc), est beaucoup plus importante que l'énergie requise pour le chauffage (Lh). Lc a été défini parce qu'à l'origine aucun système de refroidissement n'était censé être présent, tandis que Lh a diminué de 6 % et 13 % pour les bâtiments existants et historiques respectivement en comparant la condition de base avec le cas 3-1b (rénovation de l'enveloppe combinée avec le remplacement des systèmes de distribution et de production). Malgré le déséquilibre de la charge thermique, la pompe à chaleur peut être utilisée pour éviter les problèmes de dérive thermique du sol, car la température de pénalité, calculée avec la méthode ASHRAE, est inférieure à 1 °C dans tous les cas. Comme le montrent les diagrammes, si la rénovation de l'enveloppe est effectuée, la longueur de forage nécessaire pour le chauffage est considérablement réduite en raison de la demande d'énergie plus faible requise par le bâtiment grâce à la réduction des pertes de transmission. Dans ce cas, la longueur de la sonde pour le refroidissement est légèrement réduite, ce qui indique une augmentation du déséquilibre entre la charge thermique de chauffage et de refroidissement.

Compte tenu des caractéristiques moyennes du sol, les longueurs de forage requises sont plus courtes que dans le cas d'une conductivité thermique de 1,5 W/(m K) (voir l'annexe), de sorte que Lh et Lc sont inférieures à la longueur maximale autorisée (Lmax). L'effet inverse est encore plus évident pour $\lambda=3$ W/(m K).

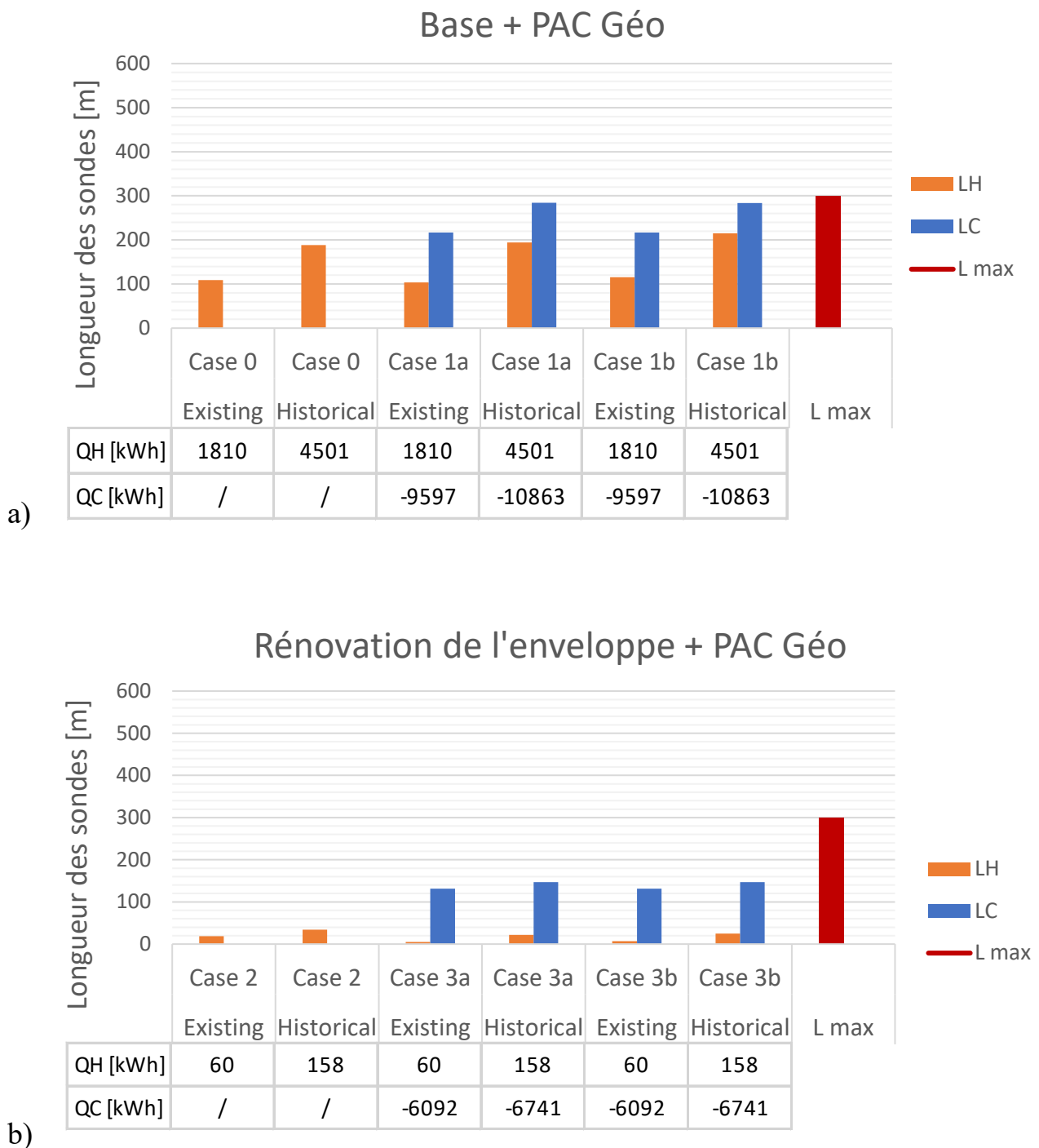


Figure 3-1. Comparaison entre la longueur maximale disponible et la longueur de forage nécessaire pour satisfaire la demande d'énergie pour les trois typologies de bâtiments à Athènes sans (a) et avec (b) isolation de l'enveloppe.

3.2. Strasbourg

Les cas avec une enveloppe rénovée (Figure 3-b) présentent une demande d'énergie équilibrée pour le chauffage et la climatisation grâce à une réduction de la charge thermique pendant la saison de chauffage, tandis que le cas sans isolation (Figure 3-a) présente une charge thermique déséquilibrée avec une demande d'énergie plus élevée en mode chauffage. Par conséquent, l'application d'une rénovation profonde permet un dimensionnement optimisé de la sonde, en supposant une profondeur d'installation qui peut hypothétiquement fournir la quasi-totalité de la demande d'énergie pour le

chauffage et le refroidissement. La longueur des sondes pour le chauffage des locaux est réduite de 50 % et de 55 % pour les bâtiments existants et historiques respectivement, tandis que le dimensionnement d'une longueur de sondes a été prévue pour le refroidissement des locaux.

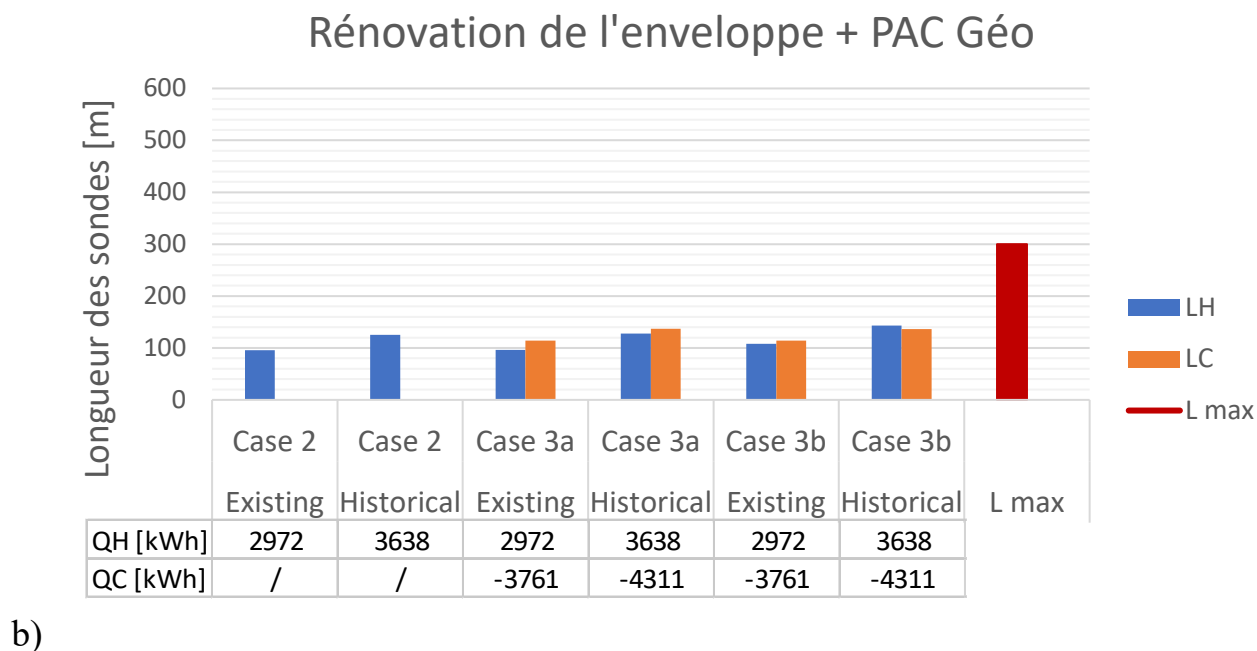
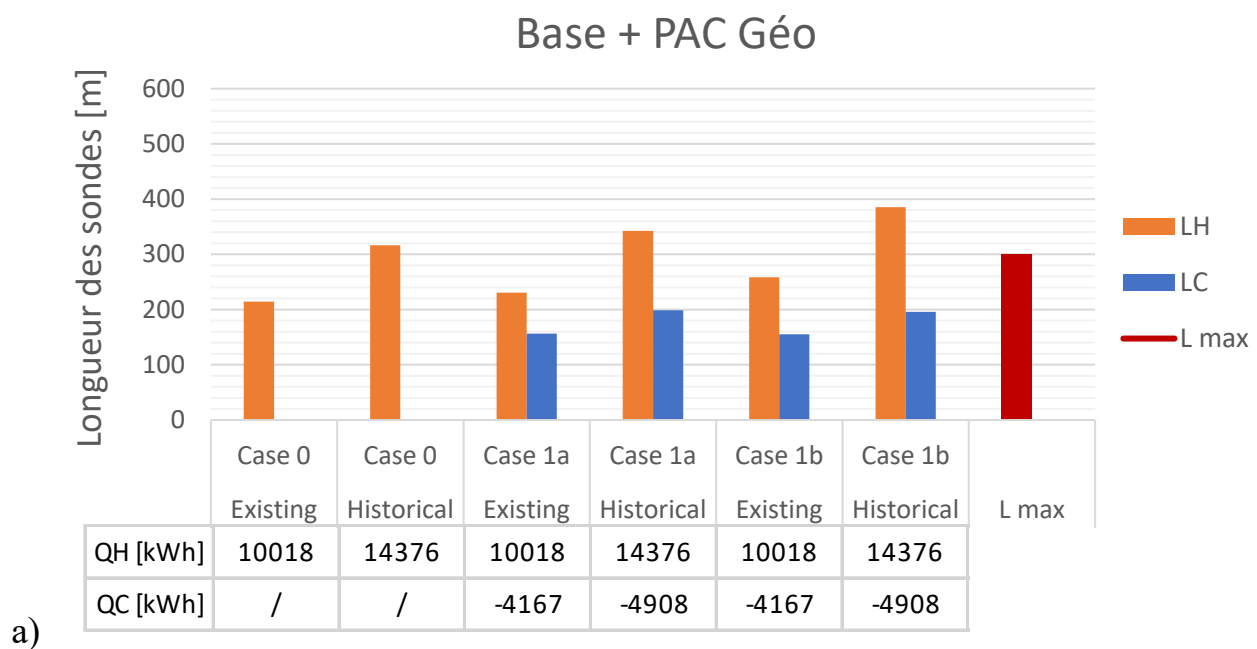


Figure 3-2. Comparaison entre la longueur maximale disponible et la longueur de forage nécessaire pour satisfaire la demande d'énergie pour les trois typologies de bâtiments à Strasbourg sans (a) et avec (b) isolation de l'enveloppe.

3.3. Helsinki

Si l'on considère les cas situés à Helsinki, la charge thermique déséquilibrée de l'enveloppe non rénovée (Figure 3-3a), est légèrement plus prononcée qu'à Strasbourg. Bien que l'application de la rénovation profonde nécessite une longueur de chauffage plus petite, qui est réduite de 45% à 61% pour les bâtiments existants et historiques en comparant le cas de base avec le cas 3-3b, la charge de chauffage est toujours dominante, ce qui complique le dimensionnement des sondes pour répondre efficacement à la demande d'énergie du bâtiment.

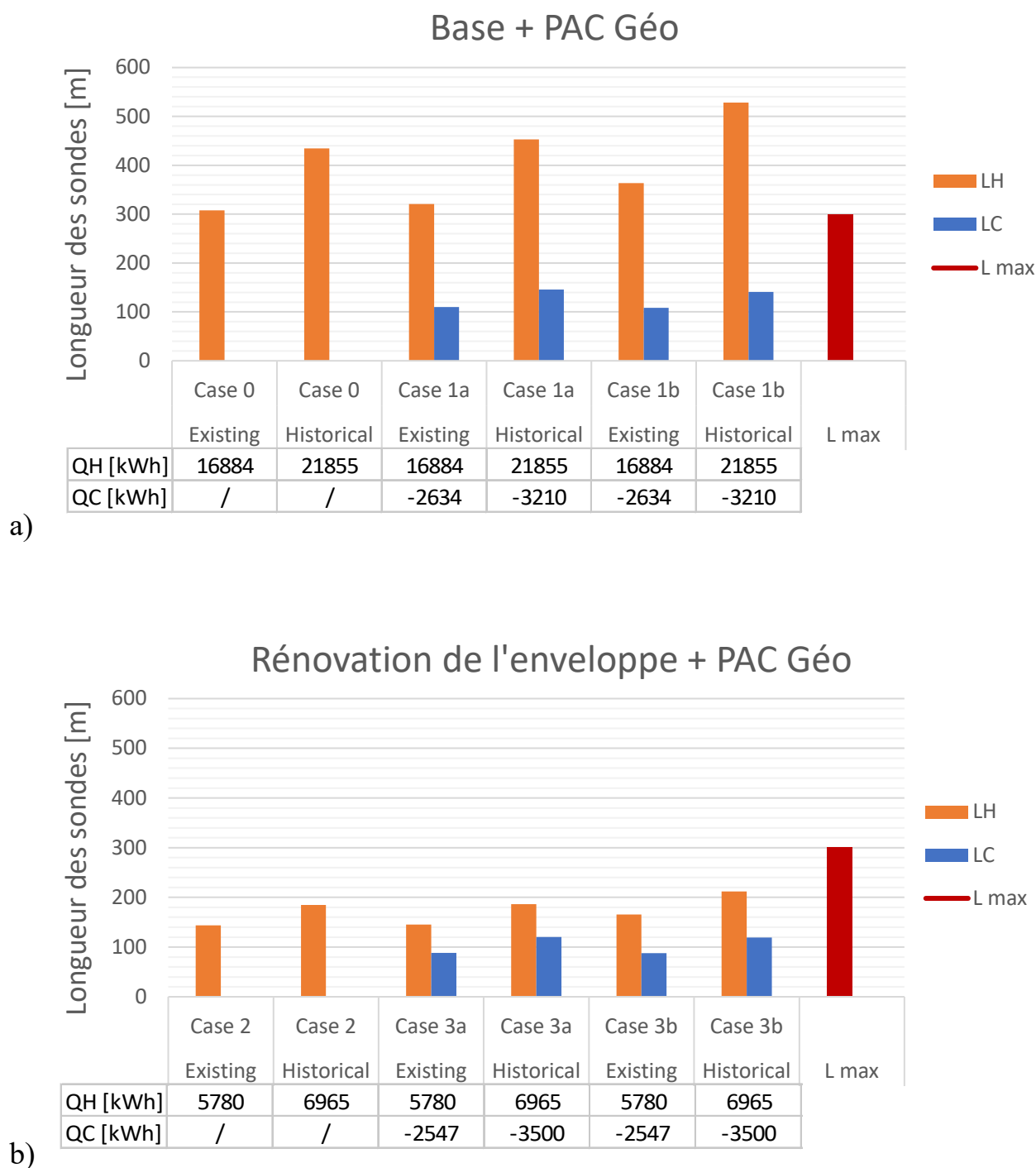


Figure 3-3. Comparaison entre la longueur maximale disponible et la longueur de forage nécessaire pour satisfaire les typologies de demande d'énergie pour Helsinki sans (a) et avec (b) isolation de l'enveloppe

3.4. Longueur optimale des sondes

La méthodologie expliquée à la section 2.2.1 et présentée dans le Tableau 2-3 a été utilisée pour définir correctement la longueur optimale de la sonde à installer afin d'éviter des problèmes tels que la dérive thermique due à la charge thermique extrêmement déséquilibrée des bâtiments (voir le Tableau 3-2 pour les cas de référence finaux).

Lorsque la chaleur échangée dans le sol est presque équilibrée entre la période de chauffage (chaleur extraite du sol) et la période de refroidissement (chaleur libérée dans le sol), le choix optimal est de fixer la même durée pour le chauffage et le refroidissement afin d'éviter une dérive de la température du sol. L'utilisation d'une source d'air lorsque la source géothermique n'est pas suffisante permet d'optimiser les sources d'énergie disponible et d'augmenter l'efficacité du système, car la pompe à chaleur aérothermique est plus efficace pendant les saisons intermédiaires, en particulier lorsque la température de l'air est plus élevée que celle du sol (Zarella et Zecchin, 2018).

Parmi les différents cas, lorsqu'une rénovation profonde est effectuée, la longueur des sondes est considérablement réduite en hiver (L_h), alors que la longueur nécessaire pour le refroidissement (L_c) reste presque constante. Pour cette raison, le cas B est plus fréquent lorsque l'on considère les climats chauds, car la demande d'énergie de chauffage peut être négligée, mais la demande d'énergie de refroidissement est significativement élevée.

Tableau 3-2. Longueur finale choisie pour les sondes

			L_h	L_c	Cas*	L installé (a)	L installé (b)
			[m]	[m]		[m]	[m]
Cas 0 radiateurs	Athènes	Existants	85	-	2a	85	-
		Historique	150	-	2a	150	-
	Strasbourg	Existants	190	-	2a	190	-
		Historique	280	-	2a	280	-
	Helsinki	Existants	265	-	2a	265	-
		Historique	375	-	4	-	300
Cas 1 ventilo-convecteurs	Athènes	Existants	75	200	3a/3b	200	75
		Historique	140	250	3a/3b	250	140
	Strasbourg	Existants	180	140	2a/2b	180	140
		Historique	265	170	2a/2b	265	170
	Helsinki	Existants	250	100	2a/2b	250	100
		Historique	355	135	2a/2b	300	135
Cas 1 système radiant	Athènes	Existants	80	200	3a/3b	200	80
		Historique	150	250	3a/3b	250	150
	Strasbourg	Existants	200	140	2a/2b	200	140
		Historique	295	170	2a/2b	295	170
	Helsinki	Existants	275	100	2a/2b	275	100
		Historique	400	130	4	300	130
Cas 2 radiateurs	Athènes	Existants	15	-	2a	15**	-
		Historique	25	-	2a	25**	-
	Strasbourg	Existants	85	-	2a	85	-
		Historique	105	-	2a	105	-
	Helsinki	Existants	115	-	2a	115	-
		Historique	155	-	2a	155	-
Cas 3 ventilo-convecteurs	Athènes	Existants	5	115	3a	115	-
		Historique	15	135	3a	135	-
	Strasbourg	Existants	75	105	3a/3b	105	75
		Historique	95	120	3a/3b	120	95
	Helsinki	Existants	105	80	2a/2b	105	80
		Historique	140	110	2a/2b	140	110
Cas 3	Athènes	Existants	5	115	3a	115	-
		Historique	15	135	3a	135	-

système radiant	Strasbourg	Existants	80	105	1	105	-
		Historique	105	125	3a/3b	125	-
	Helsinki	Existants	120	80	2a/2b	120	80
		Historique	155	110	2a/2b	110	155
* Réf. Tableau 2-3							
** Lorsque $\max(L_h, L_c) \ll L_{probe}$, PAC Géo n'est pas nécessaire							

4. INTÉGRATION DES POMPES À CHALEUR GÉOTHERMIQUES A D'AUTRES SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE (RES)

Dans un nZEB, il est possible d'atteindre les objectifs de consommation d'énergie et d'améliorer l'économie d'énergie en intégrant les pompes à chaleur à l'électricité renouvelable et/ou à d'autres systèmes d'approvisionnement en énergie thermique renouvelable. Ces systèmes sont appelés systèmes hybrides de chauffage, de ventilation et de climatisation (PAC GSH). Ils peuvent également permettre d'équilibrer les charges annuelles de chauffage et de refroidissement des bâtiments, ce qui est nécessaire pour éviter la dégradation de la température du sol. La disponibilité d'électricité renouvelable sur place grâce à des panneaux photovoltaïques ou à des microturbines éoliennes peut réduire efficacement les émissions de CO₂ résultant de la consommation d'électricité par le compresseur de la pompe à chaleur, les pompes de circulation d'eau du système hydraulique et les ventilateurs des unités terminales intérieures. L'intégration de composants de stockage d'énergie, qu'ils soient thermiques (par exemple, des réservoirs remplis de matériaux à changement de phase, MCP) ou électriques (par exemple, des batteries), peut encore améliorer l'économie et l'efficacité énergétique globale.

Pour assurer le bon fonctionnement du système et améliorer l'utilisation de l'énergie, des algorithmes de contrôle avancés doivent être adoptés. L'intégration d'autres sources d'énergie renouvelable complique les choses en imposant des systèmes de gestion optimisés. Les systèmes de gestion traditionnels basés sur des règles sont simples, faciles à mettre en œuvre et à transférer entre des systèmes similaires. Leurs inconvénients sont le nombre limité de paramètres pris en compte, le manque de flexibilité et la tendance conservatrice en matière de confort. Les techniques d'optimisation mathématique (basées sur des modèles, guidées par des données ou sans modèle), pour leur part, présentent de meilleures performances, bien qu'elles soient également plus complexes à mettre en œuvre, car elles nécessitent des modèles physiques ou des ensembles de données. Parmi elles, les algorithmes d'IA permettent d'apprendre le fonctionnement optimal en tenant compte d'un grand nombre de paramètres pour les problèmes non linéaires, ce qui les rend aptes à gérer la complexité des systèmes de PAC Géo, en particulier lorsqu'ils sont combinés à d'autres SER, et à mettre en œuvre des contrôles intelligents autonomes et adaptables. Cependant, leur développement nécessite de grands ensembles de données. Le choix de l'approche, dans chaque cas, sera un compromis entre la performance du système et la complexité de la mise en œuvre.

4.1. Pompes à chaleur géothermiques alimentées par de l'électricité renouvelable

Le couplage d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques (PV) avec la PAC Géo est réalisé en termes de fourniture d'électricité à la PAC Géo lorsque de l'électricité renouvelable est disponible. La PAC Géo utilise l'électricité renouvelable pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS), le chauffage ou le refroidissement du bâtiment, ainsi que pour le stockage de l'énergie thermique dans l'eau et le MCP en vue d'une utilisation ultérieure pour couvrir les pics de charge de chauffage ou de refroidissement du bâtiment. Lorsqu'aucune charge n'est nécessaire, l'énergie renouvelable est stockée dans les batteries en vue d'une utilisation ultérieure, ou fournie au réseau électrique.

La configuration de base d'un système PAC Géo couplé à l'éolien ou au photovoltaïque est illustrée dans la Figure 4-1. L'éolienne ou les panneaux photovoltaïques produisent de l'électricité renouvelable qui est stockée en priorité dans les batteries, tandis que l'électricité excédentaire est détournée vers le réseau électrique. La pompe à chaleur fournit de la chaleur soit au réservoir d'eau chaude sanitaire, soit au réservoir tampon à différents niveaux de température, la priorité étant donnée à l'eau chaude sanitaire. Le réservoir tampon est connecté au réservoir de MCP CHAUD ou FROID en fonction du mode de chauffage ou de refroidissement respectivement. Lorsque l'électricité éolienne/PV est disponible (générée ou stockée dans les batteries), la PAC Géo charge le réservoir MCP en faisant correspondre le point de réglage du réservoir tampon au niveau de MCP. Lorsqu'il n'y a pas d'électricité renouvelable disponible (générée ou stockée dans les batteries), la PAC Géo couvre la charge de base du bâtiment et le MCP les charges de pointe.

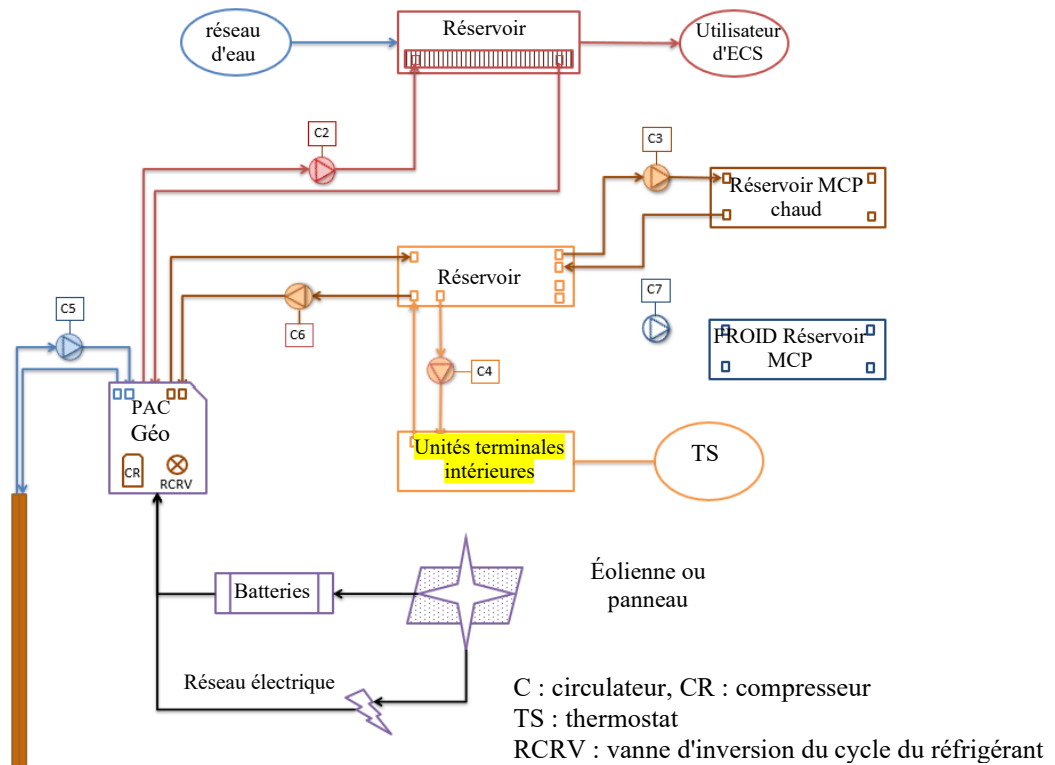


Figure 4-1. Schéma d'un système de pompe à chaleur géothermique couplée à l'énergie éolienne et PV

Les grands principes du système de gestion sont les suivants :

- la vanne d'inversion du cycle du réfrigérant est en position HEAT ou COOL selon le mode de fonctionnement, sauf lorsque le circulateur d'eau chaude domestique est en marche, auquel cas elle est toujours automatiquement commutée en position HEAT ;
- la pompe à chaleur charge en priorité le ballon d'ECS ;
- La chaleur est échangée entre le réservoir tampon et le MCP en fonction de la charge de l'utilisateur ;
- la PAC Géo charge le MCP lorsque l'électricité éolienne est disponible, de sorte que sa température est maintenue au niveau souhaité, plus ou moins un demi écart-type de température ;
- la PAC Géo et la MCP chargent le réservoir tampon de manière à ce que a) la température de l'eau soit maintenue au niveau souhaité plus/moins un demi écart type de température et b) la PAC Géo couvre la charge de base et la MCP la charge de pointe ;
- le système intérieur utilise l'eau chaude/froide du réservoir tampon en fonction de la température intérieure, de sorte que la température de l'air intérieur est maintenue au niveau souhaité, plus/moins un demi-écart type de température.

4.2. Pompes à chaleur géothermiques couplées à l'énergie solaire thermique

La configuration de base du couplage de capteurs solaires thermiques avec une pompe à chaleur est présentée dans la Figure 4-2. Dans cette configuration, la pompe à chaleur fournit de l'énergie thermique à un réservoir tampon, qui est relié hydrauliquement à un réservoir de MCP et au système de chauffage/refroidissement du bâtiment, et relié thermiquement au réservoir d'eau chaude sanitaire par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Les capteurs solaires thermiques fournissent de l'énergie thermique au réservoir d'eau chaude domestique. La philosophie de la configuration est que l'énergie thermique est continuellement échangée entre le réservoir tampon, la PAC Géo, le MCP, l'ECS et le bâtiment en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire, des tarifs de l'électricité et des besoins de l'utilisateur en termes de chaleur/froid et d'eau chaude.

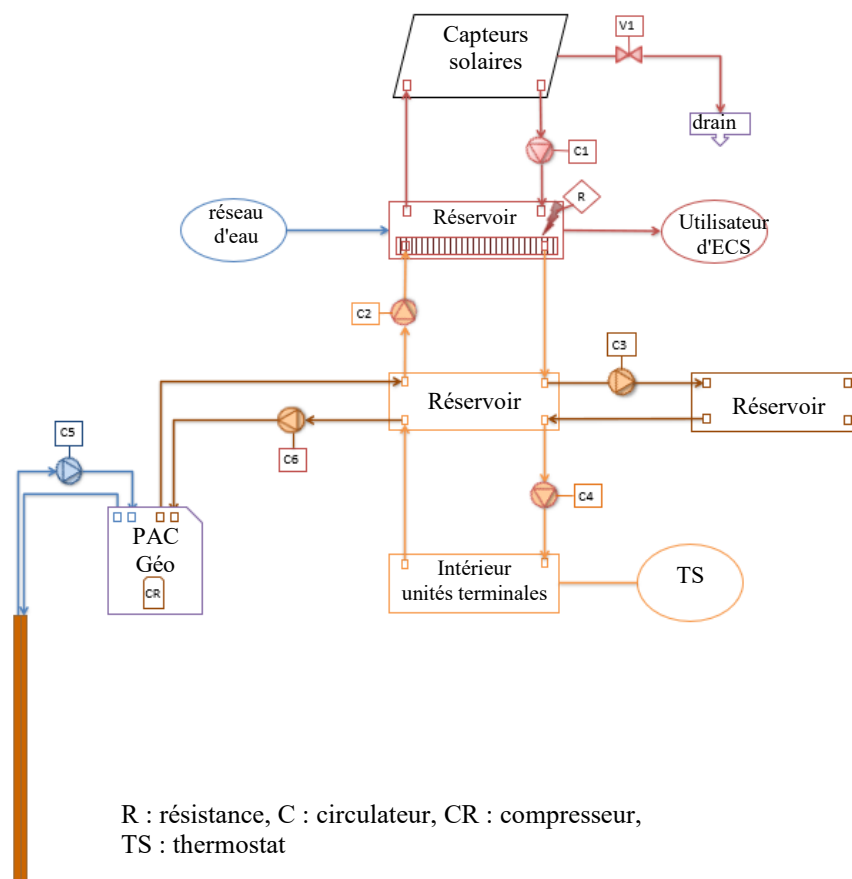


Figure 4-2. Schéma d'un système de pompe à chaleur géothermique couplée à l'énergie solaire thermique

Le couplage entre la PAC Gé et les capteurs solaires thermiques se fait pendant l'hiver en mode chauffage uniquement par le transfert de chaleur entre le réservoir tampon principal et le réservoir d'eau chaude sanitaire. En été, aucun couplage entre les deux systèmes n'est prévu, car les capteurs solaires thermiques sont censés pouvoir couvrir tous les besoins en eau chaude sanitaire de l'utilisateur.

Les grands principes de la stratégie de contrôle sont les suivants :

- les capteurs solaires chargent le réservoir d'eau chaude sanitaire pendant les heures de fort rayonnement solaire; pendant l'hiver, la résistance électrique du réservoir d'eau chaude sanitaire est allumée quelques minutes par semaine conformément aux réglementations locales en matière de protection contre les légionelles (programmation horaire) ;
- en mode chauffage, la chaleur est échangée entre le réservoir d'eau chaude sanitaire, le réservoir tampon et le MCP en fonction de la charge de l'utilisateur ;
- en mode chauffage, la PAC Gé charge le MCP pendant les heures où le tarif de l'électricité est bas, de sorte que sa température est maintenue au point de consigne souhaité, plus ou moins une demi-bande de température ;
- en mode refroidissement, les capteurs solaires thermiques et la PAC Gé sont découplés, de sorte que l'eau chaude sanitaire est fournie uniquement par l'énergie solaire thermique, qui devrait être en mesure de couvrir 100 % des besoins en eau chaude sanitaire ;
- dans les deux modes, la PAC Gé charge le réservoir tampon, de sorte que sa température est maintenue au point de consigne de l'eau souhaité, plus ou moins une demi-bande de température ;
- le système intérieur utilise l'énergie thermique du réservoir tampon en fonction de la température de l'air intérieur, de sorte que la température intérieure est maintenue au point de consigne souhaité pour la pièce, plus ou moins la moitié de la largeur de bande de température.

L'installation de la pompe à chaleur GEO4CIVHIC couplée à un système solaire thermique permet de réaliser des économies d'énergie primaire considérables en fonction du type de bâtiment et des conditions climatiques. Les

économies annuelles sont également importantes, avec des temps de retour sur investissement qui dépendent du type de bâtiment, de l'isolation de l'enveloppe et du climat.

4.3. Pompes à chaleur géothermiques couplées aux pompes à chaleur à air

Il existe deux options principales pour intégrer l'air comme source d'énergie supplémentaire, selon que l'air est utilisé comme l'une des principales sources d'énergie possibles (pompe à chaleur air-eau) ou qu'il soutient l'énergie géothermique en tant que puits ou source (tour de refroidissement/refroidisseur sec). Dans le premier cas, le système intègre à la fois une pompe à chaleur air-eau (PAC Aéro) et une pompe à chaleur sol-eau (PAC Géo). Le système peut fournir du chauffage ou du refroidissement avec la pompe à chaleur air-eau ou la pompe à chaleur sol-eau, que la source d'air soit utilisée pour le chauffage ou le refroidissement. Cette approche de la pompe à chaleur géothermique consiste à inclure l'air comme source supplémentaire pour l'injection ou l'extraction de chaleur et à n'utiliser l'échangeur de chaleur souterrain que pour injecter ou extraire une partie de l'énergie thermique demandée par le bâtiment. Il existe différentes possibilités d'inclure l'air comme source supplémentaire, l'une d'entre elles étant l'ajout de tours de refroidissement (pour le refroidissement uniquement) ou de refroidisseurs secs (Figure 4-3) en tant que nouvel élément indépendant de la sonde avec différentes configurations en fonction des besoins et de l'optimisation du système CVC. Une autre possibilité est une pompe à chaleur à double source (PAC DS) (Figure 4-4) conçue avec tous les éléments à l'intérieur de la même pompe à chaleur, les ventilateurs et les échangeurs de chaleur pour la source d'air et l'échangeur de chaleur pour la source géothermique dans le même corps de la pompe à chaleur.

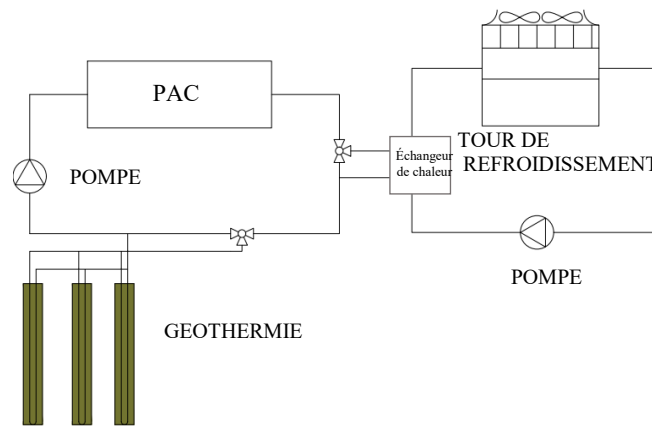


Figure 4-3. Schéma de raccordement d'une tour de refroidissement ou d'un refroidisseur sec à une pompe à chaleur géothermique

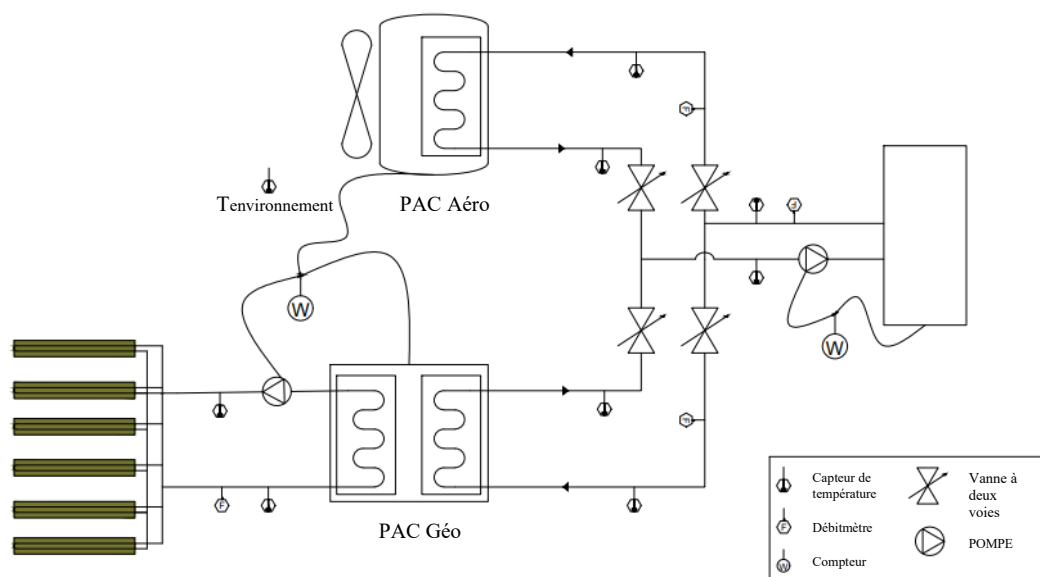


Figure 4-4. Schéma de raccordement d'une pompe à chaleur air-eau (PAC Aéro) couplée à une pompe à chaleur géothermique (PAC Géo)

La combinaison d'une source d'air et d'une source souterraine augmente légèrement la performance énergétique et permet donc de réaliser des économies. Cependant, le grand avantage économique de cette option réside dans le fait qu'en utilisant l'air comme source, l'installation du champ de sondes peut être réduite jusqu'à 40 %, ce qui réduit considérablement les coûts de forage et donc l'investissement de l'installation. D'autres systèmes de gestion avancés doivent être explorés pour soutenir ce scénario.

4.4. Pompes à chaleur géothermiques couplées à l'énergie photovoltaïque

L'utilisation de panneaux photovoltaïques thermiques (PVT) permet d'économiser de l'espace sur le toit, par rapport à la solution des capteurs solaires thermiques et des panneaux photovoltaïques séparés, et d'améliorer l'efficacité globale de la conversion solaire, car les capteurs PVT sont plus efficaces à la fois pour l'énergie thermique et la fourniture d'électricité que les deux systèmes conventionnels combinés. Avec cette technologie, le champ solaire fournit une source thermique à plus haute température, tout en couvrant les besoins électriques de la pompe à chaleur.

Lorsque l'on combine le sol et les champs PVT comme sources thermiques pour la pompe à chaleur, en donnant la priorité à la production d'eau chaude sanitaire pendant les saisons de chauffage et de refroidissement, la contribution thermique directe des installations solaires est, comme prévu, plus élevée pour les localités ayant des valeurs plus élevées de rayonnement solaire incident. En détail, cette part passe de 27% pour l'étude de cas d'Helsinki, à 34% à Strasbourg et Bilbao, et à 64% à Athènes.

4.5. Application d'études de cas : indices d'autosuffisance et d'autoconsommation pour les archétypes GEO4CIVHIC

Afin de démontrer le potentiel d'intégration des sources d'énergie renouvelable dans la rénovation des bâtiments existants dans les centres-villes, l'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) sur le toit a été étudiée dans le cadre du projet GEO4CIVHIC, conduisant à une analyse complète associant la rénovation de l'enveloppe, la production d'eau chaude sanitaire et la production d'énergie photovoltaïque. En fait, de nombreux avantages sont liés à l'utilisation des systèmes photovoltaïques, étant donné que l'énergie solaire est propre et gratuite, que la phase d'installation n'est pas compliquée et qu'elle peut être conçue en fonction des besoins de l'utilisateur. Le principal inconvénient est le fonctionnement intermittent, qui peut être partiellement résolu par un système de stockage, si possible, ce qui augmente d'autre part le coût de l'installation. Pour une analyse complète, la performance énergétique du système PV doit être évaluée correctement, en tenant compte de nombreux facteurs tels que l'emplacement, l'inclinaison, l'orientation et la présence d'éléments d'ombrage ; pour cette raison, les simulations ont été effectuées à l'aide de l'outil dynamique TRNSYS.

La charge électrique du bâtiment a été calculée selon les valeurs énergétiques fournies par Eurostat (Eurostat) et répartie sur une base horaire selon un profil suggéré par Wilson et Engebrecht (2014).

Le Tableau 4-1 montre la consommation horaire moyenne des appareils électriques et de l'éclairage par saison et par jour de la semaine.

Tableau 4-1. Consommation horaire moyenne d'énergie électrique [Wh]

[Wh]	L'été		L'hiver		Printemps /Automne	
	Du lundi au vendredi	Samedi et dimanche	Du lundi au vendredi	Samedi et dimanche	Du lundi au vendredi	Samedi et dimanche
Machine à laver	28	30	28	30	28	30
Réfrigérateur + congélateur	130	130	130	130	130	130
PC	14	14	14	14	14	14
TV	14	14	14	14	14	14
Vidéo	8	8	8	8	8	8
Eclairage	40	40	53	53	51	51

La cuisinière électrique est couramment utilisée trois fois par jour, comme l'explique le Tableau 4-2. L'intensité varie en fonction de l'heure et du jour de la semaine.

Tableau 4-2. Utilisation quotidienne de la cuisinière électrique [Wh]

		Jour de la semaine [Wh]	Week-end [Wh]
Petit déjeuner	7:00h	100	200
Déjeuner	12:00h	300	600
Dîner	19:00h	1000	1500

En partant de la demande d'énergie calculée à la section 2.7, en tenant compte du COP et de l'EER correspondants pour chaque cas, les profils électriques liés à la production de la pompe à chaleur ont été calculés. En ajoutant les besoins horaires en énergie électrique de la pompe à chaleur au profil de charge électrique commun d'un utilisateur résidentiel (Tableau 4-1 et Tableau 4-2), l'énergie électrique totale requise par les unités de logement est indiquée dans le Tableau 4-3 pour chaque climat et chaque type de bâtiment.

Tableau 4-3. Consommation électrique totale incluant la pompe à chaleur, l'éclairage et les appareils ménagers [kWh]

Existants	Cas 0	Cas 1 - Ventilconvecteur	Cas 1 - Radiant	Cas 2	Cas 3 - Ventilconvecteur	Cas 3 - Radiant
Athènes	7305	7022	6923	5809	5799	5796
Strasbourg	9206	8224	7511	6266	5975	5764
Helsinki	12920	12210	11017	8866	8475	8064
Historique	Cas 0	Cas 1 - Ventilconvecteur	Cas 1 - Radiant	Cas 2	Cas 3 - Ventilconvecteur	Cas 3 - Radiant
Athènes	8696	7987	7736	5995	5971	5962
Strasbourg	11085	9680	8660	6647	6290	6030
Helsinki	15422	13957	12415	9481	9012	8519

Le profil électrique total du bâtiment a été comparé sur une base horaire à l'énergie produite par le système photovoltaïque, en évaluant deux indicateurs (Luthander et Widén, 2015) : l'autosuffisance (SS) et l'autoconsommation (SC), chacun d'eux dépendant de l'énergie auto-utilisée (1), c'est-à-dire la différence entre l'énergie consommée et l'énergie fournie par le réseau.

$$\text{Énergie auto-utilisée} = \text{Énergie consommée} - \text{Énergie fournie par le réseau} \text{ [kWh]} \quad [1]$$

L'autosuffisance est définie par l'équation (2) comme le rapport entre l'énergie auto-utilisée et l'énergie totale consommée. Il s'agit donc du pourcentage d'énergie consommée qui est produite par le système photovoltaïque installé sur le bâtiment.

$$SS = \frac{\text{Self Used Energy}}{\text{Total Consumed}} \text{ [%]} \quad [2]$$

L'équation (3) définit l'autoconsommation comme l'énergie auto-utilisée divisée par l'énergie totale produite par le système PV, ce qui correspond au pourcentage d'énergie solaire produite et consommée dans le bâtiment par rapport à la quantité totale d'énergie solaire produite.

$$SC = \frac{\text{Self Used Energy}}{\text{Total Produced}} \text{ [%]} \quad [3]$$

L'évaluation de ces indicateurs dépend strictement de l'analyse horaire de la charge, définissant la quantité d'énergie utilisée ou fournie au réseau en fonction de l'énergie produite par le système et de l'énergie utilisée par l'utilisateur. Par conséquent, des simulations dynamiques ont été mises en œuvre à l'aide du logiciel TRNSYS pour calculer l'énergie horaire produite par les panneaux photovoltaïques pour différentes orientations, afin de comparer l'efficacité du système en tenant compte des multiples orientations possibles du bâtiment dans un contexte urbain. Les résultats présentés dans le Tableau 4-4 montrent que l'énergie la plus élevée est produite lorsque le bâtiment est orienté vers le sud ou le sud-ouest, tandis que l'orientation vers le nord la réduit de 30 à 50 % selon l'endroit.

Tableau 4-4. Énergie annuelle produite par le système photovoltaïque

Localisation	Énergie produite par le système PV [kWh/an]				
	0°	45°	90°	180°	270°
	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord	Est
Athènes	19533	19255	17229	12828	15563
Strasbourg	15930	15767	14250	10997	12880
Helsinki	14118	13577	11385	7292	10311

La surface du toit et les paramètres de dimensionnement (Tableau 4-5) ont été calculés en fonction de la géométrie du bâtiment, en tenant compte des différentes inclinaisons du toit en fonction du climat et en les réduisant de 5% pour permettre un espace approprié pour la maintenance technique des panneaux. A Athènes, le toit a été considéré comme horizontal, et l'espace disponible est donc encore plus réduit en raison de l'espace nécessaire pour éviter l'ombrage mutuel entre les panneaux. C'est la raison pour laquelle la puissance installée est inférieure (6 kW) à celle des autres sites (12 kW). Des modules PV polycristallins ont été sélectionnés ; pour les modules et l'onduleur, on s'est référé aux fiches techniques disponibles sur le marché.

Tableau 4-5. Paramètres de dimensionnement du système photovoltaïque

	Athènes	Strasbourg	Helsinki
Surface brute du toit [m] ²	59	117	121
Inclinaison du toit	0°	30°	40°
Nombre de panneaux	18	35	37
Nombre de cordes (strings)	3	9	9
Puissance crête installée [kWp]	6.0	11.9	12.3

Les résultats obtenus ont été divisés en énergie de décharge et en énergie de réseau, selon l'indicateur d'énergie auto-utilisée horaire (Eq. 1). Lorsque l'énergie générée est supérieure à l'énergie requise à ce moment-là, on suppose que l'énergie excédentaire est fournie au réseau. En revanche, lorsque l'énergie requise est supérieure à l'énergie produite, l'énergie manquante est achetée au réseau.

Chaque stratégie de rénovation expliquée dans la section 3.6 a été analysée pour cinq orientations différentes des panneaux, ce qui fait qu'un total de 180 cas a été simulé pour des bâtiments existants et historiques.

Tableau 4-6 résume les résultats obtenus pour la maison mitoyenne existante pour chaque climat, orientation et configuration de rénovation. Pour Athènes, chaque orientation des panneaux peut fournir plus de 50 % de l'énergie nécessaire à l'utilisateur, même si l'énergie utilisée ne représente que 20 à 30 % de l'énergie totale produite.

L'indicateur d'autoconsommation est similaire en moyenne à Strasbourg, autour de 20-30%, mais l'autosuffisance se situe autour de 40-50%, car le rayonnement total est inférieur à celui d'Athènes, et donc l'énergie produite est plus faible. Les mêmes résultats ont été obtenus pour Helsinki avec des pourcentages plus faibles.

Les orientations Sud, Sud-Ouest et Ouest présentent des résultats similaires en termes d'autosuffisance, déterminant un pourcentage élevé d'énergie utilisée par rapport à l'énergie nécessaire. L'orientation Nord présente des résultats significatifs en termes d'autoconsommation, car le rayonnement solaire est plus faible mais l'énergie autoconsommée est similaire à celle des autres orientations, de sorte que le ratio correspondant à l'indicateur d'autoconsommation est plus élevé.

Tableau 4-6. Résumé des résultats de l'autosuffisance et de l'autoconsommation pour la maison mitoyenne existante

EXISTANT		Autosuffisance (%)					Autoconsommation (%)				
		Orientation du PV					Orientation du PV				
		0°	45°	90°	180°	270°	0°	45°	90°	180°	270°
Cas 0	Athènes	57%	59%	58%	57%	54%	21%	22%	25%	32%	26%
	Strasbourg	40%	40%	39%	37%	38%	23%	23%	25%	31%	27%
	Helsinki	26%	25%	24%	21%	23%	23%	24%	27%	38%	28%
Cas 1 Ventilo-convecteur	Athènes	58%	60%	60%	58%	55%	21%	22%	24%	32%	25%
	Strasbourg	43%	43%	42%	41%	41%	22%	23%	25%	30%	26%
	Helsinki	30%	30%	28%	25%	27%	26%	27%	30%	43%	32%
Cas 1 Radiant	Athènes	58%	60%	60%	59%	55%	21%	22%	24%	32%	25%
	Strasbourg	46%	46%	45%	44%	44%	22%	22%	24%	30%	26%
	Helsinki	32%	32%	31%	28%	29%	25%	26%	30%	42%	31%
Cas 2	Athènes	57%	59%	59%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Strasbourg	48%	48%	48%	47%	47%	19%	19%	21%	27%	23%
	Helsinki	36%	36%	35%	34%	34%	23%	24%	28%	41%	29%
Cas 3 Ventilo-convecteur	Athènes	57%	60%	60%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Strasbourg	50%	50%	50%	49%	48%	19%	19%	21%	26%	22%
	Helsinki	37%	38%	37%	35%	35%	22%	24%	29%	41%	29%
Cas 3 Radiant	Athènes	58%	60%	60%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Strasbourg	51%	51%	51%	50%	49%	18%	19%	20%	26%	22%
	Helsinki	39%	39%	38%	36%	37%	22%	23%	27%	40%	29%

De même, le Tableau 4-7 résume les résultats obtenus pour la maison 4-7 historique mitoyenne. Les résultats obtenus sont plus intéressants en termes de consommation d'énergie que d'autosuffisance, en raison de la réduction de l'énergie nécessaire au réseau grâce à l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable.

Tableau 4-7. Résumé des résultats de l'autosuffisance et de l'autoconsommation pour la maison historique mitoyenne

HISTORIQUE		Autosuffisance (%)					Autoconsommation (%)				
		Orientation du PV					Orientation du PV				
		0°	45°	90°	180°	270°	0°	45°	90°	180°	270°
Cas 0	Athènes	54%	56%	55%	53%	52%	24%	25%	28%	36%	29%
	Strasbourg	36%	36%	35%	32%	34%	25%	25%	27%	33%	29%
	Helsinki	25%	24%	23%	21%	22%	27%	28%	31%	44%	33%
Cas 1 Ventilo-convecteur	Athènes	57%	59%	58%	57%	54%	23%	24%	27%	35%	28%
	Strasbourg	40%	39%	39%	36%	37%	24%	24%	26%	32%	28%
	Helsinki	27%	27%	25%	23%	24%	26%	27%	31%	44%	32%
Cas 1 Radiant	Athènes	58%	60%	59%	58%	55%	23%	24%	27%	35%	27%
	Strasbourg	43%	43%	42%	40%	41%	23%	23%	25%	32%	27%
	Helsinki	29%	29%	28%	26%	27%	26%	27%	30%	43%	32%
Cas 2	Athènes	58%	60%	60%	58%	55%	18%	19%	21%	27%	21%
	Strasbourg	47%	47%	47%	46%	46%	20%	20%	22%	28%	24%
	Helsinki	35%	35%	34%	33%	33%	24%	25%	29%	43%	30%
Cas 3 Ventilo-convecteur	Athènes	58%	60%	60%	58%	56%	18%	19%	21%	27%	56%
	Strasbourg	49%	49%	49%	48%	48%	19%	20%	22%	28%	23%
	Helsinki	37%	37%	36%	34%	34%	23%	25%	29%	42%	30%
Cas 3 Radiant	Athènes	58%	60%	60%	58%	56%	18%	19%	21%	27%	21%
	Strasbourg	50%	51%	50%	50%	49%	19%	19%	21%	27%	23%
	Helsinki	38%	39%	38%	36%	36%	23%	24%	28%	42%	30%

L'utilisation d'un accumulateur électrique (batterie) augmenterait l'énergie autoconsommée, donc les deux indices calculés ; cependant, le dimensionnement de la batterie et la définition de l'opération dépendent de plusieurs facteurs. En particulier, le concepteur doit choisir s'il donne la priorité à la conservation de la batterie, à la minimisation des cycles de charge-décharge, à la maximisation de l'énergie autoconsommée ou à la minimisation de l'approvisionnement à partir du réseau de distribution. De nombreuses hypothèses peuvent être formulées pour estimer le comportement du stockage afin d'étendre l'application des résultats obtenus pour ces archétypes à l'échelle urbaine, en définissant également différents profils d'utilisation de l'énergie par les consommateurs afin de planifier et de soutenir le développement des communautés énergétiques. À cette fin, des recherches plus approfondies seront menées dans le cadre de travaux futurs.

5. CONCLUSIONS ET AUTRES APPLICATIONS

Le Manuel 1 du projet GEO4CIVHIC vise à démontrer l'importance de la réduction des besoins énergétiques pour faciliter le couplage avec des sources d'énergie renouvelable, soutenant ainsi le développement de bâtiments à zéro énergie, presque zéro et plus, comme l'exigent les récentes politiques nationales et internationales. Pour étudier le potentiel du parc immobilier européen dans les zones urbaines, des archétypes ont été développés en termes de géométrie, de propriétés thermiques de l'enveloppe, d'utilisation finale, de type de chauffage, de ventilation et de climatisation installés, puis utilisés comme études de cas pour étudier les résultats de l'intégration des sources d'énergie renouvelable. Les caractéristiques détaillées ont été présentées dans (Carnieletto, 2022). Sur la base des différentes stratégies et options possibles, les rénovations superficielles et profondes ont été examinées. La diminution des besoins en énergie se réfère principalement au bilan énergétique annuel, puisque des niveaux d'isolation élevés réduisent les pertes de chaleur et maximisent la contribution des gains internes. Au contraire, les bâtiments fortement isolés ont une demande en énergie de refroidissement plus élevée, en raison d'une diminution du transfert de chaleur de l'enveloppe.

Le document présenté analyse la synergie entre les pompes à chaleur et les autres sources d'énergie renouvelable afin de définir des solutions optimales pour les différents types de bâtiments et de climats. Plusieurs applications d'intégration

optimale entre les BPE et d'autres sources d'énergie renouvelable ont été présentées, bien que limitées à une maison mitoyenne typique située dans différents climats.

Des simulations dynamiques ont été effectuées pour déterminer la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement utilisée par la suite pour dimensionner les échangeurs de chaleur souterrains en tenant compte de la variété des contextes géologiques en utilisant trois conductivités géothermiques typiques, de 1,5 W/(m K), 2,2 W/(m K) et 3 W/(m K), élargissant ainsi l'application des résultats obtenus. Le dimensionnement correct des systèmes peut éventuellement réduire la longueur de sonde à installer, donc les coûts d'installation et le temps de retour sur investissement correspondant, en empêchant la dégradation des performances au fil du temps. L'intégration de plusieurs sources rend le système plus complexe et nécessite une gestion optimisée. Une méthodologie a été définie pour calculer la longueur optimale des sondes en fonction de la charge thermique du bâtiment et de l'espace disponible, afin d'éviter le surdimensionnement du système et d'améliorer l'efficacité énergétique avec l'intégration d'une pompe à chaleur à double source ou d'une pompe à chaleur à air. Cette solution augmentera les performances en saisons intermédiaires, ce qui permettra aux utilisateurs finaux de réaliser des économies. Des résultats extrêmes ont été obtenus pour les climats chauds, où la demande d'énergie de chauffage devient négligeable et où des systèmes de refroidissement gratuits plutôt que des systèmes de refroidissement traditionnels sont nécessaires, même en hiver. Dans ce cas, la température limite était acceptable même si la demande d'énergie était déséquilibrée, ce qui plaide en faveur de l'installation de pompes à chaleur géothermiques lorsqu'elles sont correctement dimensionnées.

L'installation d'une pompe à chaleur couplée à un système solaire thermique permet de réaliser d'importantes économies d'énergie primaire en fonction du type de bâtiment et des conditions climatiques. Si l'on considère l'énergie électrique produite par le solaire et consommée par la pompe à chaleur, le ratio d'auto-utilisation est plus élevé pour les bâtiments non rénovés. La part plus faible pour les bâtiments rénovés est due à la probabilité plus faible d'utiliser toute l'énergie produite dans le même laps de temps, étant donné que la demande d'énergie est plus faible en raison des solutions de rénovation appliquées. Les valeurs les plus élevées correspondent aux climats les plus chauds, car elles dépendent de la possibilité de faire correspondre la demande d'énergie et l'énergie produite au cours d'une même période.

L'installation d'un système photovoltaïque a été analysée, en étudiant l'influence de l'orientation sur les indicateurs d'autosuffisance et d'autoconsommation, qui peuvent donner une projection réaliste pour les communautés énergétiques. Le taux de couverture est généralement plus élevé pour les bâtiments modernisés que pour ceux qui ne le sont pas. En comparant les trois conditions climatiques, la valeur de couverture obtenue grâce à l'installation photovoltaïque est élevée pour les climats chauds et doux (Athènes et Strasbourg), entre 46 et 67%, tandis qu'Helsinki affiche une part plus faible en raison de la demande d'énergie plus élevée et de la plus faible disponibilité de l'énergie sous forme de rayonnement solaire. L'installation d'un système de stockage électrique pourrait réduire davantage la consommation d'énergie primaire ; cependant, certains problèmes liés au dimensionnement correct de la batterie doivent être résolus afin d'éviter un surdimensionnement de la batterie ou une perturbation rapide de la performance de charge.

Comme cela a été récemment étudié dans la littérature, l'utilisation extensive d'archétypes de bâtiments appliqués à la modélisation urbaine permet des applications plus étendues de la modélisation énergétique en réduisant le temps de simulation dû à la complexité de l'exploration des données, conduisant ainsi à une plus grande facilité d'utilisation par les experts sans perdre la qualité des résultats. Ainsi, les résultats obtenus peuvent aider à l'analyse d'un large parc de bâtiments et d'installations, y compris leur rénovation, en définissant une liste d'actions prioritaires visant à limiter l'utilisation de l'énergie. Ces informations visent à influencer le développement de politiques énergétiques pour les communautés d'énergie, en optimisant la part d'énergie thermique et électrique entre les différents utilisateurs, en exploitant une contemporanéité différente des charges, améliorant ainsi l'efficacité des systèmes. Il s'agit donc d'œuvrer à la construction de bâtiments à énergie, presque zéro et plus.

Comme le montrent les différentes solutions présentées et étudiées, de nombreuses stratégies peuvent être adoptées en fonction du climat, de l'utilisation finale et de la demande énergétique du bâtiment, qui est liée à l'année de construction ou aux mesures de modernisation appliquées. Même si l'emplacement influence de manière significative la disponibilité du rayonnement solaire, les résultats montrent des impacts intéressants sur les économies d'énergie et les coûts énergétiques associés, confirmant ainsi le potentiel de l'installation de pompes à chaleur géothermiques dans les centres urbains.

RÉFÉRENCES

1. Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, " Directive 2010/31/EU du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte) ", pp. 13-35, 2010, doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.
2. Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne, " Directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique, modifiant les directives 2009/125/CE et 2010/30/UE et abrogeant les directives 2004/8/CE et 2006/32/CE ".
3. Le Parlement européen et le Conseil, " Directive 2018/844 du 30 mai 2018 modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique ", 2018.
4. L. Carnieletto, M. Ferrando, L. Teso, K. Sun, W. Zhang, F. Causone, P. Romagnoni, A. Zarrella, T. Hong, "Italian prototype building models for urban scale building performance simulation", *Build. Environ*, vol. 192, 2021.
5. M. Ferrando, F. Causone, T. Hong, et Y. Chen, "Urban building energy modeling (UBEM) tools : A state-art review of bottom-up physics-based approaches," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 62, 2020.
6. I. Ballarini, S. P. Corgnati, et V. Corrado, "Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock : The experience of TABULA project," *Energy Policy*, vol. 68, pp. 273-284, 2014, doi : 10.1016/j.enpol.2014.01.027.
7. G. Emmi, A. Zarrella, M. De Carli, S. Moretto, A. Galgaro, M. Cultrera, M. Di Tuccio, A. Bernardi, "Ground source heat pump systems in historical buildings : Two Italian case studies," *Energy Procedia*, vol. 133, pp. 183-194, 2017, doi : 10.1016/j.egypro.2017.09.383.
8. A. Zarrella, R. Zecchin, F. De Rossi, G. Emmi, M. De Carli, et L. Carnieletto, "Analysis of a double source heat pump system in a historical building," 2019.
9. Le Bundestag allemand, La loi allemande sur l'énergie dans les bâtiments (GEBÄUDEENERGIEGESETZ, GEG), Berlin, Allemagne, 13 août 2020
10. Président de la République italienne, décret législatif 192, mise en œuvre de la directive 2002/91/CE sur l'efficacité énergétique des bâtiments, Rome, Italie, 19 août 2005.
11. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, Loi n.2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement I. Paris, France, 3 août 2009
12. Conseil fédéral suisse, Ordonnance sur l'énergie (OEnE), Berne, Suisse, 1er novembre 2017.
13. Roi d'Espagne, Loi 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas, Madrid, Espagne, 26 juin 2013 (BOE-A-2013-6938).
14. Office fédéral de l'énergie, Swiss Sustainable Building Standard (SNBS), Suisse, 2018.
15. Institut Wohnen und Umwelt, "The joint EPISCOPE and TABULA Website," 2016. (consulté le 20 février 2005).
16. G. V. Fracastoro et M. Serraino, "A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications", *Energy Build*, vol. 43, 2011.
17. G. Dall'o', A. Galante et M. Torri, "A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale", *Energy Build*, vol. 48, pp. 211-219, mai 2012, doi : 10.1016/j.enbuild.2012.01.034.
18. E. Pratavera, P. Romano, L. Carnieletto, F. Pirotti, J. Vivian, et A. Zarrella, "EUReCA : An open-source urban building energy modelling tool for the efficient evaluation of cities energy demand," *Renew. Energy*, vol. 173, 2021.
19. L. Teso *et al.*, "Large scale energy analysis and renovation strategies for social housing in the historic city of Venice," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, 2022.
20. L. Carnieletto, O. B. Kazanci, M. De Carli, et B. W. Olesen, "Why couple renewable energy sources with radiant systems : current trends, limitations and potential," 2018.
21. A. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE Handbook-HVAC Applications. Geothermal Energy", 2011.
22. A. Capozza, A. Zarrella, et M. De Carli, "Long-term analysis of two GSHP systems using validated numerical models and proposals to optimize the operating parameters," *Energy Build.*, vol. 93, pp. 50-64, Apr. 2015, doi : 10.1016/j.enbuild.2015.02.005.
23. S. M. Lee, S. H. Park, Y. S. Jang, E. J. Kim, "Proposition of Design Capacity of Borehole Heat Exchangers for Use in the Schematic-Design Stage", *Energies*, vol. 14, no. 822, 2021, doi : 10.3390/en14040822.
24. A. Galgaro, G. Dalla Santa et A. Zarrella, "First Italian TRT database and significance of the geological setting evaluation in borehole heat exchanger sizing", *Geothermics*, vol. 94, 2021, doi : 10.1016/j.geothermics.2021.102098.
25. UNESCO - Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, "Convention concernant la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel", 1972. [En ligne]. Disponible : <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/>.
26. A. Zarrella, R. Zecchin, P. Pasquier, D. Guzzon, M. De Carli, G. Emmi, M. Quaggia, "A comparison of

- numerical simulation methods analyzing the performance of a ground-coupled heat pump system", *Sci. Technol. Built Environ*, vol. 24, 2018, doi : 10.1080/23744731.2018.1438663.
27. E. Wilson, C. M. Engebrecht, S. Horowitz, et R. Hendron, "Building America House Simulation Protocols", 2014.
 28. R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, et J. Palm, "Photovoltaic self-consumption in buildings : A review", *Appl. Energy*, vol. 142, 2015.
 29. L. Carnieletto, A. Di Bella, D. Quagiotto, G. Emmi, A. Bernardi, M. De Carli, Potential of GSHP coupled with PV systems for retrofitting urban areas in different European climates based on archetypes definition. *Energy and Built Environment* (2022). DOI: 10.1016/j.enbenv.2022.11.005

AUTEURS

1. CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (CNR)

CNR - ISAC

Adriana BERNARDI
Alessandro BORTOLIN
Gianluca CADELANO

CNR - ITC

Sergio BOBBO
Laura FEDELE
Stefano ROSSI
Mauro SCATTOLINI

2. UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA (UNIPD)

Département d'ingénierie industrielle

Michele DE CARLI
Angelo ZARRELLA
Giuseppe EMMI
Laura CARNIELETTO
Samantha GRACI
Davide QUAGGIOTTO

Département des géosciences Unité DG

Antonio GALGARO
Eloisa DI SIPIO
Giorgia DALLA SANTA
Alberto CARRERA

3 UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA (UPV)

Javier F. URCHUEGUÍA
Borja BADENES
Hossein JAVADI
Miguel Á. MATEO

4. R.E.D. SRL RESEARCH AND ENVIRONMENTAL DEVICES (RED)

Luc POCKELÉ
Giulia MEZZASALMA
Silvia CONTINI
Mattia CHINELLO
Nicola MUTINELLI

5. TERRA GEOSERV LIMITED (GEOSERV)

Riccardo PASQUALI
Aisling CUNNINGHAM

6. GALLETTI BELGIQUE / HIREF (GALLETTI)

Fabio POLETTO
Andrea TARABOTTI
Enrico PACCHIN

7. FUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION (TECNALIA)

Miguel Ángel ANTÓN
Amaia CASTELRUIZ
Sarah NOYÉ
Beatriz SÁNCHEZ
Arantza LÓPEZ

8. TERRA INFRASTRUCTURE (ANCIENNEMENT THYSSENKRUPP INFRASTRUCTURE)

Arno ROMANOWSKI
Franziska HELBIG

9. BUREAU REGIONAL DE L'UNESCO POUR LA SCIENCE ET LA CULTURE EN EUROPE

Jonathan BAKER
Francesca BAMPA
Matteo ROSATI
Iuliia KOZLOVA
Francesco LIPPARINI
Anh Thi Ngoc NGUYEN
Akémi LAMARCHE VADEL

10. FRIEDRICH-ALEXANDERUNIVERSITAET ERLANGEN NUERNBERG (FAU)

David BERTERMANN
Oliver SUFT
Moritz FAUDE
Johannes MULLER

11. SOCIETATEA ROMANA GEOEXCHANGE / ROMANIAN GEOEXCHANGE SOCIETY (SRG - RGS)

Robert GAVRILIUC
Doinița- Iuliana CUCUȚEANU
Tiberiu CATALINA
Marian ALEXANDRU

12. CENTRE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SAVING FONDATION (CRES)

Dimitrios MENDRINOS
Constantine KARYTSAS
Ioannis CHOROPANITIS
Ioannis CHALDEZOS
Spyridon KARYTSAS

13. HYDRA SRL (HYDRA)

Davide RIGHINI
Elisabetta GARDENGHI

14. UBEG DR ERICH MANDS U MARC SAUER GBR (UBEG)

Burkhard SANNER
Erich MANDS
Marc SAUER

15. GEO-GREEN SPRL (GEO-GREEN)

Jacques VERCRUYSSÉ

16. PIETRE EDIL SRL (PIETRE)

Elena Loredana FODOR
Leonardo ROSSI
Alexandru TĂNASE

17. SOLINTEL M&P SL (SOLINTEL)

Dery TORRES
Hugo GRASSET
Miguel Angel GOMEZ

18. DIN L-ART HELWA (DLH)

Luciano MULE'STAGNO
Daniel MICALLEF
Ingrid GALEA
Davide POLETTO
Daniele SFERRA
Manuel SCARPA

19. SCUOLA UNIVERSITARIA PROFESSIONALE DELLA SVIZZERA ITALIANA (SUPSI)

Marco BELLARDI
Linda SOMA
Sebastian PERA
Rodolfo PEREGO

PARTENAIRES



INSTITUTE OF ATMOSPHERIC SCIENCES AND CLIMATE
NATIONAL RESEARCH COUNCIL (CNR – ISAC)
www.isac.cnr.it



INSTITUTE OF CONSTRUCTION
TECHNOLOGIES NATIONAL
RESEARCH COUNCIL (CNR-ITC)
www.itc.cnr.it



UNIVERSITA' DEGLI
STUDI DI PADOVA (UNIPD)
www.unipd.it



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA
www.upv.es



RESEARCH AND
ENVIRONMENTAL
DEVICES SRL (RED)
www.red-srl.com



TERRA INFRASTRUCTURE
(FORMER THYSSENKRUPP
INFRASTRUCTURE)
www.terra-infrastructure.com



TERRA GEOSERV LIMITED
(GEOSERV)
www.geoservsolutions.com



GALLETTI BELGIUM/
HIREF (GALLETTI)
www.galletti.be/hiref.it



MEMBER OF BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE
FUNDACION TECNALIA
RESEARCH & INNOVATION
www.tecnalia.com



GEO GREEN SPRL
(GEO-GREEN)
www.geo-green.be



UNESCO REGIONAL BUREAU
FOR SCIENCE AND CULTURE
IN EUROPE
www.unesco.org/venice



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

FRIEDRICH-ALEXANDER-
UNIVERSITÄT ERLANGEN
NURNBERG (FAU)
www.uni-erlangen.de



ROMANIAN GEOEXCHANGE SOCIETY

SOCIETATEA ROMANA
GEOEXCHANGE /ROMANIAN
GEOEXCHANGE SOCIETY
(SRG - RGS)
www.geoexchange.ro



CENTRE FOR RENEWABLE
ENERGY SOURCES
AND SAVING FUNDATION
(CRES)
www.cres.gr



HYDRA SRL
(HYDRA)
www.hydrahammer.it



Umwelt Baugrund Geothermie Geotechnik

UBEG DR ERICH MANDS
U MARC SAUER
GBR (UBEG)
www.ubeg.de

Scuola universitaria professionale
della Svizzera italiana



SCUOLA UNIVERSITARIA
PROFESSIONALE
DELLA SVIZZERA ITALIANA
(SUPSI)
www.supsi.ch



PIETRE EDIL SRL
(PIETRE EDIL)
www.pietre-edil.ro



SOLINTEL M&P SL
(SOLINTEL)
www.solintel.eu



DIN L-ART HELWA (DLH)
www.dinlarthelwa.org