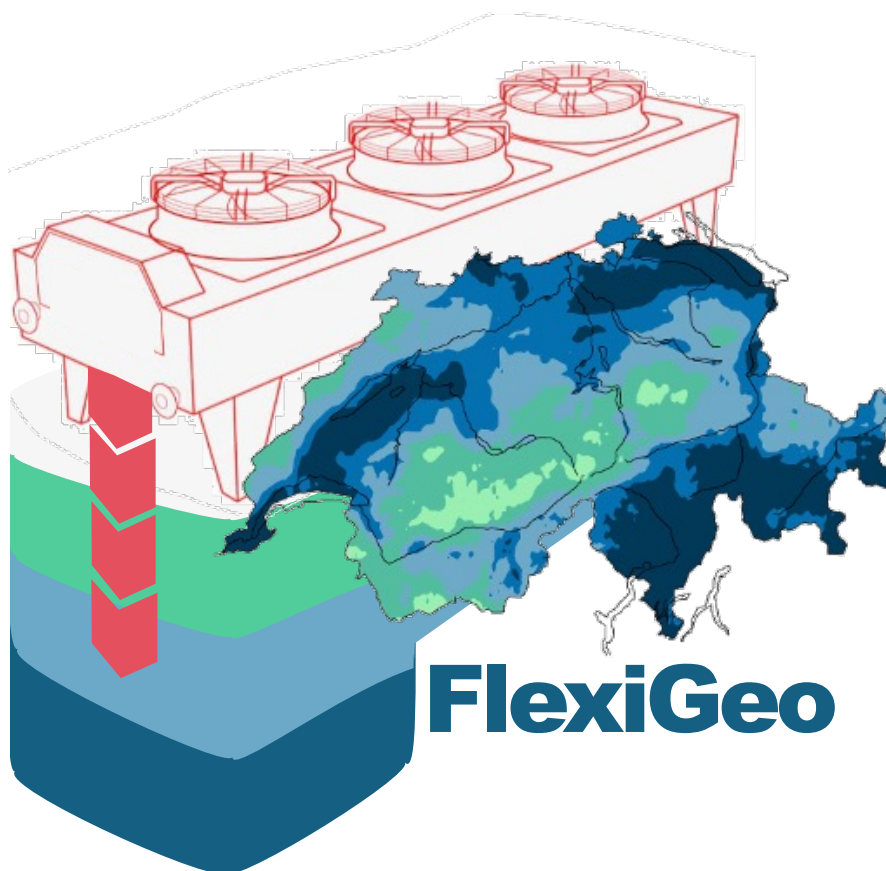




Rapport intermédiaire du 25 janvier 2026

FlexiGeo

Équilibrage flexible, par aérothermie, de systèmes géothermiques sur nappe ou sondes, pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments et de quartiers



Source: TBC



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

**HE
IG^{VD}**



HYDRO-GEO
environnement

Prestataire de subvention :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.recherche-energetique.ch

Cofinancement :

Service Industriel de Genève (SIG)
CH-1219 Vernier
ww2.sig-ge.ch

Direction de l'énergie (DGE-DIREN)
CH-1014 Lausanne
www.vd.ch/djes/dge/dge-diren

Bénéficiaires de la subvention :

Université de Genève (UNIGE)
CH-1205 Genève
www.unige.ch

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)
CH-1401 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

Hydro-Géo Environnement Sàrl
CH-1213 Petit-Lancy
www.hydro-geo.ch

Auteur(s) :

Cédric Schmid, UNIGE, cedric.schmidt@unige.ch
Fleury De Oliveira Filho, UNIGE, fleury.deoliveira@unige.ch
Pierre Hollmuller, UNIGE, pierre.hollmuller@unige.ch
Daniel Pahud, HEIG-VD, daniel.pahud@heig-vd.ch
Léo Cerlet, Hydro-Géo, leo.cerclet@hydro-geo.ch
Alexandra Bel, Hydro-Géo, alexandra.bel@hydro-geo.ch

Suivi du projet à l'OFEN :

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502871-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Le dimensionnement et l'exploitation des systèmes géothermiques de faible profondeur - qu'il s'agisse de champs de sondes verticales ou de puits exploitant des aquifères - demeurent soumis à un ensemble d'incertitudes. Celles-ci résultent notamment : i) de la difficulté, en phase de conception, à estimer de manière fiable les besoins effectifs en chauffage et en refroidissement des bâtiments ; ii) de l'échelonnement temporel des projets et de l'évolution des demandes thermiques au fil du temps, en particulier sous l'influence du changement climatique ; iii) de la connaissance encore partielle des conditions hydrogéologiques propres au contexte suisse, notamment en ce qui concerne les nappes souterraines.

Ce projet étudie une combinaison d'exploitation de la géothermie et de l'aérothermie, caractérisée par une flexibilité et une robustesse accrue, pour la couverture des besoins de chauffage et de refroidissement de bâtiments et de quartiers. Le système analysé repose sur une pompe à chaleur géothermique mutualisant les productions de chaud et de froid, et opérant en interaction avec des aéro-convecteurs exploitant l'air ambiant, afin de préserver l'équilibre thermique de la ressource géothermique de faible profondeur (par la recharge du terrain ou le délestage des sources géothermiques). Dans le cas spécifique d'une utilisation sur nappe phréatique, plusieurs stratégies d'implantation et de régulation des puits de pompage et de rejet sont investiguées.

L'évaluation conjointe des performances énergétiques, environnementales et économiques permettra d'élaborer des recommandations pour la conception et le dimensionnement d'installations individuelles, ainsi que pour la planification énergétique et territoriale à plus large échelle.

Zusammenfassung

Die Dimensionierung und der Betrieb von geothermischen Systemen geringer Tiefe - seien es vertikale Erdwärmesondenfelder zur Nutzung von Grundwasserleitern - unterliegen nach wie vor einer Reihe von Unsicherheiten. Diese resultieren insbesondere aus: i) der Schwierigkeit, in der Planungsphase den tatsächlichen Heiz- und Kühlbedarf von Gebäuden zuverlässig abzuschätzen; ii) der zeitlichen Staffelung der Projekte und der Entwicklung des Wärmebedarfs im Laufe der Zeit, insbesondere unter dem Einfluss des Klimawandels; iii) den noch unvollständigen Kenntnissen über die hydrogeologischen Bedingungen in der Schweiz, insbesondere in Bezug auf das Grundwasser.

Dieses Projekt zielt darauf ab, die Kombination der Wärmequellen Erdreich oder Grundwasser mit Luft zu untersuchen, die sich durch erhöhte Flexibilität und Robustheit auszeichnet, um den Heiz- und Kühlbedarf auf Gebäude- und Quartierebene zu decken. Das analysierte System basiert auf einer Erdwärmepumpe, die Wärme und Kälte erzeugt. Diese arbeitet mit Luftkonvektoren zusammen, die die Umgebungsluft nutzen, um das thermische Gleichgewicht der oberflächennahen Erdwärmequelle aufrechtzuerhalten. Im speziellen Fall der Nutzung des Grundwassers werden mehrere Strategien für die Installation und Regelung von Entnahme- und Rückgabebrunnen untersucht.

Die gemeinsame Bewertung der energetischen, ökologischen und wirtschaftlichen Leistung wird es ermöglichen, Empfehlungen für die Planung und Dimensionierung einzelner Anlagen sowie für die Energie- und Raumplanung in größerem Maßstab zu erarbeiten.

Summary

The sizing and operation of shallow geothermal systems - whether vertical borehole fields or wells exploiting aquifers - remain subject to several uncertainties. These result in particular from: i) the difficulty, during the design phase, of accurately assessing heating and cooling demands of buildings; ii) the phasing of projects and changes in thermal demand over time, particularly under the influence of climate



change; iii) the still partial knowledge of the hydrogeological conditions specific to the Swiss context, particularly with regard to groundwater.

This project analyses a combined geothermal and aerothermal operating configuration, characterized by increased flexibility and robustness, to meet heating and cooling needs at the building and neighborhood level. The system in question is based on a geothermal heat pump that combines heat and cold production and operates in conjunction with air convectors that use ambient air to preserve the thermal balance of shallow geothermal resources (by recharging or offloading geothermal sources). In the specific case of groundwater use, several strategies for the installation and regulation of pumping and discharge wells are being investigated.

The joint assessment of energy, environmental, and economic performance will enable recommendations to be developed for the design and sizing of individual installations, as well as for energy and territorial planning on a larger scale.



Table des matières

Résumé	3
Zusammenfassung	3
Summary	3
Table des matières	5
Liste des abréviations	6
1 Introduction	7
1.1. Contexte et motivation	7
1.2. Objectifs du projet	7
2 Activités, méthodes, résultats et discussions	8
2.1. Détermination de besoins thermiques représentatifs	8
2.1.1. Évolution climatique	8
2.1.2. Modèle thermique	9
2.1.3. Composition des parcs bâtis représentatifs	12
2.2. Système énergétique	13
2.2.1. Schéma hydraulique	13
2.2.2. Aéro-convecteur	14
2.2.3. Sondes verticales	14
2.2.4. Nappes phréatiques de faible profondeur	15
2.3. Méthode de cosimulation	19
2.3.1. Intégration entre TRNSYS et FEFLOW	19
2.4. Résultats préliminaires	20
2.4.1. Impact de l'évolution climatique sur les besoins de chaleur	20
2.4.2. Validation des courbes de besoins thermiques	21
2.4.3. Cosimulation	22
2.4.4. Portage de PILESIM vers TRNSYS 18	23
2.4.5. Modélisation des « nappes types »	23
3 Conclusions et perspectives	24
4 Coopération nationale et internationale	25
5 Publications et autres communications	25
6 Bibliographie	25
7 Annexe	28



Liste des abréviations

CH2018	Scénarios Climatiques Suisse 2018
CH2025	Scénarios Climatiques Suisse 2025
ECS	Eau Chaude Sanitaire
FEFLOW	Finite Element subsurface FLOW system
IFM	Interface Manager (interface Python de FEFLOW)
IUS	Indice d'Utilisation du Sol
OFEN	Office fédéral de l'énergie
PAC	Pompe À Chaleur
RCP	Representative Concentration Pathway
SIA	Société Suisse des Ingénieurs et Architectes
SIG	Services Industriels de Genève
SRE	Surface de Référence Énergétique
TCP	Transmission Control Protocol
TRNSYS	TRaNsient SYstem Simulation



1 Introduction

1.1. Contexte et motivation

Avec un potentiel estimé à au moins 9 TWh/an, la géothermie de surface (champs de sondes et nappes phréatiques) pourrait couvrir environ 13 % des besoins de chaleur du parc immobilier suisse [1], [2]. Avec une température naturelle relativement stable tout au long de l'année, autour de 12 °C, elle permet aux pompes à chaleur géothermiques d'obtenir de meilleures performances que les pompes à chaleur aérothermiques [3], [4], en particulier lorsque la température extérieure est basse. Les systèmes de géothermie de surface offrent également un potentiel important pour le refroidissement des bâtiments, que ce soit via un échange de chaleur direct (géocooling) ou comme puits de chaleur pour les groupes frigorifiques, offrant aussi de meilleures performances que l'aérothermie [5].

Cependant, dépendamment des profils de demande de chaleur pour le chauffage ou le refroidissement et de leurs bilans énergétiques annuels, on observe généralement une dérive thermique du sous-sol. Ceci a pour effet de dégrader l'efficacité des systèmes thermiques et peut parfois rendre la ressource inutilisable après quelques années [6]. Une solution consiste alors à recharger thermiquement le sol, qui fonctionne dès lors comme un réservoir thermique saisonnier.

Bien que les documents normatifs (SIA 384/6:2021 et SIA 384/7:2015) existants fournissent des informations utiles pour le dimensionnement de petits systèmes sur sondes ou nappes phréatiques, dans le cas de systèmes de plus grande taille, ils se limitent essentiellement à recommander l'usage de simulations numériques et ne traitent pas explicitement la question de la recharge thermique. Cette limitation devient critique lorsqu'il s'agit de dimensionner et d'exploiter des systèmes en conditions réelles alors que subsistent de nombreuses incertitudes liées à l'estimation des besoins de chaleur en fonction des affectations en phase préprojet et des incertitudes climatiques [7], du phasage temporel lors du déploiement d'un nouveau quartier [8] et des connaissances hydrogéologiques encore limitées quant à la réponse thermique du terrain, ainsi qu'aux interactions possibles entre exploitations voisines [6].

1.2. Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet est d'étudier comment exploiter au mieux les ressources géothermiques de faible profondeur (nappe phréatique ou champ de sondes) pour couvrir les besoins thermiques des bâtiments raccordés, tout en maximisant la part d'énergies renouvelables et sans compromettre la durabilité de la ressource dans le temps.

La solution proposée vise à combiner de manière flexible et optimale la géothermie de faible profondeur avec l'aérothermie, en tirant profit de leurs avantages respectifs généralement déphasés temporellement. En particulier, l'étude se concentre sur un système de pompe à chaleur centralisé et alimenté coté froid par un champ de sondes géothermiques ou un doublet sur aquifère associé à des aéroconvecteurs capables d'échanger de la chaleur avec l'air ambiant. Ces derniers permettent en outre une recharge thermique directe du sol et peuvent également se substituer aux apports géothermiques selon la température ambiante.

Du point de vue géothermique, l'analyse porte à la fois sur les champs de sondes géothermiques et sur les doublets de puits dans les aquifères superficiels, en considérant différentes stratégies de dimensionnement (positionnement, géométrie, nombre), différentes stratégies de contrôle des débits et diverses caractéristiques hydrogéologiques représentatives.

Au niveau des demandes thermiques, nous considérons premièrement l'impact du changement climatique sur diverses affectations représentatives des quartiers suisses et scénarisons quelques évolutions de ces besoins par l'évolution des surfaces de référence énergétique, des modifications d'affectation ou de rénovation du parc immobilier initial.

La réponse du système à ces diverses configurations est étudiée au moyen de simulations numériques dynamiques et d'analyses de sensibilité. Les performances sont évaluées selon des indicateurs



énergétiques, environnementaux et économiques, afin de dégager des conclusions sur la robustesse et la flexibilité de la solution envisagée. Finalement, l'étude conduira à des recommandations pour la conception et l'exploitation durable de systèmes géothermiques, tant pour l'ingénierie de projets individuels que pour la planification territoriale.

2 Activités, méthodes, résultats et discussions

2.1. Détermination de besoins thermiques représentatifs

Pour couvrir l'ensemble du cahier des charges du projet, et adresser simultanément la question des stratégies de contrôle des systèmes énergétiques et de leurs impacts sur la stabilisation des ressources géothermiques à long terme, nous avons établis des courbes de puissances thermiques par prestation (chauffage, ECS, froid) avec un pas de simulation horaire. L'évaluation des demandes thermiques de différents parcs bâtis repose sur 3 catégories de données d'entrée ;

- l'évolution du climat suisse et les variables associées sont extraites du projet CH2025 de Météosuisse et ETH Zurich [9] et disponibles jusqu'en 2099,
- les catégories d'affectations des quartiers représentatifs étudiés et finalement,
- les paramètres techniques des différents locaux selon le cahier technique SIA 2024 [10].

Les méthodes associées sont développées dans cette section.

2.1.1. Évolution climatique

L'évolution climatique mondiale et particulièrement l'augmentation des températures au sol sur le territoire suisse sera considérée à plusieurs niveaux dans cette étude. Premièrement au niveau des besoins en puissance et énergie pour la chaleur de confort avec une baisse attendue en hiver pour les besoins de chaud et une augmentation en été pour les besoins de froid. Deuxièmement au niveau de la quantité d'énergie disponible sous forme d'aérothermie pour les systèmes énergétiques de recharge saisonnier ou d'alimentation des pompes à chaleur. Finalement pour l'évolution vers de nouvelles températures d'équilibre des ressources géothermiques de faible profondeur au travers du gradient thermique vertical en surface (apports solaires).

Par simplicité, nous avons choisi de retenir l'évolution des valeurs de température au sol et de radiation solaire à la surface et de négliger les variables de vent, de précipitation et d'humidité relative qui seraient trop lourde à inclure dans le périmètre des simulations. Ce choix pourra être discuté dans l'analyse finale.

Les valeurs utilisées seront issues du projet CH2025 de Météosuisse récemment publié [9]. Dans l'attente de la disponibilité finale de ces données, nous travaillons avec les valeurs des projets CH2018 - Scénarios climatiques pour la Suisse [11] et SIA2028 - Scénarios climatiques pour le futur climat intérieur ambiant [12]. Ces sets de données de référence sont disponibles pour 45 stations du territoire suisse et pour les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre RCP2.6 et RCP8.5 [13] représentés sur la figure Figure 1.

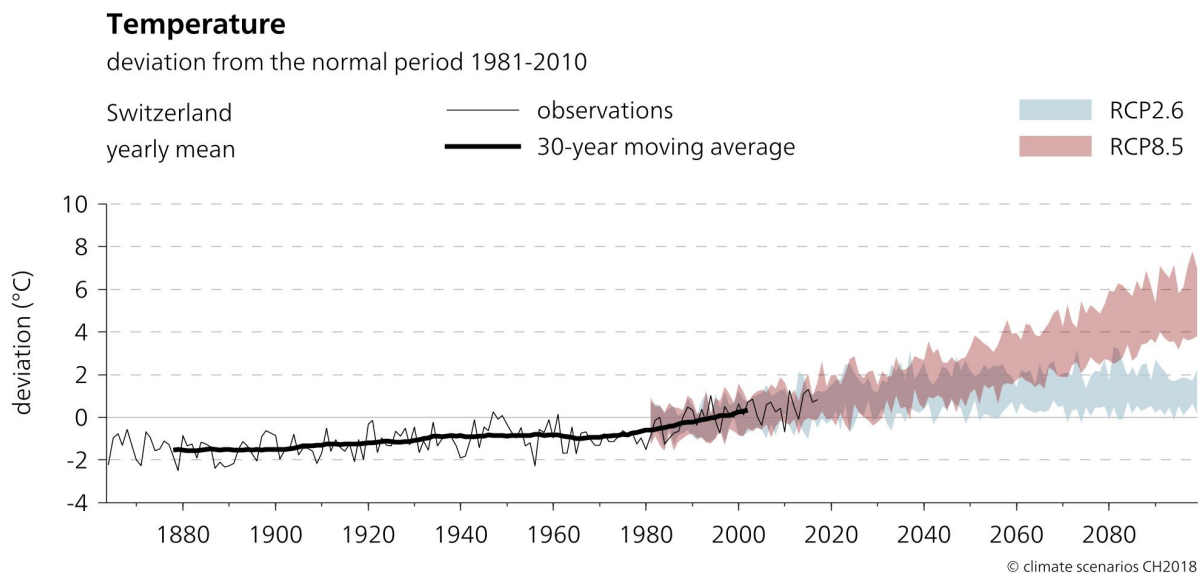


Figure 1: Écart des températures moyennes par rapport à la période de référence 1981-2010. Les courbes montrent les observations et les simulations climatiques des scénarios d'émissions RCP 8,5 et RCP 2,6. Source : MétéoSuisse [13].

Le set CH2018 contient des données climatiques par pas journalier sur la période 1981-2099 et le set SIA2028 contient des données horaires de température, humidité, vent, et rayonnements physiquement cohérents pour une année typiques (2035) représentative de la période 2020-2050.

Pour ce projet on ne retient que le scénario RCP8.5 et les incertitudes associées sur la température et le rayonnement car il s'agit du scénario jugé le plus probable [11]. Les valeurs complètes au pas horaire sont construites de la manière suivante :

- 1) Calcul des moyennes journalières du set SIA2028
- 2) Attribution de la courbe horaire avec la moyenne journalière la plus proche du set CH2018 avec une tolérance de ± 10 jours
- 3) Lissage des jointure journalières de température par moyenne glissante
- 4) Correction globale de l'amplitude pour égaliser la moyenne sur la période 2025-2050

Cette méthode satisfait aux besoins actuels du projet et est en cours de révision avec les données disponibles issues du projet CH2025. La méthodologie complète sera détaillée en annexe du rapport final.

2.1.2. Modèle thermique

Pour assurer la représentativité des besoins de chaleur sur l'ensemble du plateau suisse, nous partons du cahier technique SIA 2024 - Données d'utilisation des locaux pour l'énergie des installations du bâtiment [10]. Selon le modèle des phases de projet SIA, ces spécifications techniques servent de référence pour estimer les demandes en puissance et énergie des bâtiments lors de la définition des objectifs, des études préliminaires et de l'étude du projet « tant qu'aucune donnée de planification spécifique au projet n'est disponible ». Les définitions des grandeurs utilisées sont données dans la Table 1.



Table 1 : Définitions des grandeurs et paramètres selon SIA 2024 et utilisés pour le calcul des besoins de chaud et de froid confort. Pour une définition exhaustive des paramètres impliqués, voir SIA 2024.

$\Phi_{H/C}$	Puissance nécessaire de chauffage/refroidissement pour atteindre la consigne de température intérieure $\theta_{i,avg,H/C}$
H_H	Somme du coefficient de transfert thermique par transmission et du coefficient de transfert thermique par ventilation $H_H = H_T + H_V$
$\theta_{i,avg,H/C}$	Température moyenne de l'espace intérieur pour calculer les besoins de chauffage/refroidissement
$A_{hiver/été}$	Coefficient pour les apports solaires $A_{hiver/été} = A_g/A_{SN} \cdot g_{tot,hiver/été} \cdot f_{sh}$
Φ_i	Apports de chaleur internes (moyenne annuelle) $\Phi_i = \Phi_P + \Phi_A + \Phi_L$

Rappelons aussi la distinction faite entre les types de valeurs SIA :

Existant : valeurs typiques des bâtiments existants non rénovés construits avant 1980.

Standard : valeurs de planification typiques pour les nouveaux bâtiments et rénovations totales conformes aux valeurs limites SIA.

Cible : valeurs de planification optimales pour les nouveaux bâtiments et rénovations totales conformes aux valeurs cibles SIA.

Les profils de puissances thermiques horaires couvrant la période 2025-2099 sont finalement calculés à l'aide d'un modèle type 1R1C [14] pour les prestations de chaud et froid confort. Les puissances utiles pour l'eau chaude sanitaire sont construites sur la base des profils horaires de la SIA 385/2 et normalisés avec l'énergie annuelle donnée par la SIA 2024. Les puissances requises pour la livraison du froid industriel sont quant à elles définies constantes.

Demande thermique : chauffage

Le bilan de l'équation 1 permet de définir les profils de puissance par type de local et par performance d'enveloppe du bâtiment (type de valeur SIA) pour les besoins de chauffage qui serviront à soutirer des débits chauds sur un ballon tampon basse température (pour le parc *cible*) ou haute température (pour le parc *existant*) du système hydraulique (voir Figure 4).

$$\Phi_{H, local, val} = (-H_H \cdot (\theta_e - \theta_{i,avg,H}) - A_{hiver} \cdot \Phi_{sol} - \Phi_i) \cdot SRE_{local,val} \quad \text{Eq 1}$$

où les variables de température extérieure θ_e et de radiation solaire globale Φ_{sol} sont des mesures ou des projections Météosuisse selon le projet CH2018 [15].

De manière à prendre en considération l'impact des évolutions de température ambiante et de rayonnement solaire, nous avons choisi de ne pas imposer de contrainte calendaire sur la condition de non-chauffage mais de définir une condition strictement dépendante du bilan thermique.

Ainsi, pour déterminer les arrêts et démarrages annuels de chauffage, on applique une moyenne glissante de 72 h sur $\Phi_{H, local}$ et on cherche la plus longue période consécutive par année pour laquelle $\langle \Phi_{H, local} \rangle_{72h} < 0$ tel que représenté par la Figure 2. Les bornes de la période retenue constituent les dates d'arrêt et de démarrage du chauffage pour l'année en cours.

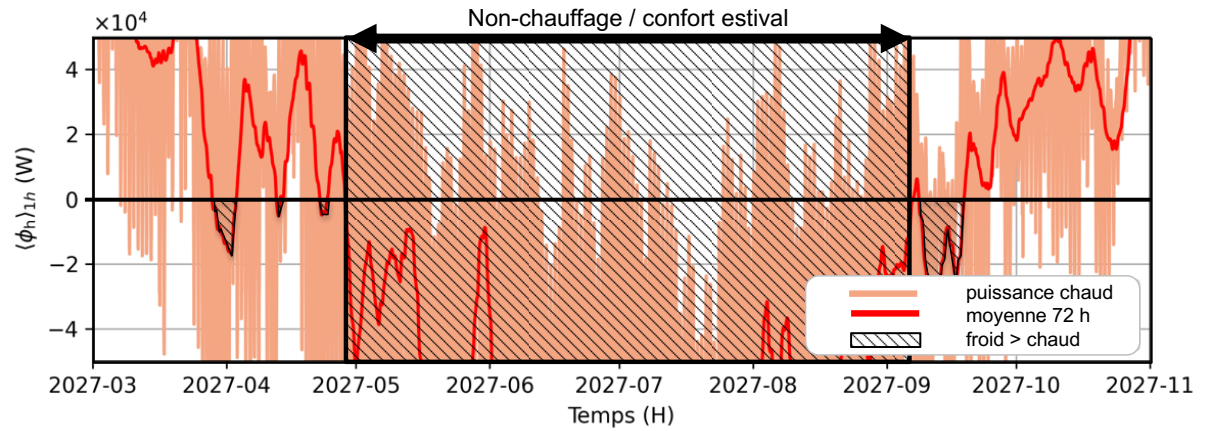


Figure 2: Illustration du découpage de la période de non-chauffage annuelle. Ce découpage est appliqué indépendamment pour chaque type de local SIA du parc simulé.

Les profils de puissance finaux pour le chaud confort (et pour chaque parc bâti étudié) est la somme des contributions individuelles strictement positives par type de local et type de valeurs tel que défini par l'équation Eq 2.

$$\phi_H = \sum_{\substack{\text{local, val} \\ \phi_{H, \text{local, val}} > 0}} \phi_{H, \text{local, val}} \quad \text{Eq 2}$$

Les valeurs de puissance maximale et d'énergie annuelle pour le chauffage sont comparables aux valeurs fournies par l'outil Excel "SIA 2024 Fiches techniques des locaux" pour la station de Genève-Cointrin disponibles dans la Table 2. La Figure 9 présente l'évolution des besoins annuels selon ce calcul pour différentes qualités d'enveloppe et en prenant compte du changement climatique d'ici 2099.

Table 2 : Valeurs de puissance et d'énergie déterminées via l'outil de calcul Excel "SIA 2024 Fiches techniques des locaux" pour du logement collectif à la station de Genève-Cointrin.

Type de valeur	Chauffage		Climatisation		Eau chaude
	Puissance (W/m2)	Energie (kWh/m2)	Puissance (W/m2)	Energie (kWh/m2)	Energie (kWh/m2)
Existant	48.1	89.9	/	/	16.9
Standard	13.7	12.2	22.0	8.0	16.9
Cible	10.3	8.4	15.2	4.6	16.9

Demande thermique : froid confort

Le bilan de l'Eq 3 permet de définir les profils de puissance par type de local et performance d'enveloppe pour les besoins de froid et permettent de soutirer des débits froids sur un ballon tampon (voir Figure 4) du système hydraulique.

$$\phi_{C, \text{local, val}} = (-H_H \cdot (\theta_e - \theta_{i, \text{avg}, C}) - A_{\text{été}} \cdot \Phi_{\text{sol}} - \Phi_i) \cdot \text{SRE}_{\text{local, val}} \quad \text{Eq 3}$$

Dont on ne retient que les valeurs strictement négatives lorsque la température extérieure θ_e est supérieure à la consigne de température moyenne intérieur $\theta_{i, \text{avg}, C}$ durant les périodes de non-chauffage avec la somme définie par l'Eq 4.



$$\Phi_C = \sum_{\substack{\text{local, val} \\ \Phi_{C, \text{local, val}} < 0 \\ \theta_e > \theta_{i, \text{avg}, C} \\ \text{Période de non-chauffage}}} \Phi_{C, \text{local, val}} \quad \text{Eq 4}$$

Les valeurs de puissance maximale et d'énergie annuelle pour le confort estival sont comparables aux valeurs fournies par l'outil Excel "SIA 2024 Fiches techniques des locaux" pour la station de Genève-Cointrin disponibles dans la Table 2. La Figure 9 présente un exemple d'évolution des besoins annuels selon ce calcul.

Demande thermique : eau chaude sanitaire

Pour la demande en eau chaude sanitaire, on applique les profils horaires types de la SIA 385/2 selon le jour de la semaine et le type de local et on normalise annuellement sur le besoin en énergie utile donnée par la SIA 2024. Selon l'usage des profils (comparaison avec mesures ou simulation) on applique des pertes de 40 % pour le stockage et la distribution d'eau chaude sanitaire [16], [17].

Demande thermique : froid industriel

Pour les besoins de refroidissement industriels, on considère les demandes annuelles en électricité des installations de process par type de valeur pour les locaux : (9.01-02) production, (9.03) laboratoire et (12.12) salle de serveurs. Ces consommations sont supposées intégralement converties en chaleur dissipée et sont transformées en puissances moyennes horaires (puissance en ruban) afin de déterminer les besoins de refroidissement correspondants.

2.1.3. Composition des parcs bâtis représentatifs

Les différents parcs de bâtiments étudiés dans cette étude sont définis par leur répartition en affectation et qualité enveloppe (valeurs existant ou cible SIA), ainsi que leur indice d'utilisation du sol (IUS). La Figure 3 illustre les étapes de construction des besoins thermiques sur la base des affectations SIA.

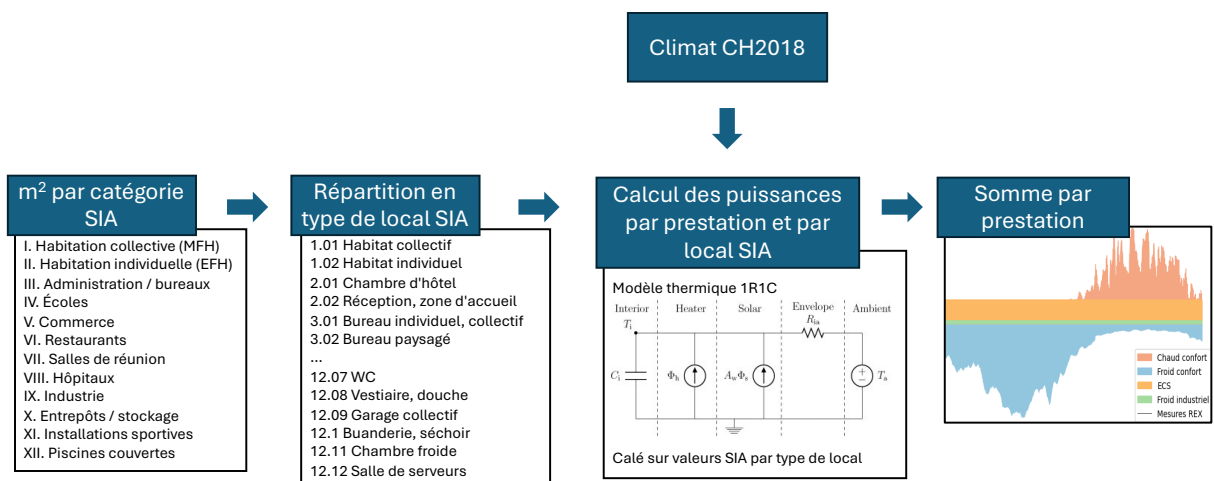


Figure 3: Méthode de composition des besoins en puissance horaire sur la base des SRE par catégorie d'affectation SIA.

A ce jour, nous avons identifié 3 parcs d'intérêt à étudier qui permettront de valider ou d'ajuster les paramètres de la méthode avec des mesures disponibles des besoins thermiques et réalisés par des études indépendantes. Une synthèse des paramètres de ces parcs (renormalisés à 20'000 m² de surface SRE) est disponible en Table 3. D'autres configurations seront ajoutées sur la base des premiers résultats obtenus afin de couvrir l'ensemble des objectifs de l'étude.



Table 3 : Synthèse des parcs de bâtiments scénarisés

ID parc	Catégorie SIA	Type SIA	SRE (m2)	IUS	Référence
A01	Toutes	100% Existant	20'000	1.4	Ventes gaz SIG sur 22'000'000 m2
A02	I et IV	20% Existant, 80% cible	20'000	1.3	Fontenette [18], [19] sur 17'000 m2
A03	I et IV	Vers 100% cible	20'000	1.3	Fontenette avec froid et rénovation complète en 2099

2.2. Système énergétique

Le système énergétique étudié est basé sur un rapport relatant de l'usage, développé aux Pays-Bas, d'aéro-convecteurs pour l'équilibrage des ressources géothermiques [20]. Il se compose d'une pompe à chaleur centralisée qui permet de valoriser le mieux possible ses sources froides et chaudes et qui s'alimente, coté froid, sur une source géothermique ou sur l'air au moyen des aéro-convecteurs.

2.2.1. Schéma hydraulique

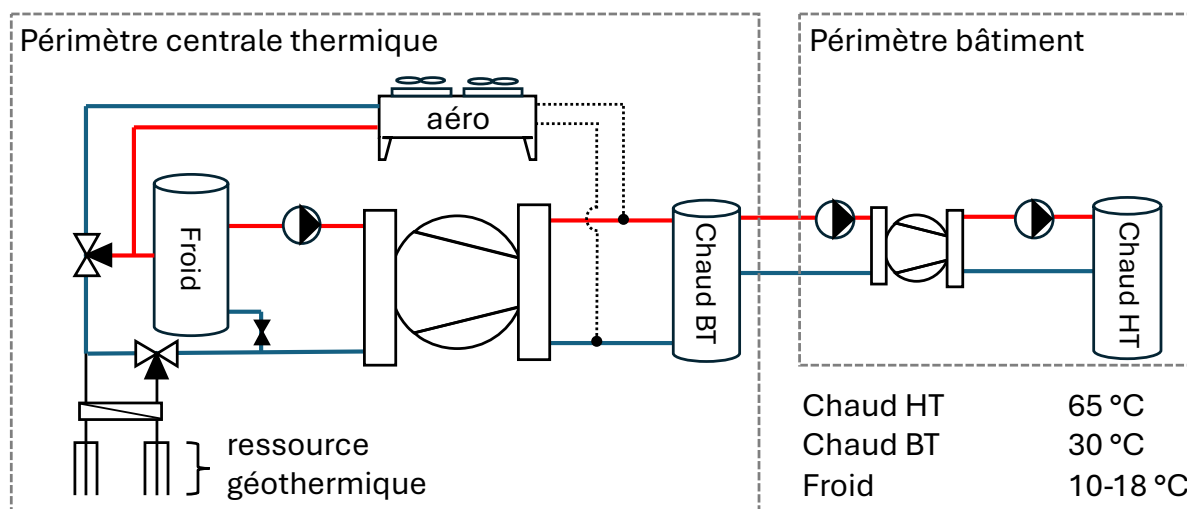


Figure 4 : Schéma du circuit hydraulique principal avec les couleurs bleue et rouge mettant en évidence la circulation des apports aérothermiques. Les périmètres représentent les limites de propriété des installations.

Le circuit hydraulique étudié prioritairement peut-être schématisé par la Figure 4. Ce système, compatible avec la dernière norme SIA 384/4, permet de mutualiser les productions de froid et de chaud via la PAC centralisée et de maximiser la valorisation des rejets de chaleur. Le module aéro-convecteur est connecté de sorte à permettre un stockage de chaleur directement dans le sous-sol (à travers le ballon froid) ou à déléster l'utilisation de la géothermie en servant de source froide autonome selon la température ambiante ou la différence de température avec la ressource géothermique. Il permet aussi de connecter des départs pour le chauffage sur le ballon basse température ou sur le ballon haute température selon les besoins du parc. Finalement, le branchement de la géothermie et de l'aérothermie au travers du ballon froid est cohérent avec certains projets des SIG actuellement en phase de planification.

Le fonctionnement du système hydraulique proposé sera étudié sur la base d'un modèle numérique dynamique réalisé sur TRNSYS (voir section 2.3).



2.2.2. Aéro-convecteur

Le système d'exploitation de l'aérothermie considéré dans notre étude repose sur un ou plusieurs modules d'aéro-convecteurs capables d'échanger de la chaleur entre l'air ambiant et le système énergétique.

Physiquement, ces modules font circuler un fluide à l'état liquide dans une batterie de tubes munis d'ailettes métalliques permettant d'augmenter la surface d'échange avec l'air. Des ventilateurs forcent la convection de l'air ambiant à travers la batterie afin d'améliorer l'efficacité de l'échange thermique.

La chaleur passe de l'air ambiant vers le liquide ou l'inverse en 3 étapes : la convection à l'intérieur des tubes, la conduction à travers la paroi métallique, puis la convection sur les ailettes. Dans l'usage étudié ici, qui diffère de celui d'un aéro-évaporateur, le liquide caloporteur ne subit pas de changement d'état ce qui offre davantage de souplesse pour l'intégration des modules avec le système hydraulique. Si l'on néglige la formation de condensation sur les ailettes et les échanges de chaleur latente associés, les transferts de chaleur sont essentiellement sensibles et peuvent être simulés par le Type5 (mode 6) de TRNSYS. Le débit d'air peut quant à lui être fixe ou variable.

L'extension de PILESIM (voir section 2.2.3), appelée PILEHX [21], intègre aussi un aéro-convecteur dans le circuit des sondes géothermiques, ce qui permet, selon l'évolution des températures du fluide et du bilan thermique annuel sur les sondes, de récupérer de la chaleur de l'air extérieur pour la stocker dans le terrain en été, ou de dissiper de la chaleur dans l'air extérieur pour déstocker de la chaleur du terrain en hiver. Cette application, déjà utilisée pour l'analyse énergétique d'installations [19], sera perfectionnée pour mieux prendre en compte les performances thermiques des aéro-convecteurs, sur la base des caractéristiques thermiques déclarées par les fabricants.

Les solutions commerciales actuellement disponibles sont largement orientées et optimisées pour des usages comme aéro-refroidisseurs pour le refroidissement de processus industriels. Quelques fournisseurs identifiés à ce jour (CIAT, CTA, Güntner) proposent des options pour modifier les boîtiers de contrôle des ventilateurs et des pompes de circulation du liquide ou modifier l'assemblage entre les ventilateurs et la batterie pour convertir le module en aéro-réchauffeur. Ces optimisations feront l'objet d'une section dédiée dans le rapport final.

2.2.3. Sondes verticales

Deux modèles de simulations thermiques de sondes géothermiques [22], [23], initialement développés à l'université de Lund, améliorés par la suite [24], [25], et validés à de nombreuses reprises [26], [27], [28], [29], sont utilisés pour simuler leur comportement dans un système énergétique. Il s'agit de TRNSBM et de TRNVDSTP, deux modèles intégrés dans TRNSYS comme TYPES définis par l'utilisateur.

TRNSBM [30] permet de simuler un nombre arbitraire de sondes géothermiques disposées dans une configuration arbitraire. Il permet aussi de simuler plusieurs champs de sondes exploités de façon différente. Le modèle d'origine, SBM pour Superposition Borehole Model, est utilisé pour le calcul de nombreuses fonctions-g reprises par divers programmes de dimensionnement de sondes géothermiques, comme par exemple EED (earth Energy Designer) [31] et EWS (Erdwärmesonden) [32].

TRNVDSTP [33] permet de simuler un champ de sondes géothermiques dont le placement des sondes est optimal pour le stockage de chaleur dans le terrain. Il se prête particulièrement bien pour la simulation d'un ensemble de sondes placées dans une configuration compacte. A l'opposé, dans le cas d'une configuration dissipative, lorsque les sondes sont placées sur une ligne ou un périmètre, l'utilisation de TRNVDSTP est possible en faisant une calibration de l'espacement moyen entre les sondes, permettant ainsi de reproduire fidèlement la réponse thermique à long terme du champ de sonde. TRNSBM permet justement de faire cette calibration, conférant à TRNVDSTP la capacité de simuler un champ de sondes dont leur placement ne correspond pas nécessairement à celui, idéal, d'un stockage de chaleur souterrain.



Si TRNSBM n'est pas utilisé pour la simulation d'un champ de sondes dans un système, c'est en raison de la superposition des calculs qui rend le temps d'exécution très long. Ce dernier tend à diverger à mesure que le nombre de sondes devient plus élevé. En revanche ce n'est pas le cas avec TRNVDSTP, qui simule de façon astucieuse les transferts thermiques dans le terrain, en distinguant le phénomène local au voisinage de chaque sonde et le phénomène global dans le terrain (dedans et autour du volume de terrain occupé par les sondes), permettant ainsi de traiter les transferts de chaleur avec des échelles de temps très différentes.

C'est la raison pour laquelle PILESIM [34] utilise TRNVDSTP plutôt que TRNSBM. PILESIM, développé avec TRNSYS, permet la simulation d'un champ de sondes géothermiques (ou de pieux énergétiques), intégré dans une installation de chauffage et de refroidissement. Il permet de simuler, avec une base de temps horaire, les performances thermiques d'un champ de sondes géothermiques pendant une durée de 50 ans en moins d'une minute. La simulation des interactions thermiques à court terme entre les principaux composants du système thermique (PAC, machine de froid, échangeur de chaleur pour refroidissement direct (géocooling) et le champ de sondes géothermiques), sur la base des besoins de chaud et de froid à satisfaire, permet d'obtenir l'évolution des niveaux de température du fluide circulant dans les sondes. Le champ de sondes est alors dimensionné par itérations successives jusqu'à ce que la température du fluide, pendant l'horizon temporel simulé (50 ans ou plus), respecte les limites fixées par les exigences du dimensionnement.

2.2.4. Nappes phréatiques de faible profondeur

Dans le cas des nappes phréatiques, la ressource est exploitée à partir d'un doublet géothermique constitué d'un puits de production et d'un puits de réinjection (Figure 5).

Le principe repose sur l'utilisation d'un échangeur thermique permettant de valoriser la température relativement stable des nappes phréatiques, généralement comprises entre 10 et 15 °C. Le débit d'exploitation est ajusté en fonction des besoins thermiques des bâtiments, afin d'assurer un fonctionnement optimal en mode chauffage comme en mode refroidissement.

L'avantage de la géothermie sur nappe réside principalement dans ses performances énergétiques élevées et stables tout au long de l'année. L'intérêt croissant pour cette technologie s'explique donc par ses rendements élevés et par son statut de solution énergétique renouvelable. Toutefois, la pertinence technico-économique du système dépend fortement des caractéristiques locales de la ressource (débit disponible, profondeur, qualité de l'eau), variables selon le contexte géologique.

Bien que l'emprise technique soit généralement moindre que pour des sondes, une disponibilité foncière suffisante est requise afin que les puits de production et de réinjection puissent être implémentés à une distance minimale l'un de l'autre (plusieurs dizaines de mètres).

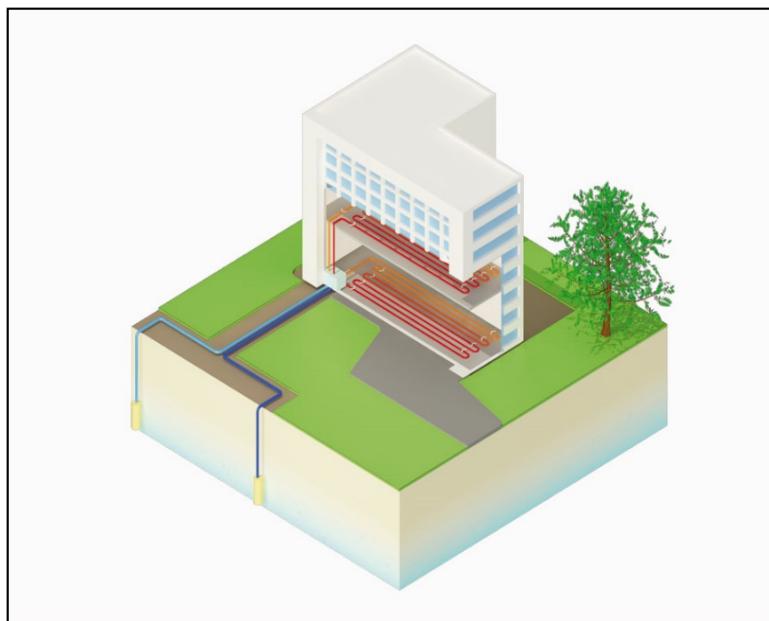


Figure 5 : Schémas d'exploitation de la géothermie sur nappe phréatique. Source : ADEME-BRGM

Esquisse hydrogéologique de la Suisse

Située au cœur de la chaîne alpine, la Suisse présente une géologie très variée, résultant d'une histoire complexe faite de mers anciennes, de collisions tectoniques, de glaciations et d'érosion intense. Les eaux souterraines sont présentes dans toutes les roches souterraines.

L'esquisse hydrogéologique présentée en Figure 6 offre un aperçu des différents types d'aquifères sur tout le territoire et présente leurs principales propriétés.

D'importants aquifères se trouvent dans les sédiments non consolidés des grandes vallées fluviales du plateau et dans les vallées alpines (en bleu sur la carte). Les aquifères fissurés sont largement répartis sur tout le plateau et les Alpes (en orange et jaune), tandis que des aquifères karstifiés se trouvent dans les Alpes et le long des montagnes du Jura (en gris) [35].

Les réservoirs fissurés et karstiques donnent naissance à de nombreuses sources, souvent irrégulières, généralement exploitées pour l'eau potable et non à des fins géothermiques.

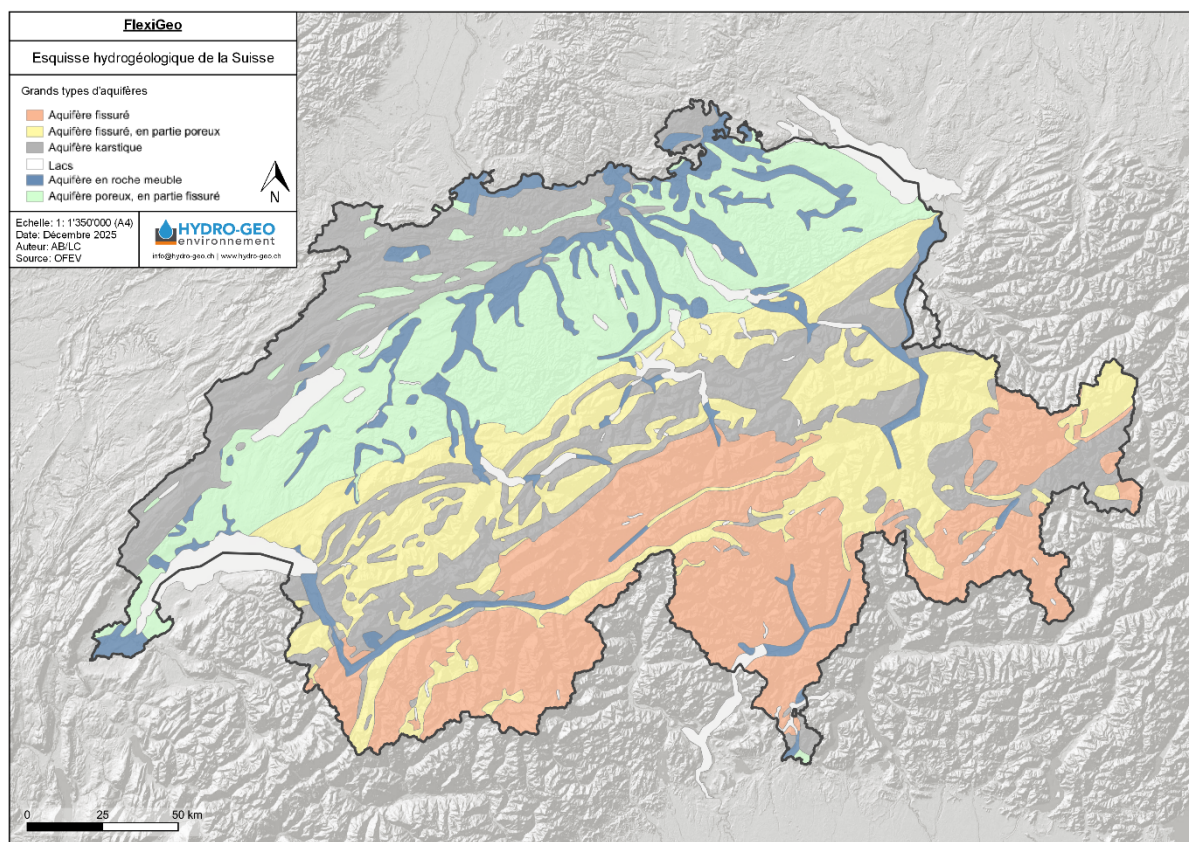


Figure 6 : Esquisse hydrogéologique de la Suisse. Les aquifères se trouvant dans les sédiments non consolidés des grandes vallées fluviales du plateau et dans les vallées alpines sont représentés en bleu. Les aquifères fissurés sont en orange et jaune. Les aquifères karstifiés sont en gris. Source : OFEV

Inventaire des nappes exploitées en suisse pour la géothermie sur nappe de basse enthalpie

La démarche d'identification et de documentation des nappes d'eau souterraine en Suisse, actuellement utilisée ou présentant un potentiel d'utilisation pour la géothermie basse enthalpie, repose sur un recueil de données provenant de plusieurs sources :

1. La carte des réservoirs aquifères au 1 : 500 000 de l'OFEV [35] : présente uniformément les conditions hydrogéologiques des roches meubles et cohérentes dans toute la Suisse. Elle représente les types d'aquifères et leur productivité, et fournit des informations hydrogéologiques, telles que les principaux captages d'eau souterraine et d'eau de source (voir Figure 7) ;
2. Les guichets cartographiques cantonaux (hydrogéologie, forages, zones protégées, débits autorisés) ;
3. Les synthèses bibliographiques existantes en géothermie hydraulique et en hydrogéologie régionale [36], [37], [38], [39], [40];
4. L'expertise interne du bureau HydroGeo (retours d'expérience opérationnels, études antérieures) ;
5. Le rapport du bureau Geotest SA relatif au potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères de roches meubles en Suisse, qui constitue une référence nationale en matière de caractérisation hydrothermique des nappes [41].

L'objectif de cette étape est de constituer une base de données homogène permettant de comparer les nappes sur l'ensemble du territoire suisse selon leur géométrie, leurs propriétés hydrauliques et thermiques, et d'identifier le périmètre géographique d'application de ce projet.



Ce travail fournit un socle indispensable pour les analyses ultérieures, en particulier pour l'établissement d'une typologie nationale des nappes exploitables en géothermie tel que développé à la section 2.4.5.

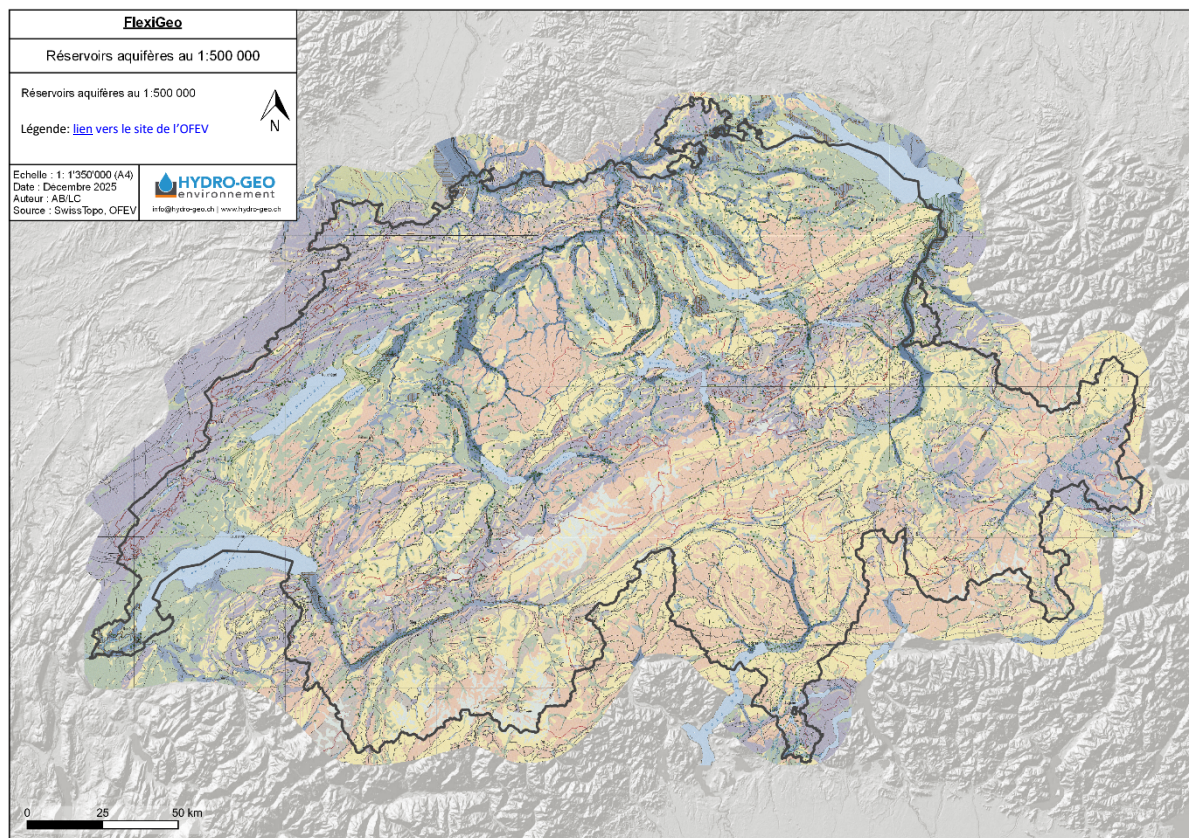


Figure 7 : Carte des réservoirs aquifères de la Suisse au 1 : 500 000. Source : OFEV

Caractérisation hydrogéologique des nappes et définition de cinq « nappes types »

À partir de l'inventaire réalisé, les principales familles de nappes présentes en Suisse ont été caractérisées et regroupées en cinq catégories de façon à représenter la diversité du contexte suisse.

La caractérisation repose sur l'analyse des paramètres hydrogéologiques déterminants pour l'exploitation géothermique :

Nature de l'aquifère	milieux poreux (roches meubles), fissurés/fracturés ou karstiques ;
Type de nappe	libre ou captive, avec implications sur les écoulements (eau libre ou sous pression) et la recharge (couverture sur toute ou partie de l'aquifère) ;
Conditions d'écoulement	direction et vitesse d'écoulement, zones d'alimentation, exutoires naturels ;
Épaisseur saturée	épaisseur de l'aquifère, transmissivité, charge hydraulique amont et aval, vitesse d'écoulement dans les puits ;
Profondeur et régime thermique	stabilité ou variabilité de la température, influence des conditions géologiques, saisonnalité éventuelle.

L'ensemble de ces critères permet de dégager cinq nappes types en milieu poreux. Cette typologie a pour objectifs de faciliter la comparaison des potentiels géothermiques selon le contexte rencontré, de



fournir des modèles simplifiés pour les études de dimensionnement de doublets et de servir de base aux scénarios d'exploitation durable des ressources.

Les nappes situées dans des milieux fissurés ou fracturés ont été exclues de la caractérisation, car elles ne sont actuellement pas utilisées à des fins thermiques et ne peuvent pas être modélisées avec le logiciel FEFLOW.

2.3. Méthode de cosimulation

2.3.1. Intégration entre TRNSYS et FEFLOW

Sur la base des besoins thermiques générés pour les différents ensembles de bâtiments (voir section 2.1), la simulation du comportement des différents composants du système énergétique, ainsi que les réponses thermiques du champ de sondes est réalisée avec TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation) [42] et le logiciel PILESIM [43] pour les échanges thermiques dans le terrain. Afin de simuler les interactions thermiques dans les nappes phréatiques, celles-ci sont modélisées avec le logiciel FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) [44], [45] qui est couplé à TRNSYS.

Plusieurs travaux mentionnent des tentatives de couplage entre ces deux logiciels [46], [47], mais aucun code ne semble avoir été maintenu ni n'est entièrement publié. Dans ce projet, une approche de couplage, sans modification du code source des deux applications, a été retenue [46]. Elle exploite les points d'entrée programmables accessibles via leurs interfaces Python respectives, afin de permettre un échange bidirectionnel en temps réel des variables de débit, de température et de niveau piézométrique entre les deux environnements de calcul. Ce dispositif assure également un contrôle externe de la séquence d'exécution de FEFLOW par TRNSYS.

Côté TRNSYS, le composant Type 3157 - Calling Python (CFFI) [48] permet l'intégration de code Python au sein du moteur de simulation. Ce module expose plusieurs fonctions de rappel (callbacks), déclenchées à différents stades de la simulation, qui offrent la possibilité de lire ou d'écrire des variables internes à chaque itération. Ces fonctions servent à transférer les données calculées vers FEFLOW à chaque pas de temps.

La communication avec FEFLOW repose sur son interface Python IFM (Interface Manager), qui autorise la modification dynamique des données du modèle en cours d'exécution. À chaque appel, le script Python interagit directement avec le solveur FEFLOW afin de définir ou de récupérer les conditions aux limites de nœuds ou d'éléments spécifiques du maillage.

Les deux environnements échangent leurs variables par pas temporel journalier (soit tous les 24 pas horaires de simulation) via un protocole TCP synchrone, implémenté selon un modèle client–serveur. TRNSYS agit comme client : il lit la température au nœud de pompage ainsi que le niveau piézométrique au point d'injection, puis transmet à FEFLOW le débit à extraire et la température d'injection. FEFLOW exécute ensuite un pas de simulation, calcule la réponse thermique et hydraulique du milieu souterrain, puis renvoie les températures correspondantes. Le serveur TCP suspend la boucle interne de FEFLOW durant l'attente d'un ordre externe, garantissant ainsi une synchronisation temporelle stricte entre les deux simulateurs. Le calcul des moyennes et des bilans énergétiques journaliers sont exécutés côté client par TRNSYS.

Cette architecture permet un pilotage externe complet du calcul FEFLOW tout en assurant la cohérence temporelle du système couplé. Elle présente les avantages d'une mise en œuvre non intrusive, indépendante des codes sources propriétaires, et d'une intégration directe de FEFLOW dans une chaîne de simulation énergétique dynamique. L'ensemble des fichiers sources nécessaires à ce couplage sera diffusé comme livrable du projet.

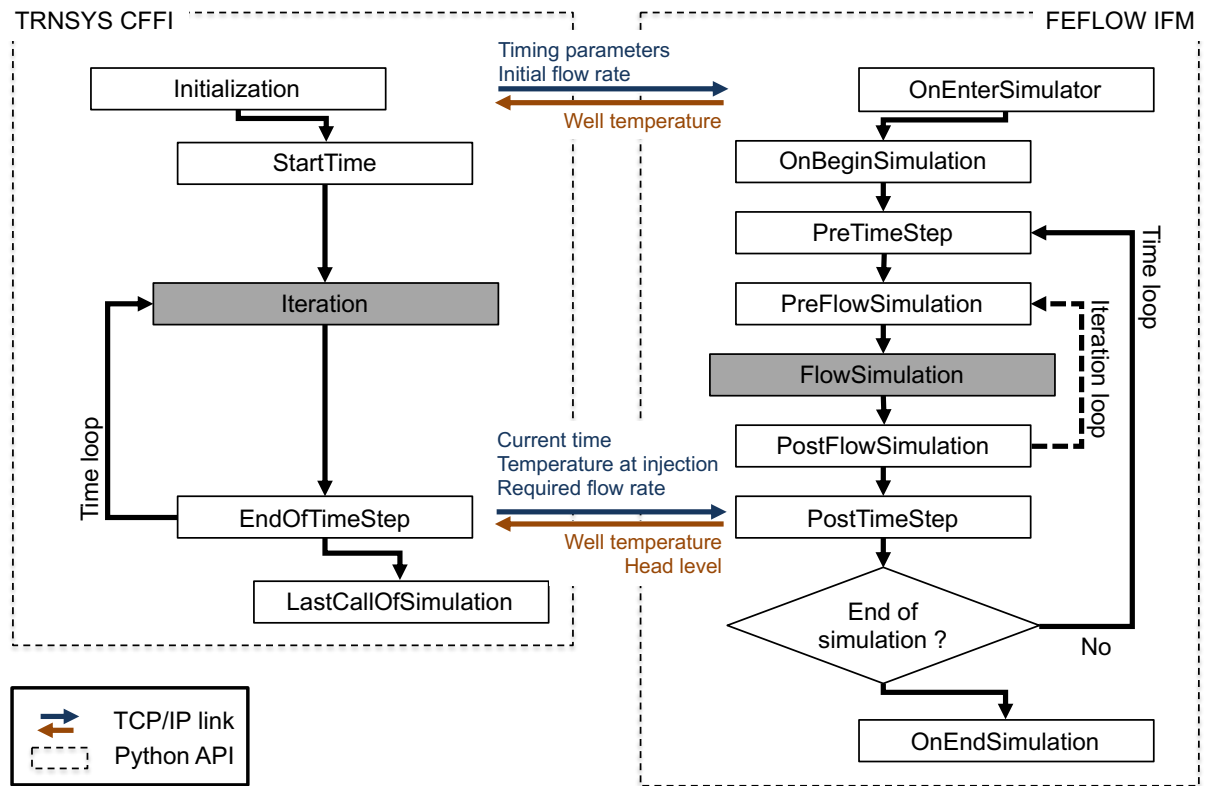


Figure 8: Architecture du couplage TRNSYS–FEFLOW. À chaque itération de calcul, TRNSYS envoie à FEFLOW les paramètres temporels, la température d'injection et le débit requis ; FEFLOW exécute ensuite un pas de simulation et renvoie à TRNSYS la température du puits et le niveau piézométrique correspondant. Ce mécanisme assure la synchronisation temporelle et le contrôle externe du solveur FEFLOW par TRNSYS. Adapté de [46]

2.4. Résultats préliminaires

2.4.1. Impact de l'évolution climatique sur les besoins de chaleur

Des courbes de besoins horaire pour le chaud et le froid ont été réalisées pour les 45 types de locaux SIA selon la méthode décrite à la section 2.1.2. Celles-ci s'étendent jusqu'en 2099 et prennent en compte l'incertitude estimée du scénario d'évolution climatique RCP 8.5 du projet CH2018. Ces courbes mettent en évidence une baisse jusqu'à 30 % des besoins en chauffage (voir Figure 9) d'ici la fin du siècle pour le logement collectif et une nette augmentation des besoins de froid. Pour des bâtiments neufs s'approchant des valeurs standard ou cible SIA, les besoins de froid pourraient même dépasser les besoins de chaud, hors ECS, en puissance et énergie annuelle.

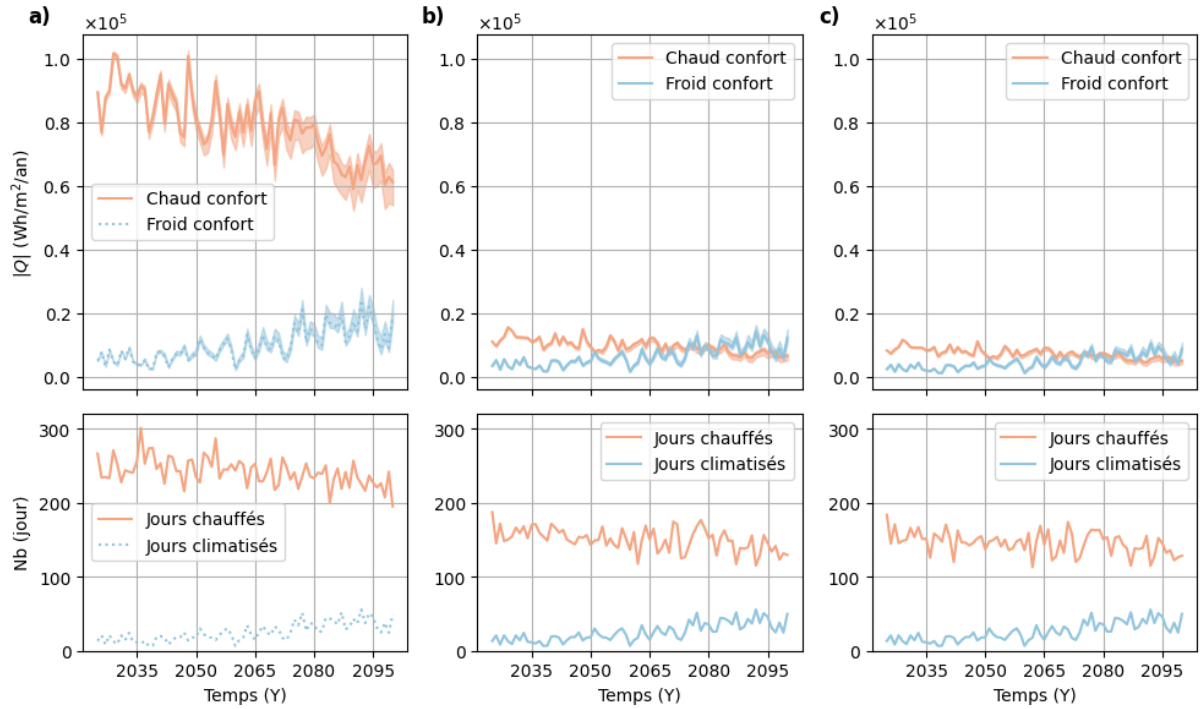


Figure 9 : Exemple d'évolution des besoins annuels de chaleur confort et du nombre de jours couverts par les prestations de chaud et de froid jusqu'en 2099 pour du logement collectif a) existant b) standard c) cible, sur la base des données de CH2018 à Genève-Cointrin. Les zones remplies correspondent à la propagation des incertitudes sur les données climatiques.

2.4.2. Validation des courbes de besoins thermiques

Les profils de chaleur confort par type de local sont tous comparés en puissance et énergie aux valeurs de la SIA 2024 pour l'année de référence 2035. Les écarts relatifs observés ne dépassent pas 3% pour les valeurs de puissance et 5% pour les valeurs d'énergie ce que nous jugeons acceptable pour des valeurs en phase d'étude de projet. Afin de confronter ces profils avec des mesures de consommations réelles, ceux-ci sont comparés à quatre parcs du canton de Genève ayant fait l'objet de campagnes de mesure dans le cadre de projets antérieurs. Pour ces parcs, les affectations selon les catégories SIA sont connues et les puissances par prestation ont été relevées à un pas horaire.

Pour ces comparaisons, on applique un filtre temporel exponentiel (voir équation Eq 5) sur les profils de chaud confort générés afin de prendre en compte la dynamique des émetteurs de chauffage et sa régulation. Ceci permet de faire correspondre les valeurs mesurées en amont des ballons tampons du système hydraulique avec les profils de demande calculés au niveau des locaux.

$$\Phi_{H/C,t}^* = \exp\left(-\frac{1}{\tau_{\text{sys}}}\right) \Phi_{H/C,t-1}^* + \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\tau_{\text{sys}}}\right)\right) \Phi_{H/C,t} \quad \text{Eq 5}$$

où la constante de temps τ_{sys} du système énergétique est fixée à 2 h pour l'existant (dominance de radiateur muraux) et à 10 h pour les valeurs standard et cible (chauffage au sol).

La Figure 10 illustre un exemple de comparaison pour les bâtiments alimentés au gaz du canton de Genève. Ces représentations permettent d'identifier un léger déphasage entre les périodes d'arrêt et de redémarrage du chauffage : le profil calculé suggère un arrêt de la prestation de chaleur de confort plus rapide que celui observé dans les mesures, et un redémarrage plus simultané. La table récapitulative confirme néanmoins la cohérence globale des estimations de puissance et d'énergie. Les figures



correspondantes pour les trois autres comparaisons sont présentées en annexe. Dans l'ensemble, ces analyses permettent de valider, tant qualitativement que quantitativement, le bon comportement des profils générés pour les besoins de chaleur de confort dans le cadre de ce projet.

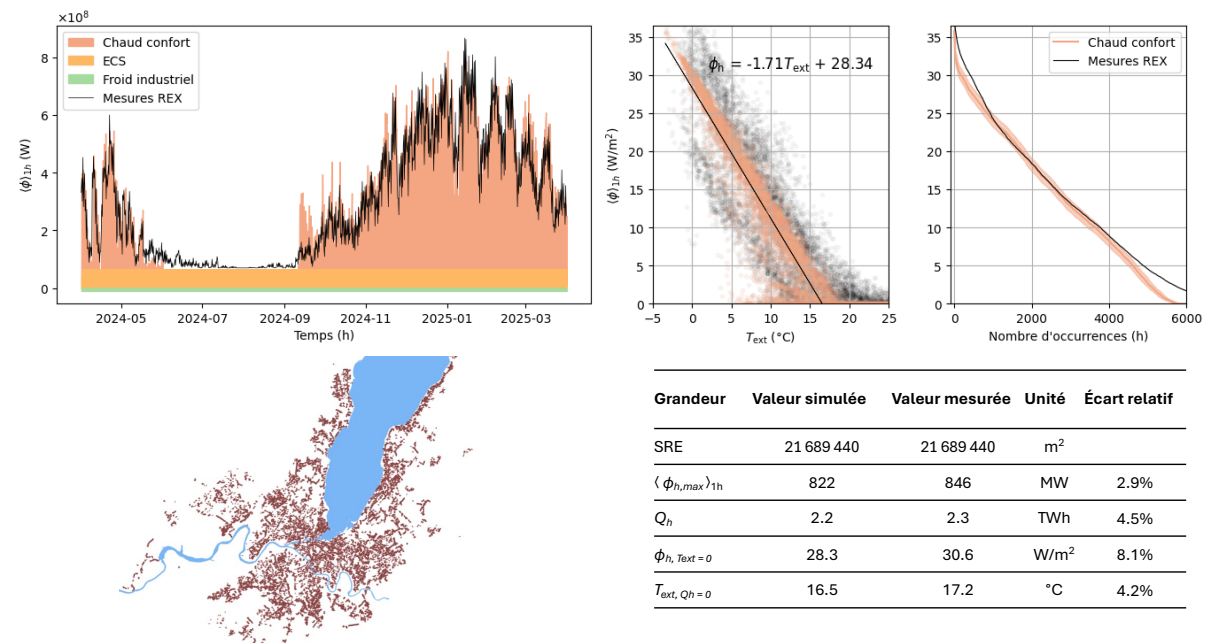


Figure 10 : Comparaison entre le profil 100 % existant SIA calculé pour les besoins de chauffage de l'ensemble des bâtiments alimentés au gaz par les SIG et les mesures fournies par SIG pour un an. On présente la superposition des profils horaires (haut à gauche), les signatures énergétiques (haut au centre), les courbes de puissances classées (haut à droite), une cartographie des bâtiments concernés (bas à gauche) et une table récapitulative (bas à droite). La zone remplie de la courbe de puissance classée correspond à la propagation de la différence de température au sol entre les stations de Genève-Cointrin et de Genève-Battelle.

2.4.3. Cosimulation

Le couplage entre l'environnement de simulation du système énergétique TRNSYS et l'environnement de simulation de l'écoulement des nappes phréatiques FEFLOW est fonctionnel. A titre d'exemple, la Figure 11 illustre 12 ans de propagation des panaches de chaleur d'un quartier de logements collectifs avec une SRE de 20'000 m² et des besoins de chaud et de froid (ID parc A03) sur une nappe alluviale. Ici l'implantation du doublet géothermique est perpendiculaire à l'écoulement et les puits sont séparés de 100 m. On observe l'alternance saisonnière entre les puits chauds (haut) et froids (bas) pilotée par la stratégie de circulation du doublet dans TRNSYS avec le déplacement de bulles chaudes et froides dans le sens d'écoulement naturel de la nappe.

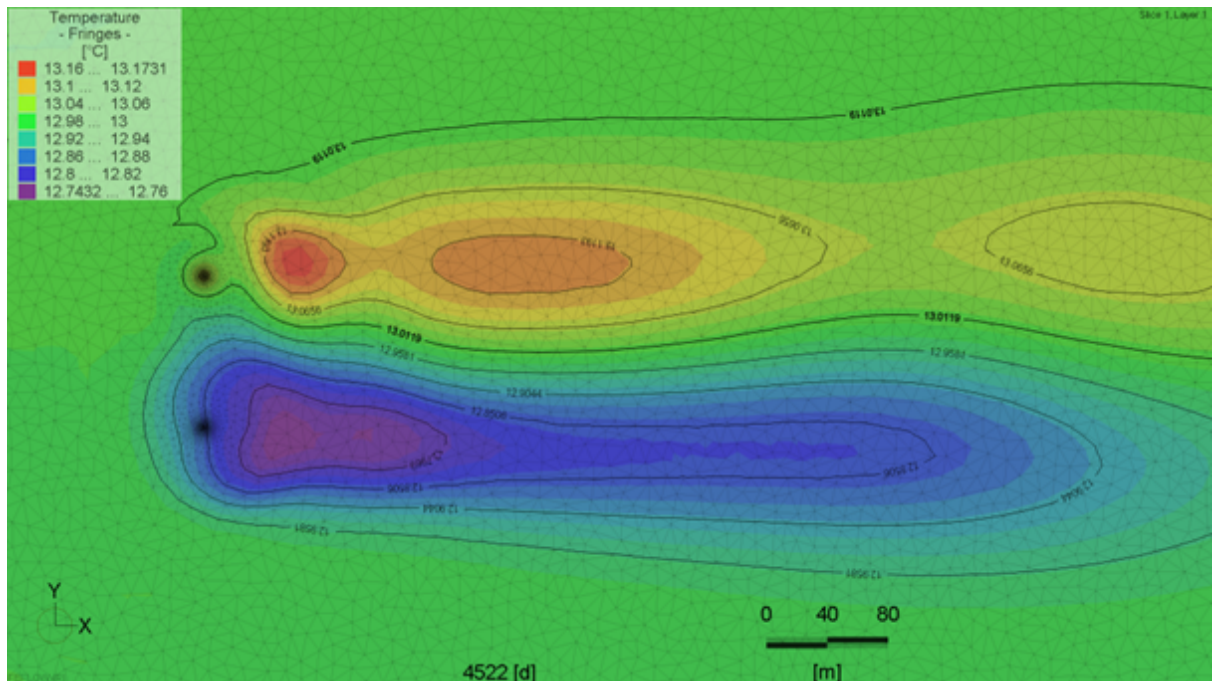


Figure 11 : Exemple de propagation des panaches thermiques pour un doublet perpendiculaire à l'écoulement et avec une stratégie d'exploitation séparant les puits chaud et froid.

2.4.4. Portage de PILESIM vers TRNSYS 18

Le code des deux TYPES TRNSBM et TRNVDSTP, développés pour TRNSYS 16, ont été mis à jour pour fonctionner avec la dernière version de TRNSYS (version 18). Ceci a permis ensuite de mettre à jour le DECK TRNSYS utilisé pour générer PILESIM dans la version 18 de TRNSYS. Ceci permettra également de porter PILEHX dans la version 18 de TRNSYS, et donc de pouvoir réaliser des améliorations du modèle.

2.4.5. Modélisation des « nappes types »

L'inventaire des nappes exploitées en Suisse pour la géothermie basse enthalpie a permis d'établir une carte de synthèse des nappes en roches meubles sur l'ensemble du territoire, identifiant ainsi les sites potentiels d'application de ce projet (Figure 12).

Il en ressort que les principales nappes exploitées ou exploitables sont de type alluvial, c'est-à-dire des eaux souterraines contenues dans des formations meubles et perméables. Ces aquifères alluviaux sont généralement composés de graviers et de sables, avec une matrice limoneuse plus ou moins présente.

La qualité variable des données hydrogéologiques disponibles ne permet pas de fournir des paramètres précis à l'échelle nationale, mais cette approche offre néanmoins un aperçu utile du potentiel d'application de la méthode.

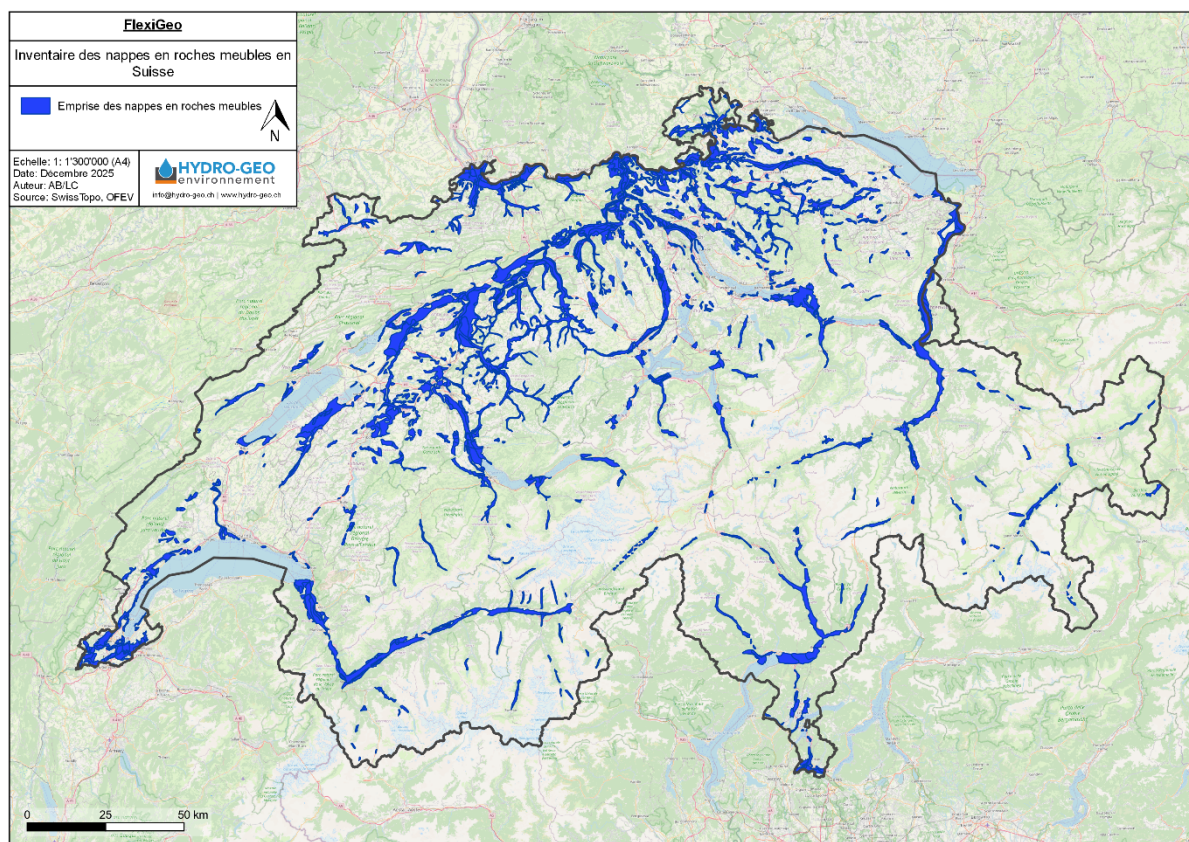


Figure 12 : Recensement des emprises des nappes : zones potentielles d'application du projet.

Les principales familles de nappes ont été regroupées en cinq catégories, dont les principaux paramètres hydrogéologiques et thermiques ont été synthétisés et sont disponibles en Annexe Tableau 1 : Synthèse des paramètres hydrogéologiques et thermiques par type de nappe.

Ces données servent de base à l'élaboration des modèles hydrogéologiques simplifiés sous FEFLOW (voir section 2.3).

3 Conclusions et perspectives

En conclusion, les travaux réalisés jusqu'ici confirment l'impact structurant de l'évolution climatique sur les besoins thermiques du parc bâti suisse, avec une diminution progressive des consommations de chauffage et une augmentation potentiellement marquée des besoins de refroidissement à l'horizon de la fin du siècle. Le cadre méthodologique développé permet de représenter finement ces évolutions et de les intégrer dans la simulation dynamique des systèmes énergétiques.

La mise en œuvre d'une simulation couplée entre TRNSYS et FEFLOW constitue un apport méthodologique central du projet. Elle permet d'analyser de manière cohérente le fonctionnement des systèmes énergétiques, la disponibilité et la réponse thermique des ressources géothermiques et aérothermiques, ainsi que l'impact des stratégies d'exploitation sur le long terme. L'intégration des aéro-convecteurs, utilisés à la fois comme source thermique alternative et comme levier de recharge ou de délestage saisonnier de la ressource géothermique promet de renforcer la flexibilité opérationnelle du système et sa robustesse face aux incertitudes climatiques et de demande.

Enfin, la représentation synthétique des propriétés hydrogéologiques du plateau suisse, à travers une typologie de nappes « types » et des modèles hydrogéologiques simplifiés, fournit un cadre



généralisable pour l'évaluation du potentiel géothermique de basse enthalpie à l'échelle nationale. Cette approche facilite la transposition des résultats vers des cas concrets de dimensionnement et devrait constituer un outil pertinent pour la planification énergétique et territoriale intégrant les contraintes du sous-sol.

Les prochaines étapes du projet sont :

- Finaliser schémas hydrauliques dans TRNSys – en cours
- Définir un parc bâti avec froid prédominant
- Obtenir points de fonctionnement module aéro – en cours avec CTA
- Définir/tester stratégies de contrôle
- Analyse de sensibilité
- Analyse comparative
- Extraire pistes de dimensionnement
- Dissemination

4 Coopération nationale et internationale

Nous remercions la coopération active de l'Office cantonal de l'énergie ainsi que du Service de géologie, sols et déchets de l'Office cantonal de l'environnement du canton de Genève. Les quelques échanges thématiques et transferts de données relatives à la consommation de bâtiments ou à l'exploitation de doublets géothermiques favorise l'accroche terrain et la paramétrisation des simulations réalisées dans le cadre de ce projet.

5 Publications et autres communications

6 Bibliographie

- [1] « Potentiel géothermie », Géothermie-Suisse. Consulté le: 20 novembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://geothermie-schweiz.ch/potenzial/>
- [2] K. Link, « Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz ». Geo-Future GmbH für Energie Schweiz, 2025.
- [3] K. Huchtenmann et D. Müller, « Evaluation of a Field Test with Retrofit Heat Pumps », *Building and Environment*, vol. 53, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.02.016.
- [4] M. Erb, P. Hubacher, et M. Ehrbar, « Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen 1996–2003 », FAWA / Bundesamt für Energie (BFE), Suisse, 2004. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fws.ch/wp-content/uploads/2018/06/FAWA_Schlussbericht.pdf
- [5] P. Hollmüller, B. M. Lachal, et D. Pahud, « Rafrâichissement par géocooling : bases pour un manuel de dimensionnement », Université de Genève / CUEPE, 2005. [En ligne]. Disponible sur: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:22561>
- [6] D. Pahud, « Haute densité de sondes géothermiques. Calcul des effets à long terme d'installations géothermiques dans un quartier », SuisseEnergie / Office fédéral de l'énergie, Bern, 2017.



- [7] I. Bosshard, D. Philippen, I. für S. OST, et I. für E. IET, « OptiPower – Untersuchung der optimalen Auslegung der Leistung von Heiz- und Kühlsystemen für Wohn- und Verwaltungsgebäude », Bundesamt für Energie (BFE), Suisse / OST – Institut für Solartechnik SPF, 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=48242>
- [8] F. De Oliveira Filho, L. Guglielmetti, L. Quiquerez, et P. Hollmüller, « UTES and its integration in the heating system: defining optimal design and operational strategies for the Geneva case », Université de Genève, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:154605>
- [9] MeteoSwiss et ETH Zurich, « Climate CH2025 - Scientific Report », Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Zurich, 2025.
- [10] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), « Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment », SIA, Cahier technique SIA 2024, 2021.
- [11] A. M. Fischer *et al.*, « Climate Scenarios for Switzerland CH2018 – Approach and Implications », *Climate Services*, vol. 26, p. 100288, avr. 2022, doi: 10.1016/j.cliser.2022.100288.
- [12] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), « Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment », SIA, Cahier technique SIA 2028, 2010.
- [13] T. Stocker et D. Wuebbles, « Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Abstract for decision-makers; Changements climatiques 2013. Les elements scientifiques. Contribution du groupe de travail I au cinquieme rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du CLIMAT - Resume a l'intention des decideurs ». octobre 2013.
- [14] P. Bacher et H. Madsen, « Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings », *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 7, p. 1511-1522, juill. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.02.005.
- [15] N. C. for C. Services (NCCS), « CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland: Technical Report », NCCS, Zurich, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisse.html>
- [16] Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), « Besoins de chaleur pour le chauffage », SIA, Norme SIA 380/1, 2016.
- [17] L. Quiquerez, « Analyse comparative des consommations de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire estimées à partir de relevés mensuels: Etude sur un échantillon de bâtiments résidentiels collectifs alimentés par un réseau de chaleur à Genève », 2017.
- [18] S. A. Callegari et others, « La Fontenette – « Les Auréa » : Analyse technique et sociale d'un complexe d'immeubles HBM de haut standard énergétique, équipé d'une PAC centralisée sur eaux usées », Université de Genève, Genève, Suisse, 2021.
- [19] P. Daniel, M. Emile, J. Xavier, et D. Josquin, « Recharge saisonnière de sondes géothermiques », sept. 2022, doi: 10.5281/zenodo.7085269.
- [20] S. T. W. Beernink, M. Bloemendal, R. Kleinlugtenbelt, et N. Hartog, « Maximizing the use of aquifer thermal energy storage systems in urban areas: effects on individual system primary energy use and overall GHG emissions », *Applied Energy*, vol. 311, p. 118587, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118587.
- [21] D. Pahud, « PILEHX2, Ground Heat System Simulation with Air Coil », *Internal software, ISAAC – DACD – SUPSI, Switzerland*, 2014.
- [22] G. Hellström, « Duct ground heat storage model, manual for computer code », *Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden*, vol. 915, 1989.
- [23] P. Eskilson, « Superposition borehole model: manual for computer code », *Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden*, 1986.
- [24] D. Pahud et G. Hellström, « The New Duct Ground Heat Model for TRNSYS. », *Eurotherm, Physical Models for Thermal Energy Stores*, p. 127-136, 1996.
- [25] D. Pahud, A. Fromentin, et J.-C. Hadorn, « The superposition borehole model for TRNSYS (TRNSBM). User Manual for the November 1996 version », *Internal Report. LASSEN - DGC- EPFL, Switzerland*, 1996.
- [26] D. Pahud, « Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin (GE). Rapport final. », *GAP et CUEPE, Université de Genève*, 1993.
- [27] D. Pahud, « Serso, stockage saisonnier solaire pour le dégivrage d'un pont », *Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Berne, Suisse*, 2007.
- [28] D. Pahud et B. Lachal, « Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur couplée sur des sondes géothermiques à Lugano (TI) », *Rapport final, Office Fédéral de l'Energie, Berne, Suisse*, 2005.
- [29] D. Pahud, « Simulations de champs ewspilehx sondes géothermiques mesurés », *LESBAT, HEIG-VD, HES-SO, Berne, Suisse, Rapport final*, 2015.



- [30] D. Pahud, « The Superposition Borehole Model for TRNSYS 16 or 17 (TRNSBM). User manual for the April 2012 version », *Internal Report. ISAAC - DACD- SUPSI, Switzerland*, 2012.
- [31] Blocon, « Earth Energy Designer version 4 ». 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.buildingphysics.com/manuals/EED4.pdf>
- [32] A. Huber, *EWS - Erdwärmesonden*. (2022). Huber Energietechnik AG. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hetag.ch/ews.html>
- [33] D. Pahud, A. Fromentin, et J. Hadorn, « The duct ground heat storage model (dst) for trnsys used for the simulation of heat exchanger piles. user manual, december 1996 version », *Internal Report. LASSEN-DGC-EPFL, Switzerland*, 1996.
- [34] D. Pahud, « PILESIM2: simulation tool for heating/cooling systems with energy piles or multiple borehole heat exchangers », *ISAAC – DACD – SUPSI, Switzerland*, 2007.
- [35] R. Philipp, « Carte hydrogéologique de la Suisse : vulnérabilité des réservoirs aquifères », Wabern, 2008.
- [36] Groupe de travail PGG, « Evaluation du potentiel géothermique du canton de Genève », 2011.
- [37] R. Sonney, P. Ornstein, M. Arnoux, et P. Christe, « Cartographie de la piézométrie à l'échelle de la vallée du Rhône entre Brig et le Léman », *Aqua & Gas*, 2021.
- [38] Groupement PGF, « Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg », 2005.
- [39] Groupement PGV, « Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud », 2003.
- [40] Groupe de travail PGN, « Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel », 2008.
- [41] Geotest SA, « Jeu de géodonnées «potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse» », 2024.
- [42] S. A. Klein *et al.*, *TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program*. (2017). Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA. [En ligne]. Disponible sur: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- [43] D. Pahud et A. Fromentin, « PILESIM, un outil de simulation dynamique d'installations avec pieux échangeurs ou sondes géothermiques », 1999.
- [44] M. G. Trefry et C. Muffels, « FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool », *Groundwater*, vol. 45, n° 5, p. 525-528, sept. 2007, doi: 10.1111/j.1745-6584.2007.00358.x.
- [45] H.-J. G. Diersch, *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-38739-5.
- [46] B. P. Becker et H. Schüttrumpf, « An OpenMI module for the groundwater flow simulation programme Feflow », *Journal of Hydroinformatics*, vol. 13, n° 1, p. 1-12, janv. 2011, doi: 10.2166/hydro.2010.039.
- [47] J. Meiers et G. Frey, « Interfacing TRNSYS with MATLAB for Building Energy System Optimization », *Energies*, vol. 18, n° 2, p. 255, janv. 2025, doi: 10.3390/en18020255.
- [48] N. Bernier, B. Marcotte, et M. Kummert, *Calling Python from TRNSYS with CFFI*. (11 avril 2022). Zenodo. doi: 10.5281/ZENODO.6523078.



7 Annexe

Tableau 1 : Synthèse des paramètres hydrogéologiques et thermiques par type de nappe

				Nappe libre Gradient < 2 ‰ Épaisseur saturée > 10 m			Nappe libre Gradient > 2 ‰ Épaisseur saturée > 10 m			Nappe libre Gradient < 2 ‰ Épaisseur < 10 m			Nappe libre Gradient > 2 ‰ Épaisseur < 10 m			Nappe captive		
		variable	Unité	Valeur par Défaut	Min	Max	Valeur par Défaut	Min	Max	Valeur par Défaut	Min	Max	Valeur par Défaut	Min	Max	Valeur par Défaut	Min	Max
Paramètres Géométriques et Spatiaux	Profondeur de la nappe	z_nappe	m	30	5	70	30	5	70	5	2	10	5	2	10	30	5	70
	Épaisseur saturée	e_sat	m	30	10	70	30	10	70	5	2	10	5	2	10	5	2	20
Paramètres Hydrauliques	Conductivité hydraulique	K	m/s	3.00E-03	1.00E-05	5.00E-02	3.00E-03	1.00E-05	5.00E-02	8.00E-04	2.00E-04	5.00E-02	8.00E-04	2.00E-04	5.00E-02	8.00E-04	2.00E-04	5.00E-02
	Transmissivité	T_hydr	m ² /s	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K	e_sat*K
	Coefficient d'emmagasinement spécifique	Ss	1/m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0015/e_sat	1.00E-06	1.00E-03
	Porosité	η	-	0.20	0.10	0.25	0.20	0.10	0.25	0.20	0.1	0.25	0.20	0.1	0.25	0.20	0.1	0.25
	Gradient hydraulique	i	‰	1.00	0.50	2.00	3.00	2.00	10.00	1.00	0.50	2.00	3.00	2.00	10.00	1.00	0.50	5.00
Condition limite hydraulique	Distance puits de pompage - puits de rejet	d	m															
	Débit pompage	Q	L/min	TRNSYS			TRNSYS			TRNSYS			TRNSYS			TRNSYS		
	Débit pompage maximal*	Q_max_SIA	L/min	3000.00	20**	>3000***	3000.00	20**	>3000***	300.00	-	1000***	300.00	-	1000***			
	Potentiel imposé amont	H_amont	m	e_sat			e_sat			e_sat			e_sat			e_sat		
	Potentiel imposé aval	H_aval	m	H_amont-i*1000			H_amont-i*1000			H_amont-i*1000			H_amont-i*1000			H_amont-i*1000		
Paramètres thermique	Conductivité thermique solide	λ	W/m/K	3	-	-	3	-	-	3	-	-	3	-	-	3	-	-
	Capacité thermique volumique solide	ρCp	MJ/m ³ /K	2.52	-	-	2.52	-	-	2.52	-	-	2.52	-	-	2.52	-	-
	Température initiale	T_0	°C	13	-	-	13	-	-	13	-	-	13	-	-	13	-	-
	Dispersivité longitudinale	a_L	m	d/10	d/20	d	d/10	d/20	d	d/10	d/20	d	d/10	d/20	d	d/10	d/20	d
	Dispersivité transversale	a_T	m	aL/5	aL/10	aL	aL/5	aL/10	aL	aL/5	aL/10	aL	aL/5	aL/10	aL	aL/5	aL/10	aL

* Le calcul du débit maximal est effectué avec la norme SIA 384/7 (Utilisation de la chaleur de l'eau souterraine) pour un aquifère uniforme et isotrope équipé d'un puits en diamètre 10 '' (254 mm) avec un tube PVC crépine de fente de 1 mm (pourcentage d'ouverture 9 %) sur l'épaisseur saturée. Les critères vérifiés sont le débit admissible, les vitesses d'écoulement dans les crépines et un rabattement maximal.

Le code Feflow vérifie le rabattement dans les puits.

** Valeur obtenue avec la configuration hypothétique la plus défavorable

*** Valeur obtenue avec la configuration hypothétique la plus favorable



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des
transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech

