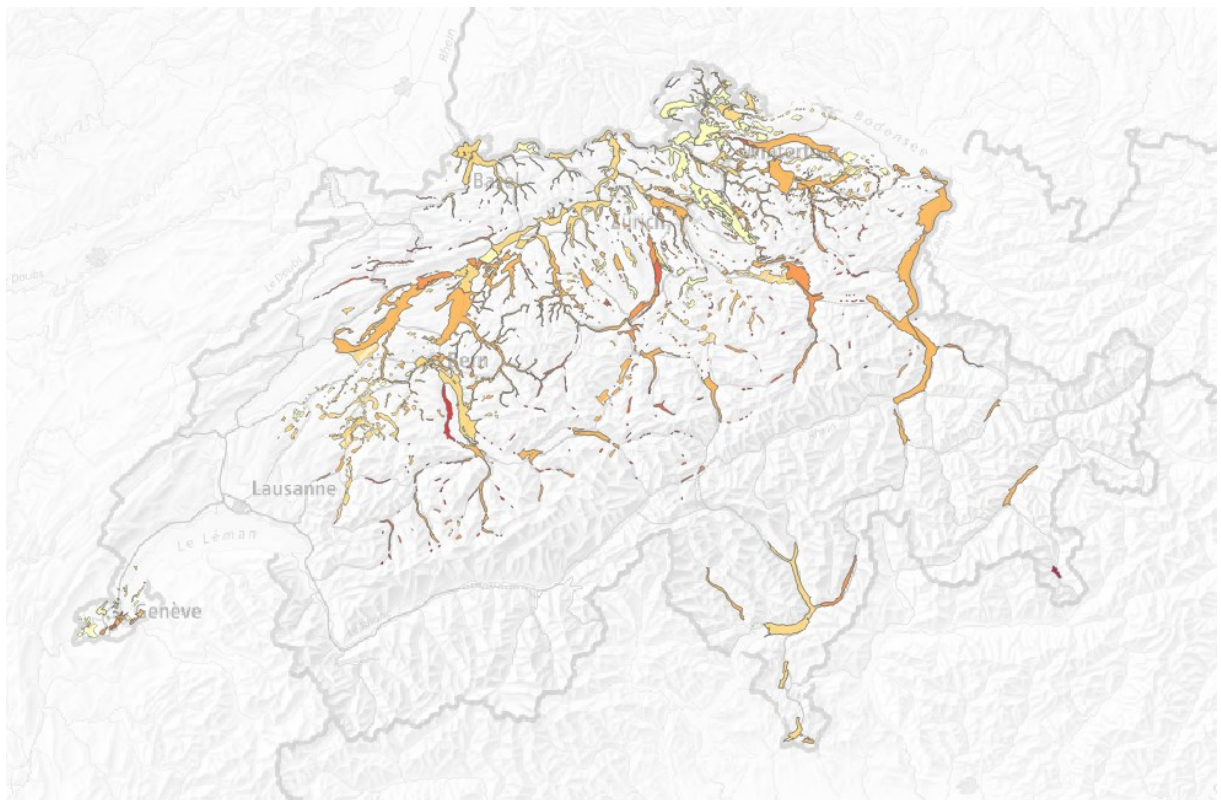




Rapport du 26 avril 2024

Jeu de géodonnées «potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse»

Rapport final



Source: GEOTEST SA 2024

GEOTEST

Nachhaltig mehr Sicherheit.

Date: 26 avril 2024

Lieu: Zollikofen

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Mandataire:

Geotest SA
Bernstrasse 165, CH-3052 Zollikofen
www.geotest.ch

Auteur(s):

Vincent Badoux, Geotest SA, vincent.badoux@geotest.ch
Emanuel Huber, Geotest SA, emanuel.huber@geotest.ch
Flavia Hänsli, Geotest SA, flavia.haensli@geotest.ch (chap. 3)

Responsable de programme de l'OFEN: Laura Antonini, Laura.Antonini@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SH/8100380-01-01-31

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

Office fédéral de l'énergie OFEN

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen ; adresse postale : Office fédéral de l'énergie OFEN, CH-3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Table des matières

Table des matières	3
Liste des abréviations	4
1 Introduction	5
1.1 Contexte et problématique	5
1.2 Mandat et objectifs	5
1.3 Définition et champ d'application	5
2 Méthodologie	8
3 Acquisition des données	9
3.1 Procédure d'acquisition des données	9
3.2 Analyse des sites Internet et des géoportails	9
3.3 Questionnaire en ligne	9
3.4 Disponibilité des données	9
3.5 Modèles des eaux souterraines	10
3.6 Prescriptions cantonales relatives au refroidissement par les eaux souterraines	11
4 Réalisation du jeu de géodonnées «potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse»	13
4.1 Procédure	13
4.2 Approche basée sur le volume	13
4.3 Approche basée sur le bilan thermique	14
5 Validation	17
5.1 Comparaison avec un modèle thermique des eaux souterraines	17
5.2 Comparaison avec des études portant sur le potentiel (canton de Saint-Gall)	18
5.3 Potentiel total pour la Suisse	19
6 Modèle de géodonnées et modèle de représentation	20
7 Recommandations concernant les jeux de géodonnées relatifs aux eaux souterraines	20
8 Conclusion	21
Bibliographie	23

Liste des abréviations

A_o	ruissellement de surface (m^3/s)
a	épaisseur de la nappe souterraine (m)
c_w	capacité thermique spécifique de l'eau ($J/(kg \cdot K)$)
ΔT	écart de température (K)
E	énergie thermique (J)
EP	évapotranspiration (mm/a)
F_{EG}	surface du bassin versant (m^2)
F_{GW}	surface de l'aquifère considéré (m^2)
f_N	coefficient d'infiltration
q_{Geo}	densité de flux thermique (W/m^2)
J	flux thermique convectif (W)
J_A	flux thermique conductif provenant de l'atmosphère (W)
J_{Geo}	flux thermique conductif provenant de la croûte terrestre (flux géothermique) (W)
J_Z	flux thermique convectif provenant des apports souterrains (W)
L	épaisseur (m)
λ	conductivité thermique ($W/(m \cdot K)$)
λ_u	conductivité thermique de la zone non saturée ($W/(m \cdot K)$)
N	précipitations
n	porosité de l'aquifère (-)
ρ_w	densité de l'eau (kg/m^3)
V	volume de l'aquifère saturé (m^3)
WFS	Web Feature Service
WMS	Web Map Service

1 Introduction

1.1 Contexte et problématique

En Suisse, les eaux souterraines qui se trouvent dans les roches meubles jouent un rôle majeur non seulement en tant que ressource naturelle d'eau potable, mais également pour diverses autres utilisations, notamment la production de chaleur. Avec un volume de plus de 10 km³, les aquifères en roche meuble sont des réservoirs d'eau souterraine importants (Sinreich, et al., 2012). L'eau souterraine contient une quantité considérable d'énergie thermique qui peut être exploitée comme source potentielle pour des systèmes de chauffage et de stockage durables. Il s'agit d'un potentiel prometteur pour remplacer les systèmes de chauffage traditionnels basés sur les combustibles fossiles et contribuer ainsi de manière significative à la protection du climat et à la transition énergétique.

L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a chargé GEOTEST SA de déterminer le potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse et d'élaborer un jeu de géodonnées correspondant.

1.2 Mandat et objectifs

- Récapitulatif de la disponibilité des données hydrogéologiques par canton - à partir d'une enquête menée à ce sujet auprès des cantons
- Collecte des géodonnées cantonales, y compris les données hydrogéologiques déjà disponibles
- Commentaire sur la disponibilité des jeux de données hydrogéologiques concernant les aquifères en roche meuble de Suisse (mise en œuvre des MGD ID 139.2-141.1, ID 139.1 et ID 130.1, 131.1, 132.1)
- Perfectionnement d'une méthodologie existante pour le calcul du potentiel d'utilisation de la chaleur (Stauffer, 2013)
- Détermination du potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse
- Création d'un produit de géodonnées spécifique au potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse, contenant un modèle de géodonnées ainsi que des géodonnées conformes au modèle
- Documentation et recommandations pour la suite des travaux

1.3 Définition et champ d'application

Les potentiels des agents énergétiques et des technologies fixent d'importantes limites au système énergétique. Étant donné qu'il existe plusieurs notions de potentiel, il convient de les clarifier au préalable pour chaque application. Dans la présente étude, le potentiel d'utilisation de la chaleur est défini en termes de puissance (en kW) ou d'énergie disponible (en kWh, ressources). Le potentiel

écologique désigne les ressources utilisables de manière durable avec la technologie disponible. En ce qui concerne les eaux souterraines, des aspects quantitatifs et qualitatifs entrent en ligne de compte dans ce contexte.

La présente étude évalue uniquement le potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse (en bref le potentiel), autrement dit elle ne tient pas compte des aquifères karstiques ou fissurés, bien que ceux-ci constituent des réservoirs importants et avantageux d'un point de vue thermique (Figure 1). Par manque de données disponibles, les aquifères de moyenne et de grande profondeur (à partir de 100 m de profondeur environ) ne sont pas pris en compte pour l'évaluation du potentiel.

Dans un premier temps, conformément au mandat, seule la production de chaleur à partir des eaux souterraines est considérée pour déterminer le potentiel, sans les éventuelles utilisations à des fins de refroidissement ou de stockage saisonnier de la chaleur. L'évaluation du potentiel d'utilisation de la chaleur en tenant compte de ces deux éléments nécessite en effet des simulations thermiques locales complexes qui dépassent le cadre de la présente étude.

Enfin, les installations d'exploitation existantes ainsi que les restrictions liées à la planification (p. ex. zones de protection des eaux souterraines) ne sont pas prises en compte dans le potentiel.

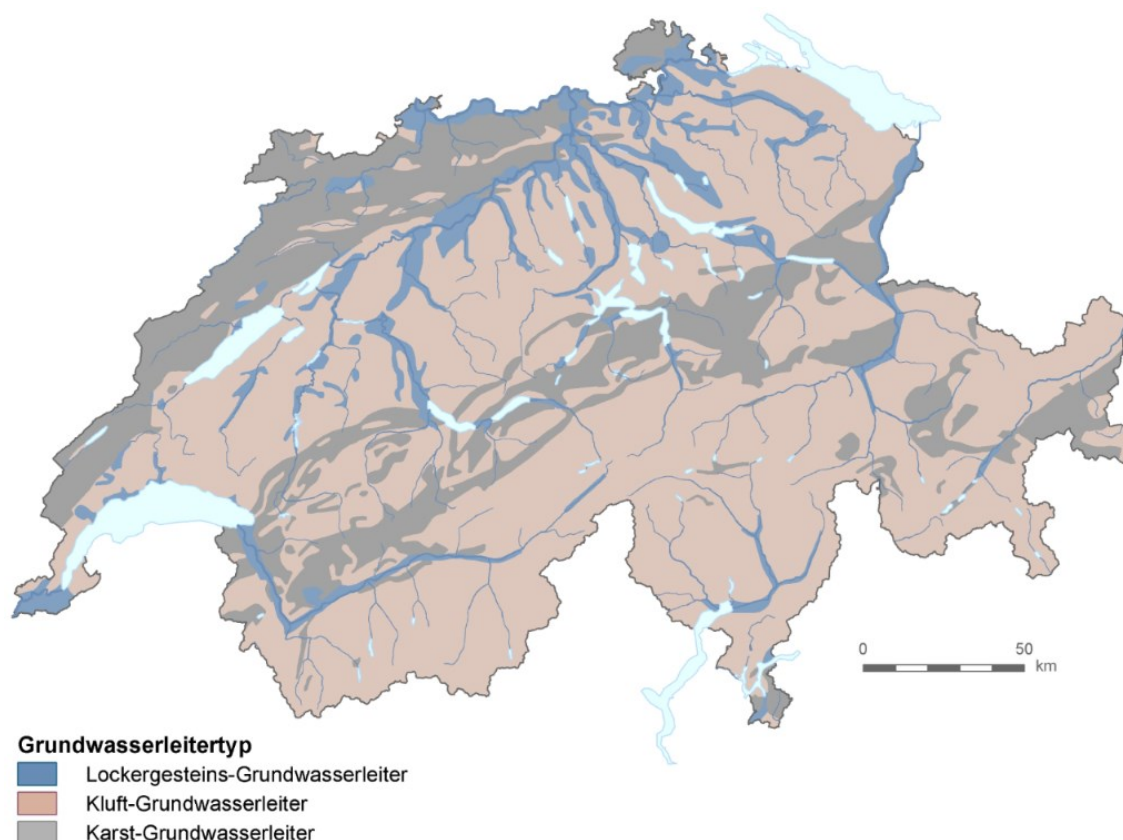


Figure 1: Types d'aquifères en Suisse

Il existe en principe deux approches pour évaluer le potentiel: l'approche basée sur le volume et celle basée sur le bilan thermique.

L'**approche basée sur le volume** consiste à déterminer la chaleur stockée dans les eaux souterraines. L'eau souterraine est considérée comme un système fermé et statique avec une quantité de chaleur finie et «épuisable».

L'**approche basée sur le bilan thermique** vise à déterminer la quantité de chaleur utilisable en effectuant un bilan thermique simplifié qui tient compte des changements à long terme. La nappe souterraine est alors considérée comme un système ouvert permettant un échange de chaleur dynamique avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère.

Le potentiel obtenu par l'approche basée sur le bilan thermique est considéré comme de la «chaleur utilisable durablement», qui correspond à un état d'équilibre où seule la régénération est exploitée.

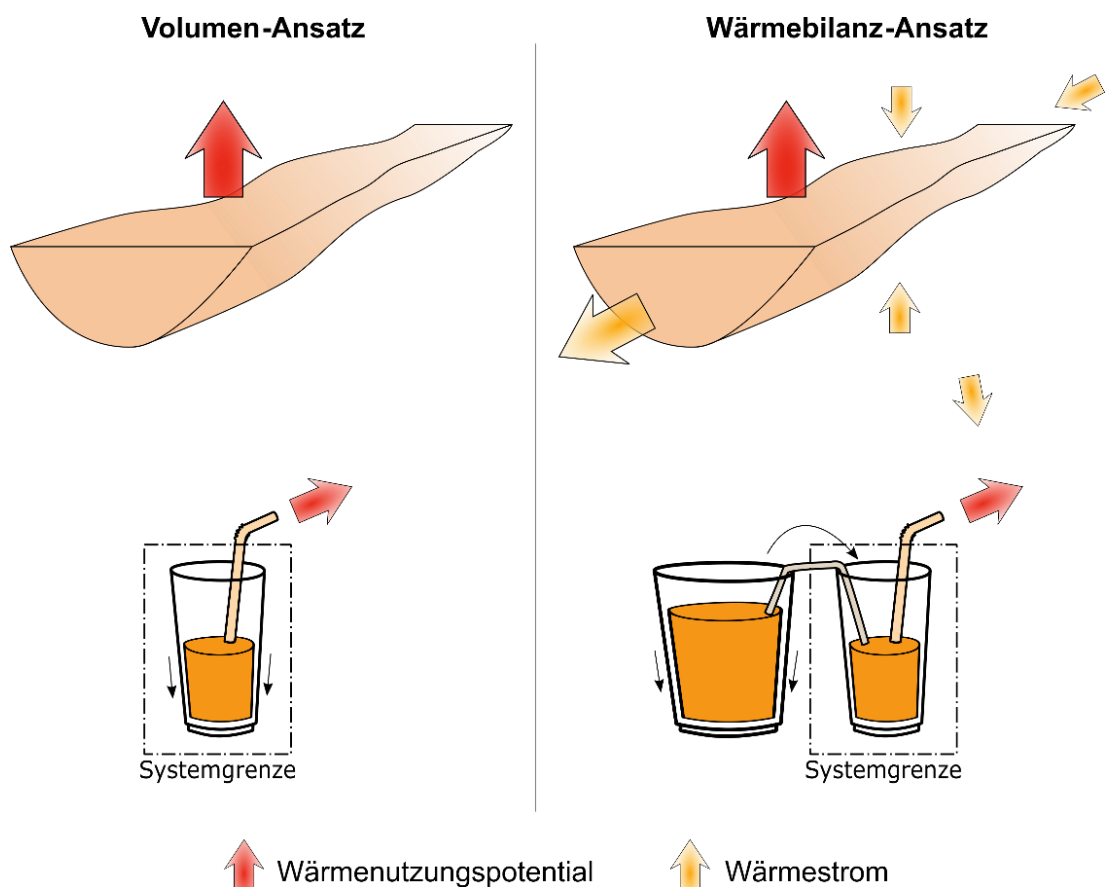


Figure 2: Représentation schématique de l'approche basée sur le volume et celle basée sur le bilan thermique

2 Méthodologie

Étant donné qu'il n'existe pas de définition uniforme du potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble ni de méthodologie uniforme en Suisse pour le calcul de ce potentiel, la première étape a consisté à développer une méthodologie, tant pour l'approche basée sur le volume que pour celle basée sur le bilan thermique.

En s'appuyant sur cette méthodologie, il s'agissait ensuite de définir les données de base (données primaires et données primaires traitées) à compiler dans le cadre de l'acquisition de données.

Cette deuxième étape a également servi à déterminer la manière dont ces données devaient être traitées en vue du calcul du potentiel en tant que produit final (p. ex. par interpolation) et les produits intermédiaires qui pouvaient être obtenus (Figure 3).

Une description complète de la méthodologie, y compris la validation, est disponible à 0.

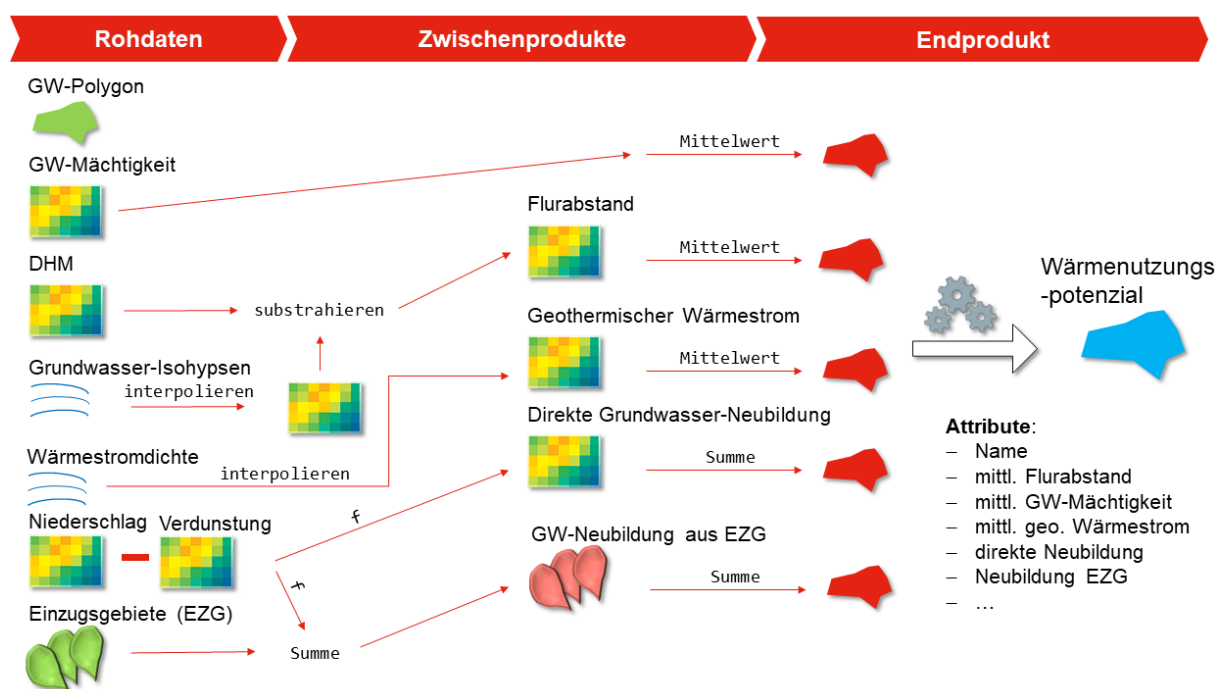


Figure 3: Processus général pour la détermination du potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse

3 Acquisition des données

3.1 Procédure d'acquisition des données

L'acquisition de données auprès des autorités cantonales, des offices fédéraux et éventuellement d'autres services (p. ex. bureaux privés, hautes écoles) est un élément central du projet. Elle a permis de déterminer quelles données de base étaient disponibles pour quelles régions et dans quelle qualité, et en quoi elles étaient utiles pour la réalisation du projet. L'évaluation a été documentée à l'aide d'une matrice de pertinence (0).

3.2 Analyse des sites Internet et des géoportails

Afin de déterminer la disponibilité des données auprès des autorités cantonales, la première étape a consisté à passer au crible les sites Internet et les géoportails des offices cantonaux. Il en ressort que chaque canton gère ses données ainsi que l'accès public à ses jeux de géodonnées de manière différente. Si certains cantons disposent de géodonnées largement diffusées, la situation est beaucoup plus rudimentaire dans d'autres cantons.

3.3 Questionnaire en ligne

Toutes les données n'étant pas forcément disponibles sur les géoportails, l'étape suivante a consisté à réaliser une enquête en ligne à l'aide de l'application web *findmind* et à organiser des entretiens bilatéraux avec les autorités cantonales concernant la disponibilité des données.

L'enquête a également servi à informer les services cantonaux chargés de l'environnement et des géodonnées sur le projet et à leur expliquer que leurs données seraient utilisées dans le cadre de ce dernier.

3.4 Disponibilité des données

Dans la présente étude, le terme «disponibilité» se réfère à la possibilité d'obtenir les géodonnées. «Géodonnées non disponibles» ne signifie pas nécessairement que les données n'existent pas, mais qu'elles ne pouvaient pas être obtenues au moment de l'acquisition. Les données hydrogéologiques au format PDF, image ou Excel ont été qualifiées de "non disponibles", car l'étude est axée sur les géodonnées.

Au vu de l'objectif du projet, la qualité des données, mais également leur disponibilité sont extrêmement pertinentes. Par exemple, si des données sont disponibles sous forme de *Web Feature Service* (WFS), elles peuvent être prises en compte à tout moment, de manière automatique et dans leur état le plus récent pour la détermination du potentiel. La plupart des données n'étaient toutefois pas disponibles en WFS, mais sous forme de *shapefiles* ou de *geodatabases*. Ces formats permettent la réutilisation des données pour des calculs, mais la mise à jour du jeu de données nécessite un nouveau téléchargement du produit. Les données peuvent également être mises à disposition en tant que couche WMS. Ce

format permet uniquement d'afficher des valeurs, lesquelles ne sont cependant pas disponibles pour une utilisation ultérieure.

La Figure 4 (A à D) présente la disponibilité des données pour les quatre principaux paramètres (nappes souterraines, épaisseur de la nappe, profondeur du niveau piézométrique et isohypses de la nappe souterraine) dans les 26 cantons (état été 2023).

En outre, des jeux de géodonnées pour des paramètres supplémentaires en lien avec les eaux souterraines ont été demandés aux cantons. Ces paramètres ne sont pas nécessaires pour la détermination du potentiel d'utilisation de la chaleur. Le

Tableau 1 montre la disponibilité des jeux de géodonnées cantonaux pour ces paramètres «secondaires».

Les retours des cantons fournissent des informations supplémentaires sur la disponibilité des données (cf.0 «Disponibilité des données par canton»).

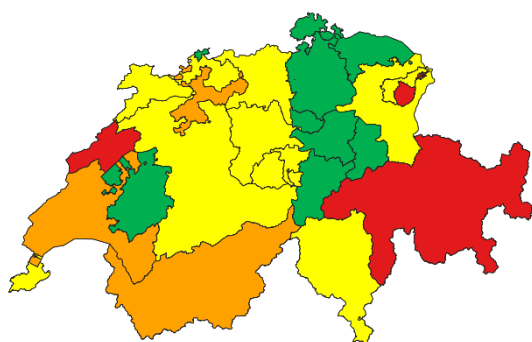
3.5 Modèles des eaux souterraines

La plupart des cantons disposent déjà de modèles numériques tridimensionnels (modèles des eaux souterraines ou modèles géologiques 3D) pour certaines masses d'eaux souterraines. Pour les besoins de la présente étude, les services cantonaux ont été consultés afin de déterminer pour quelles zones ces modèles étaient disponibles, sur quelle méthodologie ils reposaient et s'ils pouvaient être utilisés. Un résumé de la prise de position ou du retour des services cantonaux concernés est disponible à l'0.

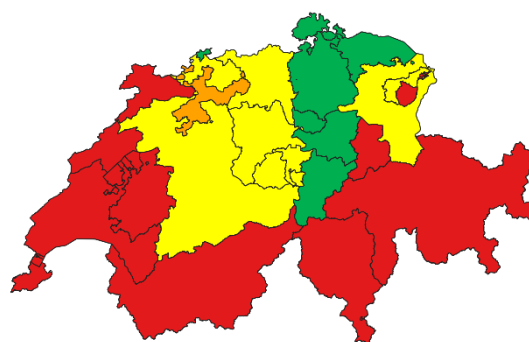
Les résultats indiquent que des modèles sont disponibles pour de nombreux aquifères de Suisse. À quelques exceptions près, ces modèles ne sont pas publics et appartiennent à des entreprises privées (p. ex. des bureaux de géologues). Ils sont très hétérogènes et la compilation des données pertinentes a été jugée très complexe et coûteuse. De plus, il a été établi que dans une première phase, ces modèles n'apporteraient que peu d'informations supplémentaires dans le cadre de l'estimation du potentiel. La décision a donc été prise de ne pas les utiliser pour évaluer le potentiel d'utilisation de la chaleur des aquifères en roche meuble de Suisse. Toutefois, s'ils étaient harmonisés, les modèles des eaux souterraines pourraient fournir des informations importantes sur la possibilité d'exploiter le potentiel thermique des principaux aquifères en roche meuble suisses.

3.6 Prescriptions cantonales relatives au refroidissement par les eaux souterraines

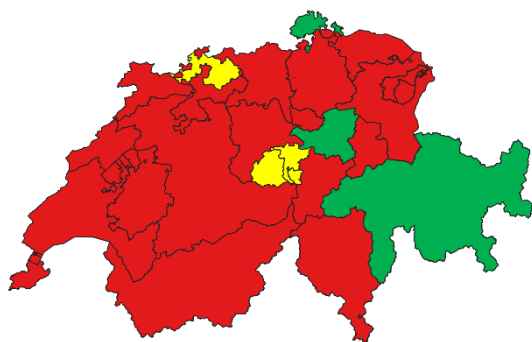
L'acquisition de données pour la présente étude a donné lieu à la collecte et à l'évaluation d'informations sur les prescriptions cantonales relatives au refroidissement par les eaux souterraines. Les résultats et les retours des services cantonaux concernés peuvent être consultés à l'0. Les résultats indiquent que la plupart des cantons disposent de prescriptions spéciales en la matière.



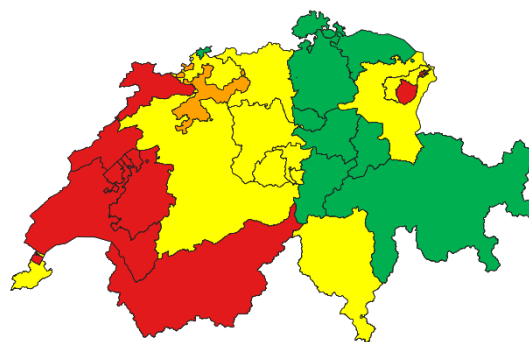
A. Nappes souterraines



B. Épaisseur de la nappe



C. Profondeur du niveau piézométrique



D. Isohypeses de la nappe souterraine

Legende

- Produkt als WFS Daten vorhanden
- Produkt als Download vorhanden (Shapefile, Geodatabase, ...)
- Produkt als WMS verfügbar
- a) Keine Daten vorhanden b) Daten nicht frei verfügbar

Figure 4: Vue d'ensemble de la disponibilité des données cantonales selon l'enquête sur les quatre principaux paramètres servant à l'évaluation du potentiel d'utilisation de la chaleur. Les catégories «Aucune donnée disponible» et «Pas de libre accès aux données» ont été réunies en raison des difficultés actuelles en matière de collecte de données au niveau intercantonal. Le jeu de géodonnées relatif au potentiel d'utilisation de la chaleur est donc considéré comme une première version du produit qui devra être développée en tenant compte des données cantonales non publiées.

Tableau 1: Vue d'ensemble de la disponibilité des jeux de géodonnées cantonales et des paramètres jouant un rôle secondaire dans l'évaluation du potentiel d'utilisation de la chaleur.

Jeu de géodonnées	WFS	Télécharge- ment	WMS	Inexistant ou non disponible
Direction d'écoulement	5	3	-	18
Vitesse d'écoulement	-	1	-	25
Conductivité hydraulique	-	1	-	25
Porosité	-	-	-	26
Valeur k ou infiltrations d'eau suite à des forages	-	-	-	26
Modèles des eaux souterraines 2D/3D (périmètre)	-	-	-	26
Modèle géologique 3D de l'aquifère en roche meuble (périmètre)	-	-	-	26
Zones de protection des eaux souterraines	12	10	2	2

4 Réalisation du jeu de géodonnées «potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse»

4.1 Procédure

Les jeux de géodonnées cantonaux publiés offrent la meilleure base possible pour la détermination du potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse. De plus, cartographier des jeux de données cantonaux et nationaux ou transférer ces données s'avère très difficile et coûteux. C'est pourquoi, dans le cadre de la présente étude, le potentiel a été déterminé dans la mesure du possible sur la base des jeux de géodonnées cantonaux. Le jeu de géodonnées relatif au potentiel d'utilisation de la chaleur a été établi par canton, à l'intérieur des frontières cantonales, afin d'éviter les incohérences en cas de nappes souterraines s'étendant sur plusieurs cantons (lorsque les géodonnées cantonales ne coïncident pas parfaitement) et de simplifier le calcul. En raison des difficultés qui subsistent pour la réalisation d'une collecte de données aussi complète que possible au niveau intercantonal, le jeu de géodonnées relatif au potentiel d'utilisation de la chaleur est considéré comme une première version du produit, qui devra idéalement être consolidée avec la participation directe des services cantonaux compétents.

4.2 Approche basée sur le volume

L'approche basée sur le volume consiste à déterminer l'énergie thermique stockée dans les eaux souterraines. L'eau souterraine est considérée comme un système fermé avec une quantité de chaleur finie et «épuisable». On suppose que l'énergie thermique est prélevée des eaux souterraines de manière généralisée jusqu'à un refroidissement de celles-ci de ΔT . L'énergie disponible équivaut à:

$$E = c_w \cdot \rho_w \cdot n \cdot V \cdot \Delta T$$

sachant que E désigne l'énergie thermique (J), c_w la capacité thermique spécifique de l'eau (J/(kg·K)), ρ_w la densité de l'eau (kg/m³), n la porosité de l'aquifère, V le volume de l'aquifère saturé (m³) et ΔT l'écart de température (K).

Le volume V (m³) est calculé à partir de l'épaisseur moyenne de la nappe a (m), multipliée par la surface F_{GW} (m²) de l'aquifère considéré:

$$V = a \cdot F_{GW}$$

Le calcul peut être effectué pour n'importe quelle partie de l'aquifère.

L'énergie thermique prélevée est disponible une seule fois (la régénération de l'énergie thermique n'est pas prise en compte). Toutefois, cette énergie peut être prélevée pendant une durée indéterminée.

4.3 Approche basée sur le bilan thermique

L'approche basée sur le bilan thermique (AF-Colenco AG, 2011) permet de déterminer la quantité de chaleur utilisable en effectuant un bilan thermique simplifié qui tient compte des changements à long terme. La nappe souterraine est alors considérée comme un système ouvert: il s'y produit un échange de chaleur avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Le potentiel d'utilisation de la chaleur calculé à l'aide de l'approche basée sur le bilan thermique est considéré comme de la **chaleur utilisable durablement**.

On suppose que la température de l'eau souterraine est en équilibre parfait avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère et que la température T_0 est identique partout. L'eau souterraine est alors refroidie de ΔT (comme dans l'approche basée sur le volume). Ce refroidissement crée un déséquilibre (c'est-à-dire un gradient de température) entre l'eau souterraine et son environnement. Le gradient de température provoque un flux thermique en direction de l'eau souterraine, qui est finalement disponible pour une utilisation de la chaleur.

Il existe principalement deux types de transferts thermiques: la convection et la conduction.

Dans le cas du flux thermique convectif ou advectif, le transport de chaleur est assuré par la recharge des nappes souterraines, qui amène dans le système de l'eau plus chaude que l'eau souterraine (infiltration de précipitations ou apports d'eau en provenance des bassins versants latéraux). Le flux thermique convectif est défini comme suit:

$$J = q \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T$$

sachant que J désigne le flux thermique convectif (W), q le débit (m^3/s), c_w la capacité thermique spécifique de l'eau ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), ρ_w la densité de l'eau (kg/m^3) et ΔT l'écart de température (K).

Dans le cas du flux thermique conductif, le transfert d'énergie thermique s'effectue par contact direct entre l'eau souterraine, l'atmosphère et la lithosphère. Le flux thermique conductif est défini comme suit (loi de Fourier):

$$J = \lambda \cdot F \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

sachant que J désigne le flux thermique convectif (W), λ la conductivité thermique du milieu ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), F la surface de contact du milieu (m^2), L l'épaisseur du milieu (m) et ΔT l'écart de température (K). $\frac{\Delta T}{L}$ correspond au gradient de température (K/m).

Les flux thermiques suivants en direction des eaux souterraines ont été définis:

flux thermiques convectifs:

- infiltration d'eaux de surface dans les nappes souterraines¹,
- infiltration de précipitations dans les nappes souterraines,

¹ En raison du manque de données (absence d'informations complètes), le flux thermique résultant de l'infiltration d'eaux de surface dans les nappes souterraines n'a pas été pris en compte pour la présente étude. La chaleur résultant de cette infiltration étant laissée de côté, le potentiel d'utilisation thermique est sous-estimé.

- apports souterrains depuis les zones adjacentes,

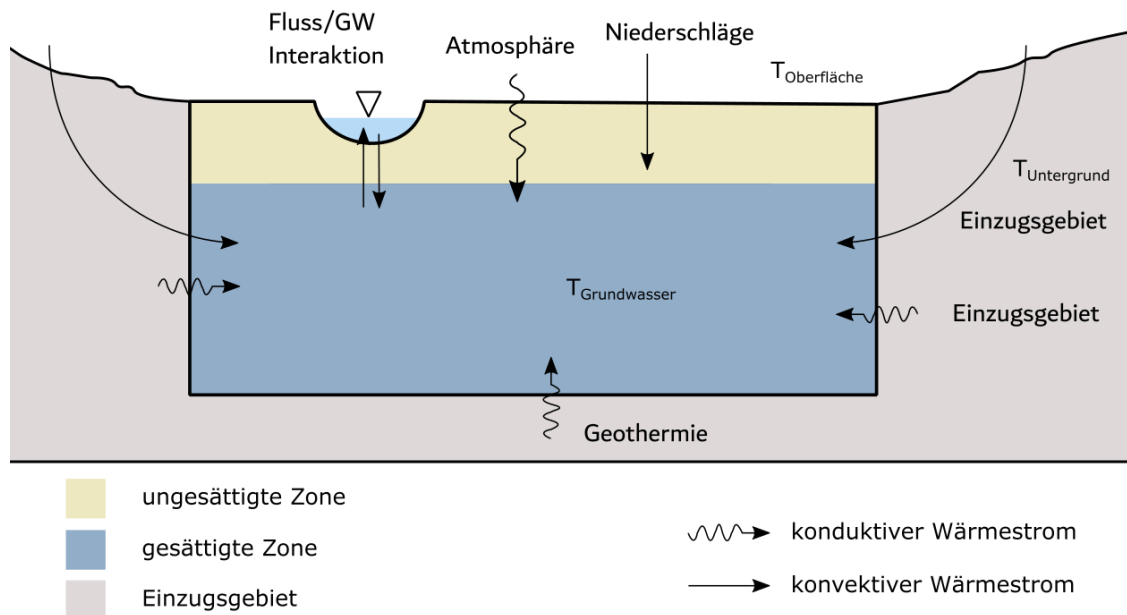
flux thermiques conductifs:

- flux géothermique (densité de flux thermique),
- flux de chaleur latéral provenant des zones adjacentes²,
- flux de chaleur depuis l'atmosphère vers la surface de la nappe à travers la zone non saturée.

Dans l'approche basée sur le bilan thermique, l'exfiltration de l'eau souterraine n'est pas pertinente, car conformément à cette approche, l'eau souterraine quitte le volume faisant l'objet du bilan à une température de $T_0 - \Delta T$. La chaleur de l'eau souterraine exfiltrée a déjà été prélevée.

Le volume de bilan correspond à l'aquifère saturé.

Les flux thermiques traversant la surface du volume de bilan ont été déterminés comme suit pour le calcul du potentiel:



2 En raison de la géométrie des aquifères en roche meuble, on peut supposer que le flux de chaleur latéral est plus faible que le flux géothermique. Or il est compliqué d'estimer le flux de chaleur latéral, car la surface latérale de l'aquifère est difficilement définissable et le gradient de température est inconnu (une modélisation thermique numérique serait nécessaire pour le déterminer). Pour ces raisons, le flux de chaleur latéral provenant des zones adjacentes n'a pas été pris en compte.

Figure 5: Représentation des différents flux thermiques sur une coupe verticale perpendiculaire à la direction d'écoulement des eaux souterraines

Flux thermique convectif provenant de l'infiltration des précipitations dans les nappes souterraines J_N (J):

$$J_N = (N - EP) \cdot f_N \cdot F_{GW} \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T$$

sachant que N désigne les précipitations (m/s), EP l'évapotranspiration (m/s), f_N le coefficient d'infiltration (dépend de l'imperméabilisation, de la géologie, etc.) et F_{GW} la surface de l'aquifère (m²).

Flux thermique convectif provenant des apports souterrains depuis les zones adjacentes (bassins versants) J_Z (J):

$$J_Z = q_N \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T$$

avec le ruissellement de surface correspondant à A_o (m³/s) F_{EG}

$$q_N = (N - EP) \cdot f_{EG} \cdot F_{EG} - A_o$$

Flux thermique conductif provenant de l'atmosphère J_A (J):

$$J_A = \lambda_u \cdot F_{GW} \cdot \frac{\Delta T}{a}$$

sachant que a désigne la profondeur du niveau piézométrique (m) et λ_u la conductivité thermique de la zone non saturée.

Flux thermique conductif provenant de la croûte terrestre (flux géothermique) J_{Geo} (J):

$$J_{Geo} = q_{Geo} \cdot F_{GW}$$

sachant que q_{Geo} désigne la densité de flux thermique (W/m²).

Le potentiel correspond à la somme de tous les flux thermiques.

Hormis le flux géothermique qui est constant, tous les flux thermiques sont proportionnels à ΔT . Le potentiel peut être formulé comme suit:

$$J_{Pot} = J_N + J_Z + J_A + J_{Geo} = \alpha \cdot \Delta T + \beta$$

Étant donné que le flux de chaleur latéral n'est pas pris en compte, l'épaisseur de la zone saturée n'intervient pas dans le calcul. En vue d'une extension future de l'approche basée sur le bilan thermique, il convient d'examiner la manière dont les flux de chaleur latéraux pourraient être intégrés.

L'épaisseur de l'aquifère ne joue aucun rôle dans le calcul du potentiel. Les flux thermiques spécifiques (kW/m²) provenant des précipitations et de la géothermie varient peu par rapport aux flux thermiques provenant de l'atmosphère et des bassins versants. Si la profondeur du niveau piézométrique est faible, le flux thermique provenant de l'atmosphère prédomine. Si, en revanche, le bassin versant est très étendu par rapport à l'aquifère, le flux thermique qui en provient prédomine.

5 Validation

5.1 Comparaison avec un modèle thermique des eaux souterraines

Afin de vérifier l'approche basée sur le bilan thermique, un modèle thermique tridimensionnel des écoulements souterrains a été créé à l'aide de FEFLOW. Son objectif est de représenter le concept de l'approche basée sur le bilan thermique. Dans ce modèle, un aquifère est intégré dans son bassin versant. L'aquifère se situe directement sur le plancher imperméable afin de garantir que l'eau provenant du bassin versant s'écoule à travers les côtés de l'aquifère.

Dans le modèle, l'eau souterraine est alimentée à travers la couche supérieure (renouvellement de la nappe) et s'écoule de l'aquifère. L'écoulement souterrain est défini par un potentiel fixe dans l'aquifère. Les paramètres du modèle peuvent être consultés à 0.

La température relative sur les bords du modèle est égale à 0 K, à l'exception du bord inférieur, où un flux thermique est défini. La nappe est rechargée à une température relative de 0 K.

Une simulation stationnaire a été effectuée afin de déterminer la répartition de la température en état «d'équilibre». Ensuite, de la chaleur a été prélevée dans la nappe (zone saturée) de manière à ce que la température de celle-ci diminue de $\Delta T = 3$ K (Figure 7). On suppose que le refroidissement est homogène sur l'ensemble de la nappe.

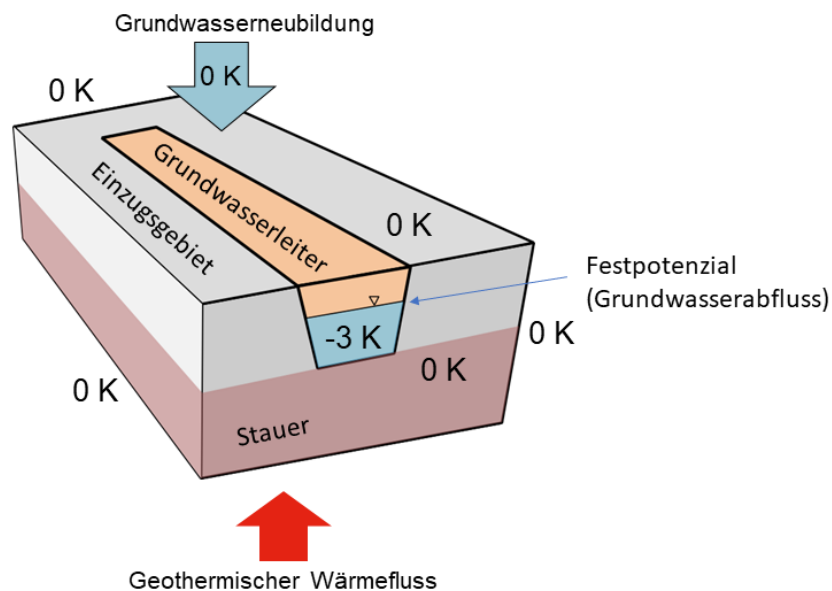


Figure 6: Représentation schématique du modèle thermique des eaux souterraines

Tableau 2: Résultats de la comparaison entre le modèle thermique des eaux souterraines et l'approche basée sur le bilan thermique

Flux thermique à travers	Modèle thermique des écoulements souterrains		Approche basée sur le bilan thermique	
	kW	Proportion	kW	Proportion
le bord supérieur (atmosphère et précipitations)	287	60%	255	61%
les bords latéraux (bassin versant)	125	26%	145	35%
le bord inférieur (gradient géothermique)	64	13%	19.5	5%
Potentiel d'utilisation de la chaleur dans l'aquifère	476		420	

Les flux thermiques provenant des bords de la zone saturée ont été calculés et comparés aux résultats de l'approche basée sur le bilan thermique (Tableau 2). La comparaison révèle que les flux thermiques sont de même ordre de grandeur. Par conséquent, l'approche basée sur le bilan thermique a été jugée appropriée pour le calcul du potentiel.

L'écart le plus important (69%) concerne le «flux géothermique» qui, dans l'approche basée sur le bilan thermique, s'écoule verticalement en dessous de l'aquifère. Dans le modèle thermique des eaux souterraines, le flux thermique converge depuis une surface étendue vers le bord inférieur du modèle. De la chaleur s'écoule également depuis le plancher imperméable et le bassin versant. Une partie de la chaleur provenant du bassin versant ne traverse pas les bords latéraux de l'aquifère, ce qui peut expliquer le flux plus faible que dans l'approche basée sur le bilan thermique. L'écart entre les potentiels calculés est de 12%.

5.2 Comparaison avec des études portant sur le potentiel (canton de Saint-Gall)

Afin d'apporter un élément de validation supplémentaire à l'analyse, le potentiel calculé a été comparé avec des études de potentiel déjà réalisées. L'aquifère de la vallée du Rhin, qui a fait l'objet d'une évaluation du potentiel dans le cadre de l'étude «Grundwasserbewirtschaftung im Kanton St. Gallen», a été choisi à cet effet (Stauffer, 2013; AF-Colenco AG, 2011). L'évaluation a conclu à une puissance d'extraction spécifique de 2 W/m² pouvant être utilisée durablement. Dans le cadre de la présente étude, l'approche basée sur le bilan thermique aboutit à une puissance d'extraction calculée (ou potentiel d'utilisation spécifique de la chaleur) de 1,4 à 1,9 W/m² pour l'aquifère de la vallée du Rhin.

Ces résultats sont tout à fait concordants avec ceux de l'étude de Saint-Gall.

5.3 Potentiel total pour la Suisse

Afin de procéder à une autre comparaison, l'énergie thermique des eaux souterraines (en kWh) et le potentiel d'utilisation de la chaleur (en kW) ont été calculés pour l'ensemble de la Suisse (sans les cantons du Jura, du Valais, de Vaud, de Neuchâtel et d'Appenzell Rhodes-Intérieures, cf. Tableau 3). D'après ce calcul, l'énergie thermique provenant des eaux souterraines équivaut à environ 17 TWh (approche basée sur le volume). Avec l'approche basée sur le bilan thermique, le potentiel d'utilisation durable de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse s'élève à environ 4,2 GW. Les deux potentiels ont été déterminés avec un ΔT de 3 K.

Il en résulte un potentiel d'utilisation spécifique de la chaleur moyen de 1,36 W/m².

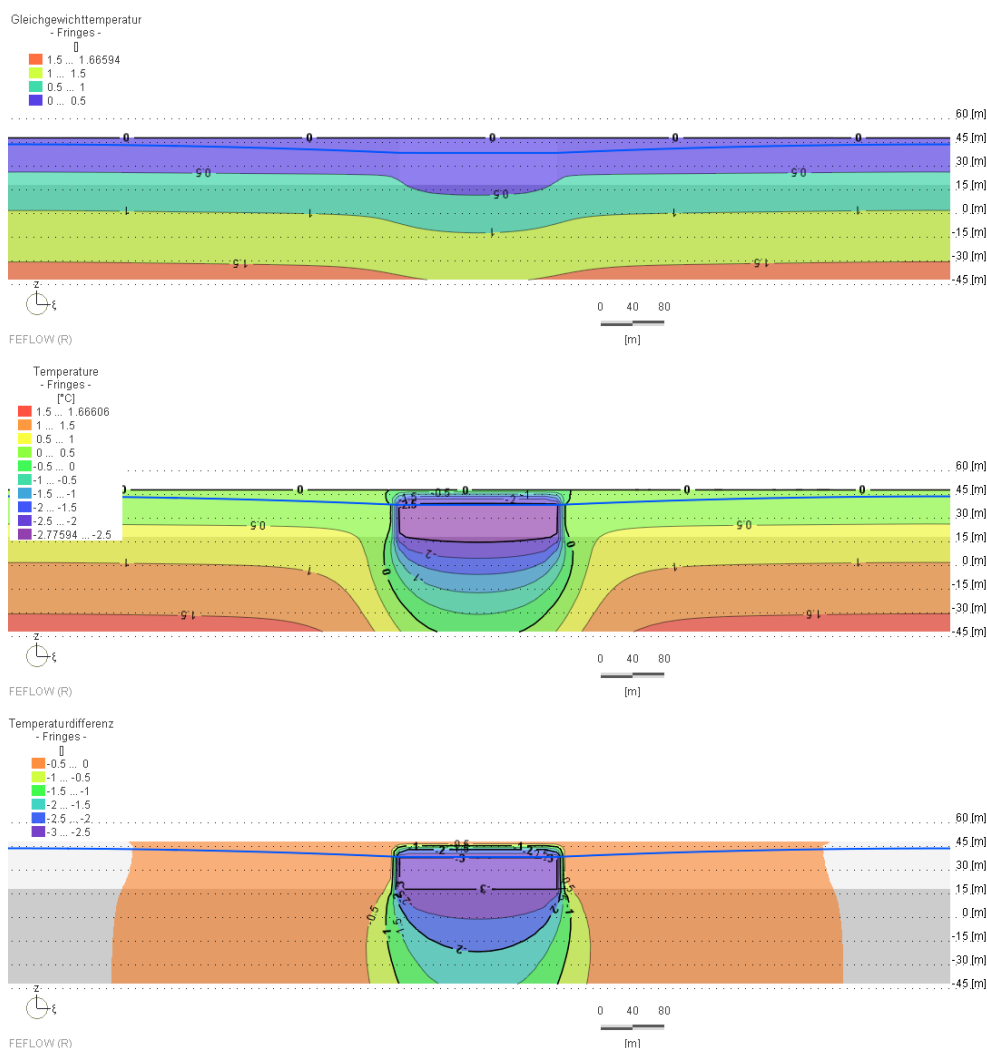


Figure 7: En haut: température de l'eau souterraine en équilibre (sans utilisation de la chaleur de l'eau souterraine); au milieu: température de l'eau souterraine en cas de refroidissement de 3 K au niveau de l'aquifère; en bas: différence entre les deux schémas précédents.

Tableau 3: Énergie thermique et potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse

Énergie thermique en GWh (TWh) (approche basée sur le volume)	Potentiel d'utilisation de la chaleur en MW (GW) (approche basée sur le bilan thermique)	Potentiel d'utilisation spécifique de la chaleur en W/m ²
17 367 GWh (17 TWh)	4182 MW (4,2 GW)	1,36 W/m ²

6 Modèle de géodonnées et modèle de représentation

Le présent projet a permis d'établir un jeu de données national relatif au potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse. Ce jeu de données national couvrant l'ensemble du territoire est disponible pour la majorité des cantons et est publié sur le portail SIG de la Confédération (<https://map.geo.admin.ch>).

Le jeu de géodonnées est documenté dans le modèle de géodonnées et de représentation (0). Il est brièvement décrit dans un encadré sur le portail SIG de la Confédération (0).

7 Recommandations concernant les jeux de géodonnées relatifs aux eaux souterraines

Suite au projet, les recommandations suivantes sont formulées en vue de l'établissement de jeux de données cantonaux relatifs aux eaux souterraines (modèles de géodonnées):

- Les nappes d'eaux souterraines doivent être réparties en unités de bilan hydrogéologiques cohérentes, qui sont pratiques pour les modèles ou les calculs. Une désignation géographique des unités de bilan permet de se référer plus clairement aux unités concernées.
- Les nappes souterraines qui s'étendent sur plusieurs cantons doivent être décrites de manière cohérente.
- Les informations relatives aux nappes profondes n'étant pas disponibles à ce stade, le jeu de géodonnées demeure pour l'instant incomplet et devra donc être consolidé à l'avenir.
- Pour les isohypses de la nappe souterraine, il convient d'indiquer explicitement s'il s'agit du niveau piézométrique ou du niveau de la nappe libre. Cette information est pertinente en cas de nappe souterraine captive. Le type de niveau de la nappe doit également être noté (niveau le plus bas, niveau moyen, niveau élevé).

- Dans le MGD ID 139.1 (révision achevée en décembre 2023), les attributs correspondants devraient être pris en compte afin d'obtenir une typologie ciblée des nappes souterraines en ce qui concerne le potentiel thermique.

8 Conclusion

Dans le cadre de la présente étude, le potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse a été évalué à la fois selon une approche basée sur le volume et selon une approche basée sur le bilan thermique. L'approche basée sur le volume consiste à déterminer l'énergie thermique stockée dans les eaux souterraines. L'eau souterraine est considérée comme un système fermé avec une quantité de chaleur finie et «épuisable». L'approche basée sur le bilan thermique permet de déterminer la quantité de chaleur utilisable en effectuant un bilan thermique simplifié qui tient compte des changements à long terme. La nappe souterraine est considérée comme un système ouvert permettant un échange de chaleur avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la géosphère. Les deux approches livrent des informations complémentaires sur le potentiel d'utilisation de la chaleur. L'approche basée sur le bilan thermique pourrait être améliorée en prenant également en compte l'infiltration d'eaux de surface et le flux thermique conductif latéral.

Le potentiel calculé à l'aide de l'approche basée sur le bilan thermique est considéré comme de la chaleur utilisable durablement à moyen terme. Il convient de noter que seul le potentiel de production de chaleur à partir des eaux souterraines a été pris en compte, autrement dit les éventuelles utilisations à des fins de refroidissement ou de stockage saisonnier de la chaleur ont été laissés de côté. Les installations d'exploitation existantes ont également été exclues. Les bases pour le calcul ont été fournies par les cantons et la Confédération.

Les résultats de la présente étude indiquent que le potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse s'élève à environ 17 360 GWh (17 TWh) (approche basée sur le volume). Selon les statistiques relatives à l'exploitation de la géothermie en Suisse (TK Consult AG, 2023), quelque 421,5 GWh d'énergie géothermique (renouvelable) ont été produits par des stations de pompage d'eaux souterraines proches de la surface (pompes à chaleur eau-eau) en 2021. Autrement dit, avec la capacité installée actuelle et en supposant qu'il n'y ait pas de régénération, le potentiel d'utilisation de la chaleur des aquifères en roche meuble serait épuisé dans toute la Suisse au bout de 40 ans. Cette affirmation doit être interprétée avec réserve, car elle ne tient pas compte de la régénération naturelle du système par échange avec l'atmosphère ou la lithosphère.

Avec l'approche basée sur le bilan thermique, le potentiel total d'utilisation de la chaleur a été estimé à environ 4,2 GW. Selon (EnergieSchweiz, 2021) la puissance de chauffage installée combinée à l'utilisation de la chaleur des eaux souterraines s'est élevée à environ 349,7 MW en 2021, soit une puissance d'extraction d'environ 252,6 MW (hypothèse SCOP³ 3,6). La capacité installée actuelle ne correspond donc qu'à environ 6 % du potentiel thermique des aquifères en roche meuble de Suisse calculé dans le cadre de la présente étude.

3 Le coefficient de performance saisonnier, ou SCOP, décrit l'efficacité de l'ensemble d'un système de chauffage sur une année.

Les résultats de la présente étude indiquent que les eaux souterraines des aquifères en roche meuble ne sont pas exploitées à l'échelle de la Suisse et qu'elles peuvent apporter une contribution essentielle à la réalisation des objectifs de la Stratégie énergétique 2050+. La garantie d'une utilisation durable de la chaleur issue des aquifères en roche meuble nécessite l'exploitation thermique des eaux souterraines par nappe au-delà des frontières cantonales.

Bibliographie

AF-Colenco AG, 2011. *Potenzialbewertung und Ressourcenmanagement von Grundwasser zur thermischen Nutzung (Postulat „Förderung der Grundwassernutzung“)*., s.l.: s.n.

Bundesamt für Energie, 2017. *Ergebnisbericht zu Etappe 2: Festlegung und Objektblätter; Entwurf vom 22. November 2017*, Bern: s.n.

Bundesamt für Energie, 2017. *Umgang mit den Stellungnahmen der Regionalkonferenzen zu Etappe 2*, Bern: Bundesamt für Energie.

EnergieSchweiz, B. f. E. B., 2021. *Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz*, s.l.: Schlussbericht.

Kantonsrat St.Gallen, 2012. *Grundwasserbewirtschaftung im Kanton St. Gallen (40.12.03)*., s.l.: Technischer Bericht.

Menzel, L., Lang, H. & Rohmann, M., 1999. Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973 - 1992. In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. s.l.:s.n.

Nagra, 2016. *Entsorgungsprogramm 2016 (NAB 16-01)*, Wettingen: Nagra.

Sinreich, M., Lützenkirchen, V., Jeannin, P.-Y. & Simon, L., 2012. Grundwasserressourcen der Schweiz - Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas*, September, pp. 16-28.

Stauffer, F. e. a., 2013. *Thermal use of shallow groundwater*. CRC Press Hrsg. s.l.:s.n.

TK Consult AG, 2023. *Thermische Grundwassernutzung des Lockergesteins-Grundwasserleiters im St.Galler Rheintal*, s.l.: Technischer Bericht.

Annexe 1 Détails concernant le calcul du potentiel d'utilisation de la chaleur dans les aquifères en roche meuble de Suisse

Tableau 4. Valeurs constantes

Symbole	Description	Valeur
λ	Conductivité thermique	2,6 W/(m·K)
c_w	Capacité thermique spécifique de l'eau	4182 J/(kg·K)
f_N	Coefficient d'infiltration	0,3
f_{EG}	Coefficient d'infiltration dans le bassin versant	0,3
ρ_w	Densité de l'eau	999,96 kg/m ³
n	Porosité de l'aquifère	0,2

Polygones de bilan

Les flux thermiques provenant de l'atmosphère (précipitations), de l'hydrosphère (eaux superficielles et souterraines) et de la lithosphère (croûte terrestre) sont en lien avec la surface de l'aquifère. Ces surfaces sont constituées des polygones des géodonnées cantonales relatives aux eaux souterraines en roche meuble. Les polygones contigus ont été agrégés. Lorsqu'une désignation géographique était disponible, ils ont été agrégés selon leur désignation cantonale pour ensuite être recoupés avec la frontière cantonale. La superficie de ces polygones correspond à F_{GW} . Le calcul du potentiel se réfère à ces «polygones de bilan».

Pour simplifier, le flux thermique provenant des apports latéraux se réfère à la surface des bassins versants topographiques qui jouxtent le polygone de bilan (aquifère), même si les bassins versants topographiques ne correspondent pas parfaitement aux bassins versants souterrains. Le jeu de données de Swisstopo «Bassins versants partiels 2 km²» a été utilisé pour déterminer les bassins versants. Les bassins versants qui ont un exutoire (point de l'exutoire) dans le polygone de bilan considéré ont été attribués au polygone en question. Lors du calcul du flux thermique provenant des apports latéraux, seule la surface F_{EG} des bassins versants qui ne se recoupent pas avec le polygone de bilan a été prise en compte. Si aucun bassin versant n'est drainé dans un polygone de bilan, le flux thermique provenant des apports latéraux est égal à 0 kW.

Calcul des flux thermiques et de l'énergie thermique stockée

Flux thermique convectif provenant de l'infiltration des précipitations dans les nappes souterraines

La matrice HADES «Évaporation annuelle moyenne (1973-1992)» (Menzel, et al., 1999) a été soustraite de la matrice «Hauteurs moyennes des précipitations (1981-2010)» (Menzel, et al., 1999). Les valeurs

des cellules (1 km²) de la matrice résultante ont été additionnées pour le polygone de bilan, puis multipliées par la surface des cellules de la matrice et par $c_w \cdot \Delta T$.

Flux thermique convectif provenant des apports souterrains depuis les zones adjacentes (bassins versants)

Un calcul identique à celui du flux thermique a été effectué pour les précipitations. Il se réfère toutefois aux bassins versants des polygones de bilan.

Flux thermique conductif provenant de l'atmosphère

Le calcul du flux thermique provenant de l'atmosphère repose entre autres sur la profondeur du niveau piézométrique. La profondeur moyenne a été calculée pour chaque polygone de bilan. Pour les cantons qui ne disposent pas de jeux de données sur la profondeur du niveau piézométrique, celle-ci a été déduite des isohypses moyennes de la nappe souterraine. Les isohypses ont été interpolées pour chaque polygone de bilan, puis soustraites du modèle numérique de terrain (Swisstopo DHM25). Afin de limiter les erreurs, l'interpolation a été limitée à 1 km autour des isohypses. Lorsque cette surface d'interpolation ne couvre qu'une petite partie du polygone de bilan, la profondeur moyenne du niveau piézométrique obtenue présente un degré d'incertitude élevé. La fiabilité de la profondeur moyenne et du flux thermique provenant de l'atmosphère tel qu'il en a été déduit a été exprimée en pourcentage de couverture du polygone de bilan par la surface d'interpolation. Lors de la détermination de la profondeur du niveau piézométrique, des valeurs négatives ou nulles ne sont pas exclues en raison de la qualité des données. Elles sont définies partout à 0,2 m afin de ne pas surestimer le flux thermique provenant de l'atmosphère. Lorsqu'aucune donnée sur la profondeur du niveau piézométrique et aucune isohypse n'est disponible, une profondeur moyenne hypothétique de 15 m a été admise, et ce afin de permettre une estimation du flux thermique provenant de l'atmosphère dans le cadre du jeu de géodonnées. Dans de tels cas, la fiabilité du calcul a été définie à zéro.

Flux thermique conductif provenant de la croûte terrestre (flux géothermique)

Les isolignes de la « densité de flux thermique 500 » de Swisstopo ont été interpolées pour toute la Suisse sous forme de matrice. Les valeurs des cellules (en mW/m²) de la matrice obtenue ont été additionnées pour le polygone de bilan, puis multipliées par les surfaces des cellules de la matrice.

Énergie thermique stockée dans les eaux souterraines

Le calcul du flux thermique provenant de l'atmosphère repose entre autres sur l'épaisseur de la nappe. Dans de nombreux cantons, cette épaisseur est représentée par des multipolygones qui subdivisent l'aquifère en classes d'épaisseur (p. ex. épaisseur de 2 m à 10 m). Le volume de chaque polygone a généralement été calculé sur la base de la limite inférieure de la classe d'épaisseur et additionné pour le polygone de bilan. Lorsque les données cantonales n'étaient pas disponibles, l'épaisseur a été déduite du jeu de données HADES consacré aux réservoirs aquifères (de manière analogue aux jeux de données cantonaux).

Aquifère superposé et aquifère captif

Les attributs des cantons relatifs aux aquifères superposés et aux aquifères captifs ont été repris. Par souci de simplicité, seul le niveau supérieur a été pris en compte dans le calcul pour les aquifères superposés.

Tableau 5: Données utilisées

Symbole	Description	Topologie	Source
F_{GW}	Surface de l'aquifère (m ²)	Polygone	Jeux de données cantonaux
F_{EG}	Surface du bassin versant (m ²)	Polygone	Swisstopo: «Bassins versants partiels 2 km ² »
N	Précipitations (m/s)	Matrice	HADES: «Hauteurs moyennes des précipitations (1981-2010)»
EP	Évapotranspiration (m/s)	Matrice	HADES: «Évaporation annuelle moyenne (1973-1992)»
q_{Geo}	Densité de flux thermique	Matrice	Swisstopo: «Densité de flux thermique 500»
a	Profondeur du niveau piézométrique (m)	Matrice Polylignes (isohypses)	Jeux de données cantonaux

Tableau 6: Validation de l'approche basée sur le bilan thermique (les valeurs des paramètres sont des valeurs standards pour les sédiments considérés)

Aquifère (gravier)	
Largeur	200 m
Longueur	1200 m
Épaisseur	25 m
Épaisseur de la nappe	20 m
Profondeur du niveau piézométrique	5 m
Capacité thermique volumique	2,0 MJ/(m ³ ·K)
Conductivité thermique	2,0 W/(m·K)
Conductivité hydraulique	1·10 ⁻³ m/s
Bassin versant (moraine)	
Largeur	1200 m
Longueur	2000 m
Épaisseur	25 m
Capacité thermique volumique	2,1 MJ/(m ³ ·K)
Conductivité thermique	2,6 W/(m·K)
Conductivité hydraulique	1·10 ⁻⁵ m/s

Plancher imperméable (molasse)	
Largeur	1200 m
Longueur	2000 m
Épaisseur	60 m
Capacité thermique volumique	2,1 MJ/(m ³ ·K)
Conductivité thermique	2,6 W/(m·K)
Conductivité hydraulique	1·10 ⁻¹⁵ m/s
Paramètres généraux	
Porosité	0,2
Dispersion longitudinale	5,0 m
Dispersion latérale	0,5 m
Alimentation des nappes d'eaux souterraines par les précipitations	174 mm/a
Profondeur du niveau piézométrique à l'écoulement (potentiel fixe)	2 m
Flux géothermique	0,065 W/m ²

Annexe 2 Matrice de pertinence

Géodonnées	Disponibilité des données		Qualité		Acquisition auprès des cantons	Pertinent pour le calcul
	Canton	Confédération	Canton	Confédération		
Nappes souterraines	✓	✓	✓	x	✓	✓
Épaisseur de la nappe	✓	✓	✓	x	✓	
Isohysses de la nappe souterraine (niveau moyen)	✓	✓	✓	x	✓	✓
Profondeur du niveau piézométrique (niveau moyen)	x	x	x	x	✓	✓
Conductivité hydraulique	x	x	x	x	✓	
Porosité	x	x	x	x	✓	
Direction d'écoulement	✓	✓	✓	x	✓	
Modèles des eaux souterraines (2D/3D)	x	x	✓	x	✓	
Modèle géologique 3D des aquifères en roche meuble	x	x	✓	x	✓	
Zones de protection	✓	✓	✓	x	✓	
Prescriptions relatives au refroidissement	✓	✓	✓	x	✓	
Précipitations	x	✓	x	✓	x	✓
Évapotranspiration	x	✓	x	✓	x	✓
Bassins versants	x	✓	x	✓	x	✓
Densité de flux thermique	x	✓	x	✓	x	✓

Annexe 3 Disponibilité des données par canton

Annexe 4 Modèles des eaux souterraines

* Les prises de position et les retours ci-après sont parfois retranscrits avec de légères modifications formelles.

Canton	Retour ou prise de position des services cantonaux	Modèle disponible (oui, non)
Zoug (ZG)	Il existe un modèle des eaux souterraines pour le bassin de Baar (FEFLOW). Il est exploité en externe par la société Jäckli Geologie AG sur mandat du service de l'environnement. Nous avons notamment demandé à la société GEOTEST SA de Zurich de clarifier si ce modèle pouvait être mis à la disposition d'autres acteurs, mais cela semble techniquement très compliqué: l'exportation du modèle en soi (géométrie, conditions aux limites, etc.) ne pose pas de problème, mais le transfert de tous les détails et réglages fins permettant un fonctionnement identique dans un environnement différent est apparemment difficile. En principe, un transfert du modèle cantonal des eaux souterraines «Baarerbecken» serait toutefois possible. Les charges de la société Jäckli Geologie AG devraient être prises en compte.	Oui
Bâle-Campagne (BL)	Divers bureaux disposent de modèles numériques pour certaines parties élaborés dans le cadre de différents projets (englobant généralement une ou quelques communes). Cependant, aucun accord d'utilisation n'a été conclu entre le canton et les bureaux ou les mandants. Il convient en premier lieu de régler cette question.	Oui
Saint-Gall (SG)	Il existe deux modèles dans la vallée du Rhin, ainsi qu'un modèle succinct à l'ouest de Saint-Gall. Les futures données incluront des données lithostratigraphiques relatives aux forages, y compris de nombreuses données hydrogéologiques. Il est prévu d'élaborer de nouveaux modèles des eaux souterraines. La mise en œuvre prendra encore quelques années.	Oui

Jura (JU)	Non	Non
Bâle-Ville (BS)	SPRING (éléments finis); Bâle-Ville; non accessible.	Oui
Tessin (TI)	Alcuni modelli idrogeologici disponibili in formato FEFLOW presso l'Istituto scienze della Terra della SUPSI.	Oui
Valais (VS)	Pour les besoins des projets de construction, beaucoup de modèles (FEFLOW notamment) existent, mais sont liés à des projets en particulier et ne sont pas archivés de manière systématique au niveau du canton et ne sont pas disponibles au public. Un effort considérable devrait être investi pour récolter, harmoniser et compiler tous ces modèles. Toutefois, cette tâche permettrait de capitaliser sur les travaux effectués et ajouter une plus-value intéressante sur la connaissance hydrogéologique et géologique cantonale. Pour les besoins des tâches de coordination, des modèles géologiques régionaux ont récemment été développés dans le cadre de démarches cantonales qui ont bénéficié de l'appui du Service géologique national et de différents instituts de recherche. Les outils consolidés sont destinés à la planification du sous-sol, l'utilisation de ses ressources et l'évaluation des impacts environnementaux. A l'heure actuelle, un modèle régional d'écoulement souterrain de la nappe du Rhône, basé sur une valorisation des données du cadastre cantonal des forages et les données de la surveillance cantonale des eaux souterraines, est disponible pour la région de Viège. A titre informatif, pour le territoire karstique du canton (Nord des Alpes et Chablais), 8 modèles géologiques régionaux 3D ont de plus été développés dans le cadre de la documentation des systèmes hydrogéologiques associés.	Oui
Schwyz (SZ)	Non	Non

Nidwald (NW)	Modèle 3D des écoulements souterrains (FE-FLOW) pour la zone de Dallenwil, Oberdorf, Stans, Stansstad, Ennetbürgen et Buochs.	Oui
Fribourg (FR)	Non, pas actuellement. Planifié d'ici quelques années.	Non
Berne (BE)	Modèle des eaux souterraines pour l'Emmental, 2D, stationnaire + non stationnaire, FE-FLOW; modèle pour le Seeland bernois, 2D, stationnaire + non stationnaire, FEFLOW. Les modèles ne sont pas accessibles au public et ne sont transmis que dans le cadre d'un règlement contractuel. Les documentations relatives aux modèles sont toutefois mises en ligne sur le site Internet de l'Office des eaux et des déchets.	Oui
Schaffhouse (SH)	Non, nous avons récemment commandé un modèle des eaux souterraines et attendons une première version pour la fin de l'année. Je pense qu'elle sera prête au début de 2024 (régions de Schaffhouse-Neuhausen et Klettgau). Les autres régions suivront plus tard.	Non
Argovie (AG)	Il existe des modèles d'eaux souterraines «privés». Les données sont généralement disponibles auprès des bureaux de géologues (société CSD Ingenieure AG, Jäckli Geologie AG, etc.). Les régions présentant des modèles plus conséquents sont connues.	Oui
Soleure (SO)	Wasseramt (Rechterswil à Soleure); FEFLOW - Niederamt (Olten à Aarau); FEFLOW - Gäu (Oensingen à Olten); SPRING (obsolète, en cours de révision)	Oui
Obwald (OW)	Non	Non

Annexe 5 Prescriptions cantonales relatives au refroidissement par les eaux souterraines

Canton	Retour ou prise de position des services cantonaux
Argovie (AG)	Le refroidissement avec de l'eau souterraine est en principe autorisé en tant qu'utilisation de l'eau souterraine (pas de taille minimale ou maximale de l'installation). Respect de la règle 3 K - 100 m concernant le panache en aval et les utilisations existantes ne doivent pas être affectées négativement. Selon la taille de l'installation, des mesures sont nécessaires (également en aval).
Berne (BE)	Après utilisation, l'eau non polluée doit être entièrement infiltrée dans la nappe dans laquelle elle a été prélevée. En cas d'aquifères superposés, l'eau prélevée réchauffée doit être restituée au niveau de prélèvement. L'apport de chaleur ne doit pas modifier la température naturelle des eaux du sous-sol de plus de 3 °C. Dans un rayon de 100 m au maximum, la variation peut dépasser 3 °C. Les nouvelles installations ne doivent pas porter atteinte à l'utilisation existante de l'eau dans le cadre d'une concession.
Bâle-Campagne (BL)	Le refroidissement ne doit pas être plus important que le réchauffement (le bilan annuel doit être équilibré ou alors il faut utiliser davantage de chaleur que de froid).
Bâle-Ville (BS)	Une utilisation purement frigorifique n'est pas autorisée et doit être combinée avec une utilisation thermique; sur l'année, un rapport de 40:60 doit être respecté entre la quantité de chaleur apportée [kWh/a] dans les eaux souterraines lors du processus de refroidissement et la quantité de chaleur prélevée [kWh/a]. La température de l'eau réinfiltrée ne doit pas dépasser 17 °C et la différence de température pour l'exploitation du froid, +3 °C. Le guide sur l'utilisation des eaux souterraines dans le canton de Bâle-Ville (p. 5/18) informe sur les exigences supplémentaires.
Fribourg (FR)	Non. Seulement les prescriptions légales fédérales sont appliquées.
Genève (GE)	-
Jura (JU)	-

Nidwald (NW)	Concession obligatoire conformément à l'art. 100 de la loi du canton de Nidwald du 12 février 2020 sur les eaux.
Obwald (OW)	Non
Saint-Gall (SG)	Conformément à la LEaux/OEaux. Aucune autre restriction cantonale.
Schaffhouse (SH)	Les utilisations purement frigorifiques ne sont pas autorisées si les eaux souterraines doivent être réinfiltrées. La quantité d'énergie annuelle utilisée pour le refroidissement doit être inférieure à celle utilisée pour le chauffage/l'eau chaude.
Soleure (SO)	Le refroidissement seul n'est plus autorisé dans le canton de Soleure, seul le refroidissement en combinaison avec le chauffage l'est. La quantité de chaleur prélevée pour le chauffage doit être supérieure ou égale à la quantité injectée dans le cadre du refroidissement (mesure préventive contre le réchauffement insidieux des nappes d'eaux souterraines).
Schwyz (SZ)	Pas d'autres prescriptions que les prescriptions fédérales.
Thurgovie (TG)	-
Tessin (TI)	Legge sulle acque sotterranee del 12 settembre 1978 (procedura amministrativa per utilizzo dell'acqua sotterranea) Linee guida per il rilascio di un permesso per lo sfruttamento dell'energia geotermica e della captazione di acqua sotterranea ad uso termico (Agosto 2014)
Uri (UR)	Les conditions-cadres d'autorisation des installations de pompes à chaleur sur nappe phréatique sont décrites dans le concept cantonal d'utilisation de la chaleur (y c. les cartes d'admissibilité). Le concept peut être consulté sur https://www.ur.ch/themen/1531, les cartes d'admissibilité se trouvent sur le géoportail cantonal (www.geo.ur.ch). Pratique cantonale: lors de la planification d'une installation de pompe à chaleur sur nappe phréatique, il doit être démontré (chauffage et refroidissement) qu'aucune pompe à chaleur sur nappe phréatique déjà existante ne subira une perte d'efficacité significative du fait de cette installation. La preuve correspondante peut être apportée en démontrant par le calcul que

	la température de l'eau souterraine ne varie pas de plus de 1,0 °C pour les installations existantes en cas de débit de prélèvement maximal.
Vaud (VD)	-
Valais (VS)	En Valais, il existe un ancien Arrêté concernant les conditions d'utilisation des eaux souterraines, des lacs et des cours d'eau à des fins thermo-énergétiques (730.102). Celui-ci est notamment basé sur les prescriptions de la législation sur la protection des eaux et limite les modifications de température induites ($\Delta T \pm 3^{\circ}\text{C}$). La gestion thermique des nappes est actuellement débattue dans le cadre de la consultation du projet de nouvelle loi cantonale sur l'énergie. Des modifications de la loi cantonale sur la protection des eaux sont également à l'étude dans ce contexte. Celles-ci concernent la précision des tâches cantonales et communales à même d'assurer l'évaluation des potentiels géothermiques et la gestion coordonnée des nappes phréatiques. Eu égard aux besoins identifiés (N.B. en Valais, propriété communale des eaux souterraines), un modèle de règlement sur la géothermie de faible et moyenne profondeur serait utile dans ce contexte pour assurer une pratique cohérente à l'échelle de la plaine du Rhône.
Zoug (ZG)	Il n'existe pas de conditions particulières pour le refroidissement. Les frais d'exploitation d'une concession (à partir de 300 l/min) sont deux fois plus élevés pour le refroidissement avec de l'eau souterraine que pour le chauffage.
Zurich (ZH)	Selon le guide de planification «Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser» (juin 2010, p. 16): https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-aus-untergrund-und-wasser/energie-aus-grundwasser/planungshilfe_waermenutzung.pdf

Annexe 6 Modèle de données et de représentation

Annexe 7 Métadonnées