



CENTRE DE RECHERCHE EN GEOTHERMIE

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel - PGN

Volume 1 :

Rapport final

Elaboré par

Groupe de travail PGN

c/o CREGE – Centre de recherche en géothermie

Novembre 2008

V 3.1

Impressum

Date : novembre 2008

Projet CREGE : Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel - PGN

No Rapport : CREGE 11-08/02

Réalisation : Groupe de travail PGN

Financement : Fondation Pro Techno, Neuchâtel

Adresse et coordonnées :

CREGE – Centre de recherche en géothermie

c/o CHYN

11 rue E.-Argand, CP 158

CH-2009 Neuchâtel

Tél. +41 (0)32 718 2602 - 2692

contact@crege.ch

www.crege.ch

Citation :

Groupe de travail PGN, 2008. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN). Vol.1 : Rapport final, Vol.2 : Annexes, CREGE 11-08/02, Neuchâtel.

Résumé

Les investigations conduites entre mai 2007 et août 2008 en vue de déterminer le potentiel géothermique sur le territoire du canton de Neuchâtel dans le domaine de l'implantation des sondes géothermiques verticales (**SGV**), des géostructures énergétiques (**GEN**), des nappes phréatiques (**NAP**) et des aquifères profonds (**APR**) ont permis de conclure que, sous certaines conditions, chacune de ces quatre technologies offre d'intéressantes perspectives de valorisation.

Le développement des **sondes géothermiques verticales (SGV)** connaît un véritable boom en Suisse depuis plus de 10 ans et pour la Suisse Romande, on observe des disparités dans la densité des installations selon les cantons. Dans l'ensemble, les caractéristiques du sous-sol du pied du Jura et des vallées internes de la chaîne sont favorables pour l'implantation des SGV. Toutefois certaines précautions doivent être prises, selon l'altitude d'implantation, la présence de calcaires fracturés et karstifiés, ainsi que des limites autorisées de profondeur des forages.

Des simulations des principales conditions environnementales du sous-sol rencontrées sur le territoire cantonal et des paramètres de dimensionnement des SGV ont été réalisées au moyen d'un logiciel, dans le but de montrer la sensibilité de variation de ces divers paramètres. Par exemple, le refroidissement du sol avec l'altitude, les grandes épaisseurs de calcaire non saturé (zones fortement karstifiées), l'espacement des SGV (sondes multiples) ou encore la longueur des SGV (limitation exigée de la profondeur) ont été étudiés dans le détail.

Le potentiel d'installation des SGV dépend évidemment du développement du secteur de la construction, mais également de la qualité de l'information et de la promotion auprès des installateurs, des promoteurs et des propriétaires. Dans le cas de champs de sondes pour le chauffage et le rafraîchissement de grands bâtiments, quelques réalisations phares auront un effet promotionnel important.

Dans le secteur des **géostructures énergétiques (GEN)**, les investigations ont tout d'abord porté sur l'évaluation des zones à potentiel de constructions de géostructures énergétiques, basées sur les régions présentant des conditions géologiques défavorables du point de vue des fondations. Au total, 17 zones potentielles ont été identifiées dans cinq régions du canton, portant la superficie totale intéressée par les géostructures à 463 hectares. Ensuite, une estimation du potentiel énergétique cantonal a été effectuée en tenant compte du taux d'occupation du sol et des zones de développement, ce qui représente une surface potentielle de bâtiments de 208 hectares et un potentiel thermique de 150 GWh/an.

D'autre part, des projets de développement dans la communauté urbaine de la Chaux-de-Fonds – Le Locle, justement dans une zone à potentiel de géostructures, pourraient tirer parti de la capacité de stockage thermique saisonnier du sous-sol et faire l'objet d'une étude de faisabilité. Finalement, les tunnels qui seront construits dans le cadre du projet TransRUN (Réseau Urbain Neuchâtelois) pourront être équipés d'échangeurs de chaleur, afin de fournir de l'énergie thermique (chaleur ou froid).

L'exploitation thermique des **nappes phréatiques (NAP)** se développe de manière très différenciée en Suisse, car elle dépend de la présence d'eau souterraine à faible profondeur, en quantité suffisante et sans entrer en concurrence avec l'utilisation de cette ressource pour l'eau potable. Cette étude avait pour but de mettre en évidence les secteurs exploitables de NAP dans le canton de Neuchâtel et de donner des clés pour le dimensionnement des installations au moyen de la simulation de quelques cas de NAP.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Par rapport à certains grands cantons situés sur le Plateau, Neuchâtel n'est pas traversé par de puissantes nappes alluviales et en raison de l'utilisation de la plupart des nappes comme ressource en eau potable, les secteurs favorables sont restreints : la surface totale couvre 14 km², soit le 2 % de la superficie du canton. Actuellement on recense 28 installations thermiques de type NAP, principalement localisées sur le littoral et dans le Val de Travers, ce qui représente un soutirage d'énergie thermique (chaleur et surtout du froid) de 4'400 MWh/an. Il apparaît que les NAP potentiellement exploitables sont localisées dans les zones urbaines et villageoises, ce qui est en adéquation avec la demande potentielle de chaleur et de froid.

La simulation numérique des conditions rencontrées dans les principales NAP du territoire cantonal et des paramètres de dimensionnement d'installations ont été réalisées au moyen d'un logiciel simple et pratique. Deux cas ont été particulièrement étudiés : la nappe de l'Areuse dans le delta de l'Areuse et la nappe du Val de Travers. Le paramètre le plus important de la nappe pour une exploitation thermique est la perméabilité, viennent ensuite l'épaisseur et le gradient hydraulique (pente). Des simulations numériques ont été exécutées pour montrer l'étendue du panache thermique dans la nappe, en faisant varier les principaux paramètres d'exploitation. Les zones où la perméabilité est moyenne, les vitesses d'écoulement sont relativement faibles, ce qui les rend adaptées au stockage thermique saisonnier par une installation des puits en doublet réversible.

Le coût des installations thermiques de NAP sont généralement plus élevées que les SGV, c'est pourquoi elles sont plus adaptées pour le chauffage et/ou le refroidissement de groupes de maisons ou de bâtiments de taille importante.

L'impulsion donnée il y a une vingtaine d'année en Suisse dans le domaine de la valorisation des **aquifères profonds (APR)** a fortement fléchi au cours des dernières années, essentiellement pour des raisons budgétaires, alors que la connaissance du potentiel géothermique profond reste très lacunaire. Dans le canton de Neuchâtel, au terme des investigations entreprises dans le cadre de la présente étude, il est apparu que des possibilités de capter des circulations d'eau chaude en profondeur existent dans trois aquifères dont la profondeur respective varie selon les régions, en raison du plissement de la chaîne du Jura et de la complexité des formations géologiques qui la composent.

Les formations calcaires potentiellement productives atteignent des températures de 35 à 100° C, selon leur profondeur. La prospection des APR devra néanmoins passer par des investigations géologiques et géophysiques détaillées, ainsi que des études économiques précises en fonction des consommateurs potentiels. Une première évaluation montre que la puissance thermique pourrait atteindre de manière conservatrice selon l'aquifère capté, de 0.5 à 1.4 MW_{th} par forage, pour une présélection de quatre zones destinées à du chauffage à distance. Une carte des consommateurs potentiels de chaleur a été combinée à une carte du potentiel des deux aquifères les plus accessibles, montrant les zones les plus intéressantes pour engager une phase de prospection et une étude de préféabilité.

Pour assurer le développement des ressources géothermiques identifiées, des mesures à l'échelle des objectifs sont à prendre au niveau de la politique énergétique cantonale, conformément aux recommandations exposées à la fin du présent rapport.

SOMMAIRE

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel - PGN

1. Introduction	7
1.1 Cadre général - Définitions	7
1.2 Démarche de l'étude	9
1.3 Présentation du rapport	9
1.4 Organisation de l'étude	10
2. Conditions d'implantation des sondes géothermiques verticales	11
2.1 Introduction	11
2.2 Sondes géothermiques verticales	13
2.3 Méthodes d'évaluation des conditions d'implantations des sondes géothermiques verticales	26
2.4 Présentation et interprétation des résultats	28
2.5 Synthèse des résultats et conclusions	73
2.6 Références	77
3. Potentiel des géostructures énergétiques	81
3.1 Introduction	81
3.2 Les géostructures énergétiques	82
3.3 Exemples et projets de réalisations	92
3.4 Evaluation du potentiel thermique des géostructures énergétiques	100
3.5 Conclusions et recommandations	114
3.6 Références	115
4. Exploitation thermique des nappes phréatiques	119
4.1 Introduction	119
4.2 Cartographie des ressources disponibles	120
4.3 Dimensionnement des installations thermiques sur nappes phréatiques	127
4.4 Synthèse et conclusions	149
4.5 Références	152
5. Ressources en aquifères profonds	157
5.1. Introduction	157
5.2. Concept technique général	158
5.3. Méthodologie de l'étude	176
5.4. Résultats	188
5.5. Potentiel géothermique des aquifères profonds	191
5.6. Conclusions	194
5.7. Références	196
6. Synthèse et recommandations	201
6.1 Conditions d'implantation des sondes géothermiques verticales	201
6.2 Potentiel des géostructures énergétiques	202
6.3 Exploitation thermique des nappes phréatiques	203
6.4 Ressources en aquifères profonds	204
6.5 Synthèse générale	206

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

1. INTRODUCTION

1.1 Cadre général - Définitions

1.1.1 Définition du projet

Le débat sur les questions énergétiques fait désormais partie du quotidien et va le rester pour plusieurs années, avec à la clé des choix politiques et de société qui auront une influence sur les 20 à 30 prochaines années : économies d'énergie, diminution des émissions de CO₂, augmentation du prix des énergies, remplacement des anciennes centrales nucléaires, construction de centrales à gaz, etc.

La chaleur terrestre est une source d'énergie quasiment inépuisable et l'énergie géothermique fait partie du paysage énergétique mondial depuis l'Antiquité en ce qui concerne l'utilisation de la chaleur, et depuis un siècle déjà pour la production d'électricité. En Suisse, des formes originales de l'utilisation des ressources géothermiques de basse température et de faible profondeur se sont bien développées depuis le milieu des années 1980. Notre pays est même un des *leaders* dans ce domaine avec notamment la plus forte densité des sondes géothermiques verticales par rapport à la superficie du pays.

Suite à l'intérêt rencontré en Suisse Romande par les études du potentiel géothermique des cantons de Vaud (PGV) et Fribourg (PGF), le Centre de recherche en géothermie de Neuchâtel (CREGE), qui d'ailleurs avait coordonné l'étude PGF, a préparé un projet intitulé « **Potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)** », et l'a soumis à la **Fondation ProTechno** pour une demande de financement en janvier 2007. Celle-ci a immédiatement montré son intérêt et a décidé de financer l'intégralité de ce projet. Cette étude a pu commencer en mai 2007, après avoir formé un groupe de travail composé de spécialistes provenant du réseau de compétences du CREGE.

Le présent rapport contient les résultats des investigations effectuées dans le cadre du projet **Potentiel Géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)**, en vue d'évaluer le potentiel géothermique exploitable sur le territoire cantonal, par quatre technologies particulières. Il s'agit des *sondes géothermiques verticales (SGV)*, des échangeurs en géostructure, appelées *géostructures énergétiques (GEN)*, des *nappes phréatiques (NAP)* et des *aquifères profonds (APR)*.

1.1.2 Exploitation des ressources géothermiques – But de l'étude

On entend par exploitation géothermique la valorisation du potentiel calorifique du sous-sol en dessous de la surface de la Terre, indépendamment de la provenance de la chaleur qui s'y trouve. Suivant leur nature et leur gisement, les ressources géothermiques sont valorisées en ayant recours à des techniques d'exploitation variées. Ainsi on distingue au moins dix modes d'applications géothermiques différents pouvant être exploitées en Suisse (Fig. 1.1) :

- Collecteurs horizontaux enterrés et corbeilles énergétiques
- **Sondes géothermiques verticales (SGV)**
- Champs de sondes géothermiques (≈ 5 à > 50 SGV)
- Sondes géothermiques profondes (> 500 m)
- **Géostructures énergétiques (GEN, pieux de fondation, dalles, parois)**
- **Nappes phréatiques (NAP, aquifères de faible profondeur < 50 m)**
- Sources d'eaux chaudes
- Eaux de drainage des tunnels

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- **Aquifères profonds (APR, aquifères > 300 m)**
- Systèmes géothermiques stimulés (EGS, géothermie de grande profondeur).

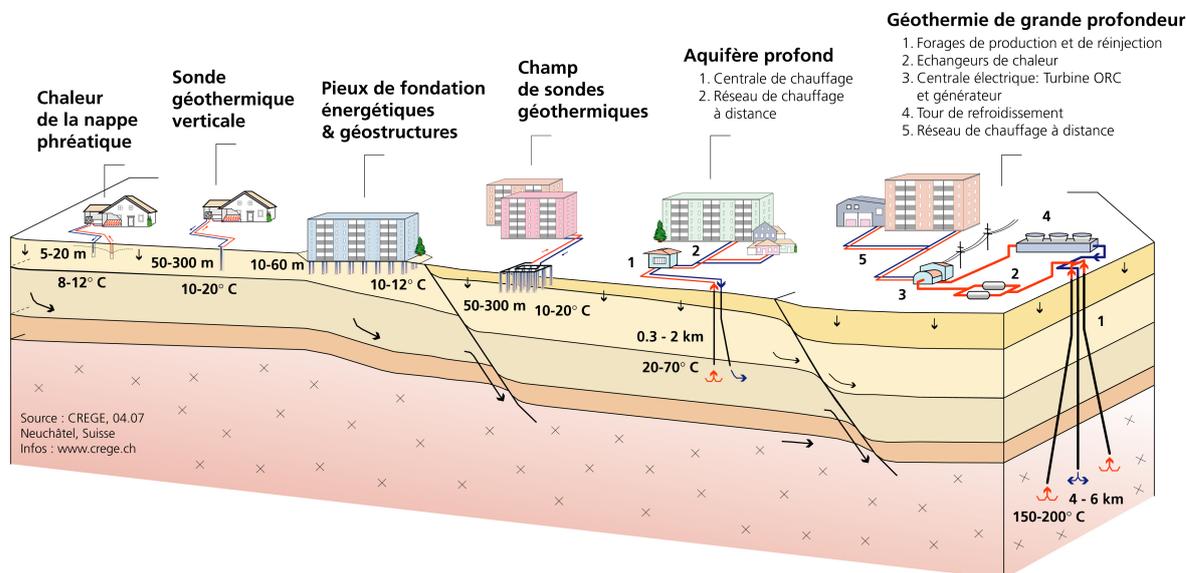


Figure 1.1. Différents types d'exploitation de la chaleur de la Terre

Ces techniques sont aujourd'hui bien connues et utilisées de manière très diverse selon les régions et les pays.

Dans le cadre de ce projet qui a pour but de réaliser l'évaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN), quatre de ces techniques d'exploitation ont été retenues, en fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques qui prévalent dans le canton.

- **Les sondes géothermiques verticales (SGV)**, qui ont débuté il y a une vingtaine d'années et qui connaissent un véritable boom en Suisse depuis dix ans, essentiellement pour le chauffage de villas familiales, mais également pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments de plus grande taille (champ de SGV). Elles représentent une technologie sûre avec un taux de succès très élevé, pour un coût concurrentiel avec les autres énergies de chauffage sur le marché.
- **Les géostructures énergétiques (GEN)**, dont le concept a été lancé il y a environ 15 ans, sont de plus en plus utilisées, surtout dans le nord du pays. Principalement, il s'agit de pieux de fondation équipés en échangeurs de chaleur.
- **Les nappes phréatiques (NAP)**, qui représentent une source de chaleur et de froid à faible profondeur, possèdent un potentiel important, bien qu'elles soient en concurrence avec l'utilisation pour l'eau potable et leur usage est très variable d'une région à l'autre du pays.
- **Les aquifères profonds (APR)**, dont l'exploitation a débuté en Suisse il y a une vingtaine d'années, représentent une ressource encore peu connue, en raison du faible nombre de forages profonds existants. A ce jour moins de dix réalisations utilisent ce type de ressource.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

A l'exception des sondes géothermiques verticales déjà très développées, les trois autres formes d'utilisation de la géothermie présentent un intérêt certain, mais leur mise en valeur demande du temps et une connaissance préalable des potentialités.

A l'heure actuelle, deux modes d'exploitation de la géothermie sont pratiqués à l'échelle du territoire du canton de Neuchâtel: les sondes géothermiques verticales et l'exploitation thermique des nappes phréatiques. Par rapport aux cantons voisins, ces techniques connaissent un développement modéré. Récemment, les autorités cantonales ont décidé de procéder à l'optimisation du développement des sondes géothermiques en créant une carte des sites d'implantation possible des sondes géothermiques.

1.2 Démarche de l'étude

1.2.1 Contexte énergétique - Distribution et consommation

En ce qui concerne les GEN et les SGV, le potentiel de consommation est donné par les caractéristiques du bâtiment ou de la construction. La consommation et/ou l'échange d'énergie se fait sur place et il n'y a donc pas de réseau de transport à distance à prévoir. En revanche, des réseaux de distribution sont nécessaires pour livrer la chaleur produite par les installations APR. Dans les cas de grosses installations de type champ de SGV ou NAP, un petit réseau de distribution doit être envisagé pour distribuer la chaleur ou le froid entre plusieurs bâtiments, locatifs ou lotissement de villas.

Pour livrer aux consommateurs la chaleur produite, ces installations doivent être raccordées sur un réseau de chaleur, si possible existant et disposant de capacité libre, pour réduire les coûts d'investissement. Si c'est le cas, la problématique du niveau de température de livraison doit être prise en compte très tôt dans le projet. En effet, les réseaux anciens délivrent de la chaleur à haute température ($> 80^{\circ}\text{C}$), alors que des APR peuvent fournir de la chaleur dès 40 ou 50°C .

Dans le canton de Neuchâtel, le nombre et la taille des réseaux de distribution de chaleur sont limités. Il s'agit de petits réseaux locaux, associés à des installations de production de faible puissance, ne dépassant pas l'ordre de quelques mégawatts.

Il ressort de ce qui précède qu'il est actuellement difficile de lier géographiquement une installation de production de chaleur géothermique à un réseau de distribution existant. En conséquence, l'étude du potentiel des installations APR a été concentrée sur les ressources géothermiques, avec prise en compte des zones potentielles de consommation, situées dans les principales zones urbaines du canton.

1.3 Présentation du rapport

Le plan retenu pour le rapport est le suivant. La présente introduction (Chapitre 1) est suivie par quatre chapitres traitant respectivement les quatre domaines cibles.

Le chapitre 2 est consacré à l'implantation des sondes géothermiques verticales (SGV), le chapitre 3 aux géostructures énergétiques (GEN), le chapitre 4 à l'exploitation thermique des nappes phréatiques (NAP) et le chapitre 5 aux ressources en aquifères profonds (APR). Chacun de ces chapitres forme un tout, avec des conclusions et des recommandations spécifiques. Du point de vue de la présentation, les quatre chapitres suivent le même plan, c'est-à-dire une première partie rappelant brièvement l'état de développement de la technologie concernée, suivie de l'étude du potentiel, des conclusions et des références bibliographiques.

Le chapitre 6 synthétise les conclusions et les recommandations des quatre chapitres précédents.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Une annexe sous forme d'un volume séparé (vol. 2) contient l'essentiels des grands tableaux et figures du rapport.

1.4 Organisation de l'étude

Les études ont été réalisées par le Groupement PGN (Potentiel Géothermique du canton de Neuchâtel), composé de :

- **Dr. François-D. Vuataz**, Centre de Recherche en Géothermie (CREGE), Neuchâtel.
- **M. Marc Affolter**, hydrogéol. dipl. et **Dr. Bernard Matthey**, bureau B. Matthey Ingénieurs-Conseils S.A., Montezillon.
- **Mme Esther Peguiron**, géol. dipl., Centre de Recherche en Géothermie (CREGE) et Centre d'hydrogéologie (CHYN, Université de Neuchâtel) ; actuellement au bureau CSD à Porrentruy.
- **Dr. Charles Robert-Charrue**, Centre de Recherche en Géothermie (CREGE) ; actuellement au bureau Géologie opérationnelle, Court.
- **M. Jules Wilhelm**, Ingénieur-conseil, Centre romand de promotion de la géothermie (CRPG, Pully).

Les tâches et les responsabilités au sein du groupement PGN ont été réparties comme suit :

- François-D. Vuataz: Coordination et gestion du projet ; suivi et encadrement des quatre sections du projet et du travail de diplôme de E. Peguiron ; édition du rapport final.
- Marc Affolter et Bernard Matthey : Exploitation de la chaleur des nappes phréatiques (NAP) ; suivi et encadrement du travail de diplôme de E. Peguiron.
- Esther Peguiron : Implantation des sondes géothermiques (SGV) ; exploitation de la chaleur des nappes phréatiques (NAP) ; ce travail a notamment été effectué dans le cadre d'un diplôme postgrade en hydrogéologie du CHYN (Univ. de Neuchâtel).
- Charles Robert-Charrue : Ressources en aquifères profonds (APR).
- Jules Wilhelm: Potentiel des géostructures énergétiques (GEN).

Les personnes et organismes suivants ont également collaboré aux études :

- **Dr. Yves A. Brechbühler**, du Bureau Y. A. Brechbühler Ing. Cons. (Boudry) a collaboré à l'identification des secteurs comportant des zones constructibles à potentiel de géostructures et en a défini les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.
- **M. Pierrick Altwegg**, géol. dipl., Centre de recherche en Géothermie (CREGE, Neuchâtel) a réalisé la mise en pages et l'impression du rapport ainsi que la finition des illustrations.

Finalement, les travaux ont bénéficié de l'appui et des conseils de M. Jean-Luc Juvet, directeur du Service cantonal de l'énergie et de Mme Isabelle Butty du Service cantonal de la protection de l'environnement, qui ont été impliqués dès le début du projet, afin que les études engagées correspondent aux besoins et aux attentes du canton.

2. CONDITIONS D'IMPLANTATION DES SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES

2.1 Introduction

En Suisse, l'essor de la géothermie de basse énergie est important. Il s'agit notamment du pays où la densité de sondes géothermiques verticales (SGV) est la plus forte par km² (1 sonde par km²) avec un taux de croissance du nombre d'installations supérieur à 10 % par an (Rybach & Kohl, 2003). Cependant, les installations existantes sont implantées en majorité dans la molasse ou dans les sédiments quaternaires du Plateau. Les implantations sont nettement moins nombreuses dans les roches calcaires du Jura, dont la capacité à fournir de la chaleur est par conséquent moins bien connue. Dans le canton de Neuchâtel, environ 300 installations de chauffage alimentées par une ou plusieurs sondes géothermiques sont recensées à l'heure actuelle. Leur répartition est présentée sur la figure 2.1.

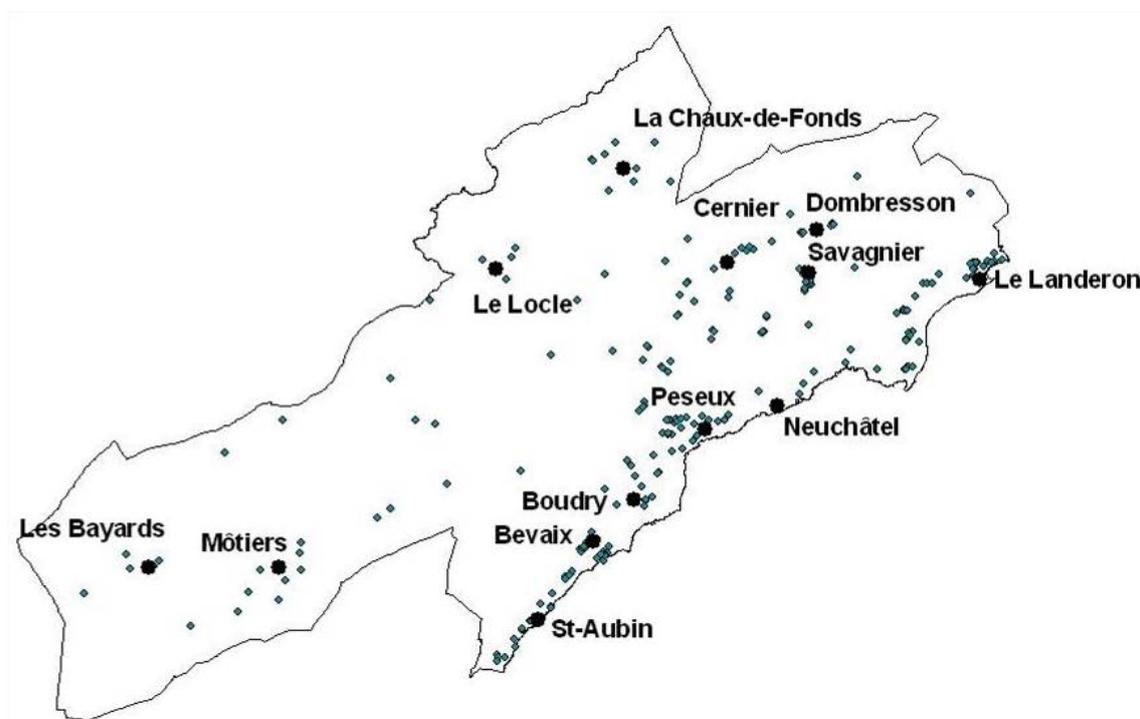


Figure 2.1. Répartition des forages pour sondes géothermiques verticales dans le canton de Neuchâtel. Données cartographiques du SITN et du SCPE © 2007.

Il s'agit du canton romand où le moins de sondes géothermiques sont installées. En comparaison, environ 5000 SGV sont implantées dans le canton de Fribourg et environ 3000 dans le canton de Vaud. Ce petit nombre de sondes géothermiques s'explique notamment à cause du prix élevé de l'électricité qui existait dans le canton de Neuchâtel comparativement à d'autres cantons; ce qui augmente le prix de l'exploitation de la pompe à chaleur (PAC). D'autre part, les conditions d'implantation parfois méconnues du canton de Neuchâtel, mais pas forcément défavorables, notamment au niveau géologique (type de sous-sol) ou morphologique (altitude moyenne du

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

terrain), provoquent certainement une réticence de la part des installateurs ou des propriétaires. Finalement, des raisons d'ordre politique (autorisations nécessaires, subventions) et d'aménagement du territoire retiennent également la croissance des sondes géothermiques verticales dans le canton.

Le but de ce chapitre est de mettre en évidence les possibilités d'exploitation de la géothermie au moyen des SGV dans le canton de Neuchâtel, en tenant compte des caractéristiques cantonales. Il a été réalisé pour pouvoir être utilisé comme outil d'aide à la décision pour les autorités qui délivrent les autorisations, mais également pour permettre d'optimiser la longueur et le rendement thermique des SGV.

Les points suivants ont plus particulièrement été abordés dans le présent travail :

- Influence de mauvaises conditions géothermiques liées à la présence d'épaisses couches de calcaire non saturées sur le rendement des SGV.
- Estimation de l'augmentation de la longueur des SGV en fonction de la baisse de température moyenne annuelle avec l'altitude.
- Détermination des différences de rendement de plusieurs SGV en fonction de l'espacement entre elles.
- Evaluation des performances et des coûts de plusieurs sondes courtes ou d'une sonde longue.

Ce chapitre a la structure suivante :

- Le paragraphe 2.2 présente une description complète des systèmes d'exploitation de la géothermie par des SGV, des principes de dimensionnement, du comportement à long terme de ces systèmes et des risques environnementaux qui y sont associés.
- La démarche et les méthodes qui ont été utilisées sont données au paragraphe 2.3.
- Les résultats complets sont présentés au paragraphe 2.4.
- Le chapitre se termine par une synthèse des résultats et une conclusion (paragraphe 2.5).

2.2 Sondes géothermiques verticales

2.2.1 Description des systèmes

Les sondes géothermiques verticales (SGV) sont des échangeurs de chaleur, c'est-à-dire des systèmes qui permettent d'extraire la chaleur des roches du sous-sol (Fig. 2.2). Elles sont composées d'une ou de plusieurs sondes en polyéthylène, en forme de U, ou coaxiale dans lesquelles un fluide caloporteur circule en boucle. Le fluide se réchauffe en descendant en profondeur et ramène la chaleur du sous-sol ainsi prélevée au système de chauffage situé en surface. Actuellement, les sondes utilisées le plus fréquemment sont de type double-U, composées de deux tubes en U, d'un diamètre de 32 ou de 40 mm suivant la profondeur de l'échangeur. La sonde est installée dans un forage d'un diamètre de 10 à 15 cm ; l'espace entre la sonde et la paroi du forage est rempli à l'aide de coulis constitué la plupart du temps d'un mélange de ciment et de bentonite, afin de favoriser les échanges thermiques avec le sous-sol.

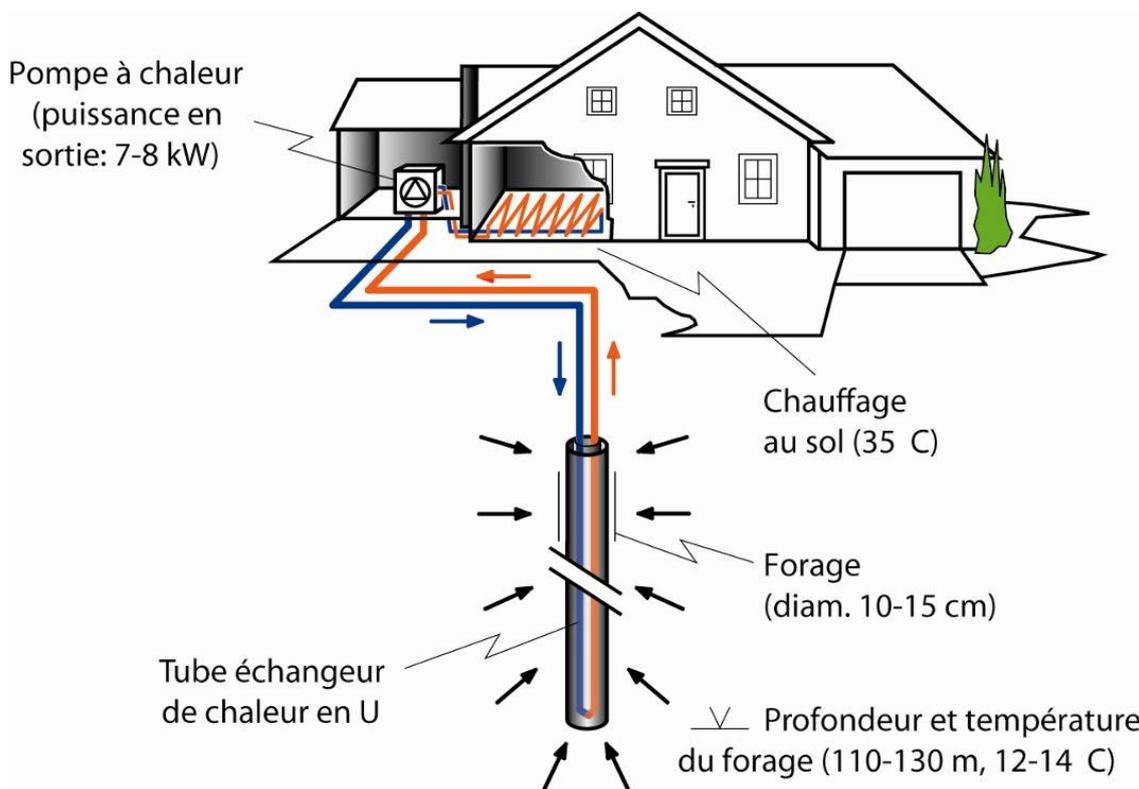


Figure 2.2. Schéma d'une sonde géothermique verticale alimentant une villa (CREGE, 2004).

Les SGV exploitent une source de chaleur à faible température : leur profondeur varie généralement de 100 à 200 m, ce qui représente des températures de 12 à 15 °C au fond du forage. Elles sont couplées à une PAC, qui permet avec un apport modéré d'énergie électrique d'augmenter la température du fluide jusqu'à 35 °C environ pour des bâtiments neufs et bien isolés et de la transmettre à un système de chauffage à basse température (planchers chauffants).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Les SGV uniques ou doubles sont utilisées couramment pour chauffer et produire l'eau chaude sanitaire de villas ou de petites maisons locatives. Pour chauffer des bâtiments de grande taille, il est possible d'implanter des champs de sondes géothermiques comprenant entre 10 et 100 sondes, en général espacées de 5 à 10 m. On trouve également des sondes de moyenne profondeur (250 à 400 m) et exceptionnellement des sondes très profondes, par exemple à Weggis (2300 m) et à Weissbad (1213 m).

Les SGV peuvent également être utilisées pour produire du froid en été, le fluide caloporteur récupère alors le froid injecté dans le sous-sol pendant l'hiver et le transmet directement au fluide circulant dans le système de chauffage sans passer par la PAC. Cette technique de rafraîchissement naturelle est doublement avantageuse puisqu'elle permet d'éviter une consommation importante d'énergie électrique (climatiseur) et de remettre de la chaleur dans le terrain en été, ce qui favorise la durée de vie à long terme de l'installation. Cette technique de rafraîchissement appelée "geocooling" ou "freecooling" est utilisée principalement pour des grands bâtiments vitrés ou contenant des sources de chaleur parasite (ordinateurs, machines, atelier,...). Pour des grandes demandes de froid en été, il est également possible de faire fonctionner la PAC à l'envers, ce qui améliore le rendement du rafraîchissement mais nécessite une consommation d'énergie électrique supplémentaire.

Pour fonctionner, un chauffage par SGV nécessite un apport d'énergie externe (électricité le plus souvent) d'une part pour la PAC, mais également pour alimenter une pompe de circulation utilisée pour faire circuler le fluide caloporteur dans la sonde.

Une norme SIA sur les sondes géothermiques a été préparée depuis deux ans par un groupe de travail sous l'égide de l'organisation faîtière Géothermie.ch (SIA, 2008 version provisoire en Allemand). Elle comprend tous les aspects techniques relevant de la construction des sondes géothermiques verticales. D'autre part, sous l'égide de l'Office fédéral de l'environnement, une directive sur l'utilisation de la chaleur du sol et du sous-sol a été rédigée (OFEV, 2007). Il s'agit principalement des recommandations légales vis-à-vis de la protection du sous-sol et des eaux souterraines lors de la construction d'installation de géothermie de faible profondeur. Ces deux documents seront disponibles et publiés en français dès 2009.

2.2.2 Dimensionnement des sondes géothermiques verticales

Le fluide caloporteur extrait la chaleur du sous-sol de manière radiale ; ceci crée un abaissement de la température du sol aux alentours de la sonde (cône thermique). Cette variation de température induit une déviation des lignes du flux géothermique qui sont dirigées vers la sonde (Fig. 2.3, Rybach, 2001).

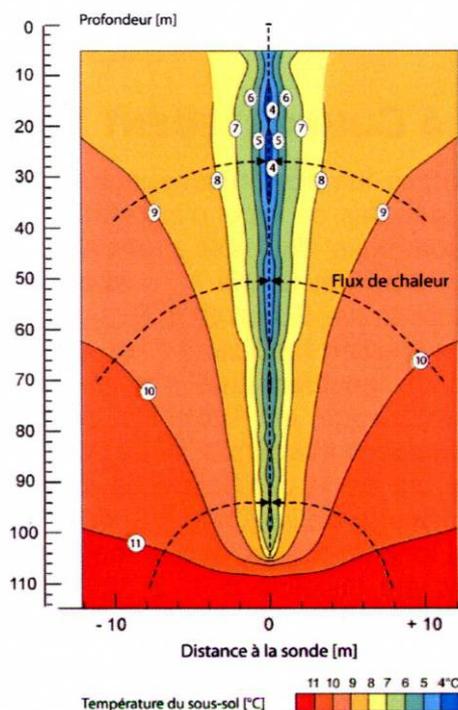


Figure 2.3. Déviation du flux de chaleur normalement vertical dans le sous-sol, liée à la présence d'une sonde géothermique verticale de 100 m (Rybach 2001).

Pour une longueur de sonde donnée, la taille du cône thermique dépend de la conductivité thermique du terrain, de la quantité de chaleur annuelle prélevée par la sonde et de l'importance de la recharge par le flux géothermique. Si la conductivité thermique du terrain est faible, le cône sera de taille restreinte, mais l'abaissement de température sera très important. Ces paramètres sont regroupés dans une seule valeur : la puissance d'extraction, qui est la quantité d'énergie qu'il est possible d'extraire pour un type de roche et une durée d'exploitation annuelle donnés, pour un flux géothermique de 0.07 W/m^2 (Tabl. 2.1).

Tableau 2.1. Puissance d'extraction recommandée pour différents types de sous-sol et pour une durée d'utilisation de la pompe à chaleur de 1800 h/an (chauffage uniquement) ou de 2400 h/an (chauffage et production d'eau chaude sanitaire) (VDI, 2001).

Type de sous-sol	Puissance d'extraction [W/m]	
	1800 h/an	2400 h/an
Valeurs générales		
Sédiment sec ($\lambda < 1.5$ W/mK)	25	20
Sédiment saturé ou roche ($\lambda < 1.5-3.0$ W/mK)	60	50
Roche ($\lambda > 3.0$ W/mK)	84	70
Valeurs individuelles		
Gravier, sable sec	< 25	< 20
Gravier, sable saturé	65-80	55-65
Gravier, sable, avec un écoulement d'eau souterraine important	80-100	80-100
Argile, limon	35-50	30-40
Calcaire massif	55-70	45-60
Grès	65-80	55-65
Granite	65-85	55-70
Gneiss	70-85	60-70
Basalte	40-65	35-55

Le paramètre qui a le plus d'influence est la conductivité thermique du terrain choisi pour implanter la SGV. Il peut être déterminé sur la base de valeurs prises dans la littérature (Tabl. 2.2), sur la base d'abaques (Fig. 2.4), mais également à partir de tests de terrain.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Tableau 2.2. Conductivité thermique et capacité calorifique de différents matériaux et milieux (synthèse des normes VDI (2001) et des documents SIA D025, D0136, D0179).

Type de milieu	Densité [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]	Capacité calorifique [MJ/m ³ K]
Air sec	0.0012	0.02 – 0.024	0.0010 – 0.0012
Eau	1	0.59	4.15 – 4.19
Gravier sec	2.7 – 2.8	0.3 – 0.5	1.2 – 1.6
Gravier saturé	2.7	2.5 – 3.3	2.2 – 2.4
Sable sec	2.6 – 2.7	0.3 – 0.8	1.0 – 1.6
Sable saturé	2.6 – 2.7	1.7 – 5.0	2.2 – 2.9
Limon/argile sec	-	0.2 – 1.0	0.3 – 1.6
Limon/argile saturé	-	1.2 – 2.3	2.1 – 3.4
Marnes	2.5 – 2.6	1.5 – 3.5	1.0 – 2.5
Moraine	-	1.0 – 2.5	1.5 – 2.5
Calcaire	2.6 – 2.7	2.5 – 4.0	2.1 – 2.4
Marbre	2.5 – 2.8	1.3 – 3.1	2.0
Grès	2.2 – 2.7	1.3 – 5.1	1.6 – 2.8
Granite	2.4 – 3.0	2.1 – 4.1	2.1 – 3.0
Gneiss	2.4 – 2.7	1.9 – 4.0	1.8 – 2.5
Basalte	2.6 – 3.2	1.3 – 2.3	2.3 – 2.6

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

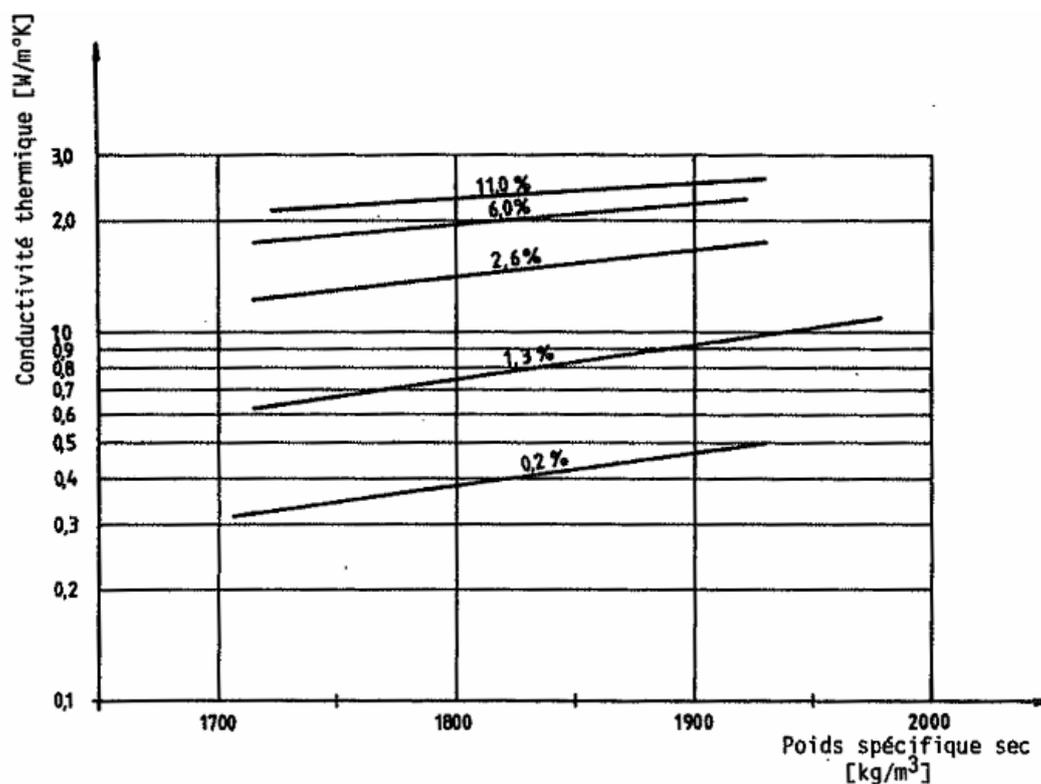
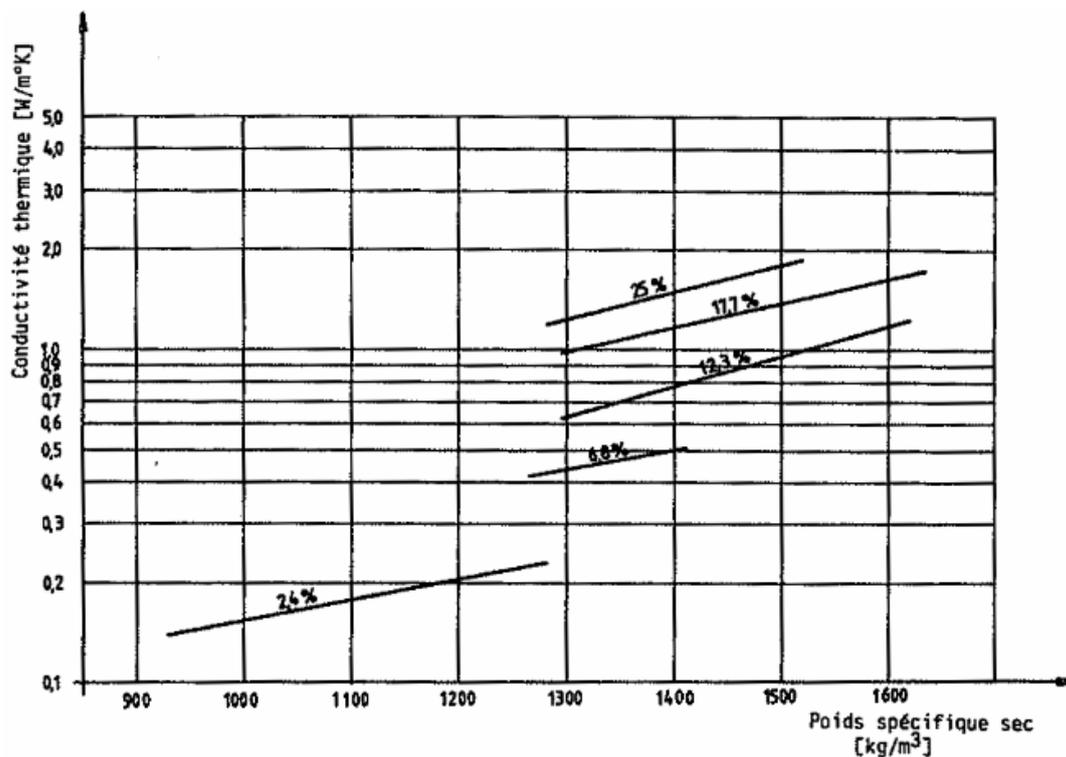


Figure 2.4. Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité apparente à sec pour un sol argilo-limoneux (en haut) et sableux (en bas). Les pourcentages correspondent à la teneur en eau du sédiment (SIA 1988).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Les tests de terrains permettant de déterminer la conductivité thermique du sous-sol sont appelés tests de réponse thermique et sont réalisés dans la sonde géothermique terminée. Ils permettent ainsi d'avoir une valeur précise de la conductivité thermique effective sur l'ensemble du forage, par opposition à la conductivité thermique réelle d'un échantillon de roche, mesurée en laboratoire. Le test de réponse thermique tient compte de tous les facteurs locaux (failles, circulation d'eau souterraine, changement de lithologie, etc.). Le principe du test est d'injecter de la chaleur (ou du froid) dans le sous-sol à débit constant et de mesurer la température de sortie du fluide. La relation entre la température et le log du temps est linéaire et inversement proportionnelle à la conductivité thermique effective :

$$\lambda_{eff} = \frac{Q}{4\pi Lk} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

où Q est le débit d'injection de chaleur ou de froid [m^3/s], L la longueur de l'échangeur [m] et k la pente de la droite de la température en fonction du log du temps.

Malgré des développements récents (Mattson et al. 2007 et Sanner et al. 2007), les tests de réponse thermique nécessitent un matériel relativement important et demandent plusieurs jours de mesures. Leur coût étant de plusieurs milliers de francs, ils ne sont en général réalisés que pour les champs de sondes.

Pour le dimensionnement d'une SGV, les directives suisses (SIA, 1996) et allemandes (VDI, 2001) distinguent trois cas :

Petite installation

Une seule sonde, d'une puissance maximale de 3 kW, utilisée uniquement en mode de chauffage et pour une durée d'utilisation de 2400 h/an au maximum. Dans ce cas, le calcul est rapidement effectué en divisant la puissance à extraire du sous-sol (W) par la puissance d'extraction spécifique (W/m) de la roche, donnée dans les tables des normes (Tabl. 2.1).

Installation de taille moyenne

Elle comprend une ou deux sondes, d'une puissance de 3 à 10 kW et pour une durée d'utilisation de 2400 h/an au maximum. Il existe un diagramme, basé sur les paramètres techniques de l'installation : demande thermique annuelle (Q_{th} , en MWh/an), puissance thermique de la pompe à chaleur (P_{th} , en kW) et facteur α dépendant de Q_{th} , du facteur de performance annuel de la pompe à chaleur (COP) et de l'énergie nécessaire pour les consommations auxiliaires (Q_{el} en MWh/an) :

$$\alpha = \frac{Q_{th}}{\frac{Q_{th}}{COP} - Q_{el}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Le diagramme tient également compte des paramètres du milieu : altitude de la sonde et conductivité thermique de la roche (λ , en $W/m/K$). Ce nomogramme convient pour des sondes uniques de 60 à 160 m ou pour un groupe de deux sondes de 60 à 100 m chacune (Fig. 2.5).

Installations plus grandes

Puissance maximale supérieure à 10 kW, pour une durée d'utilisation supérieure à 2400 h/an ou pour des champs de sondes, une étude et un calcul spécifique doivent être réalisés pour chaque cas.

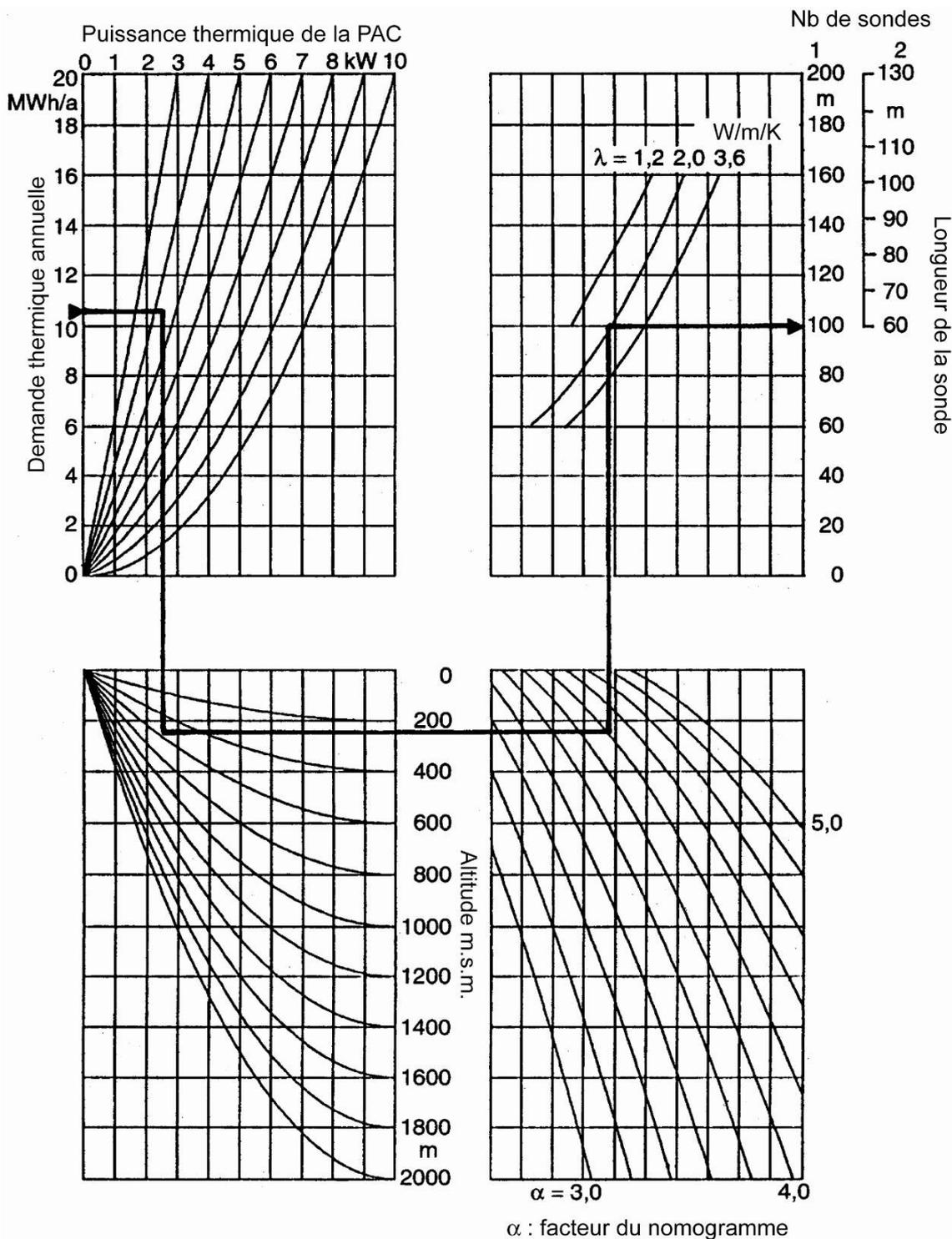


Figure 2.5. Nomogramme pour le dimensionnement de sondes géothermiques verticales (VDI, 2001).

Dans les cas où une nappe d'eau souterraine doit être protégée et la profondeur autorisée pour le forage est limitée, deux sondes peuvent être installées à la place d'une. La longueur cumulée des deux devra être un peu plus grande que celle de la sonde unique, d'une part parce que la température atteinte à la base des forages est plus faible, d'autre part à cause de l'influence mutuelle des cônes thermiques des sondes qui diminue leur rendement thermique respectif. Dans ce cas, il

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

faut être attentif à ne pas positionner les sondes trop près les unes des autres, afin d'éviter une influence mutuelle significative, pouvant conduire dans le pire des cas au gel du terrain autour de la sonde et au dysfonctionnement de l'installation. La distance limite à partir de laquelle il n'y a plus d'influence dépend du terrain et de la durée de fonctionnement annuelle de la pompe à chaleur. Selon les auteurs, on trouve des valeurs différentes : de manière pragmatique, on donne une valeur de 15 m (Signorelli et al., 2004), ou de manière absolue la moitié de la longueur des forages pour Pahud (2002). Dans tous les cas, un espacement inférieur à 5 m risque de conduire à un gel de l'installation durant les premiers hivers d'exploitation. A ce sujet, la documentation SIA D025 (1988) fournit un abaque permettant de déterminer l'espacement entre les sondes en fonction de la conductivité thermique du terrain (Fig. 2.6).

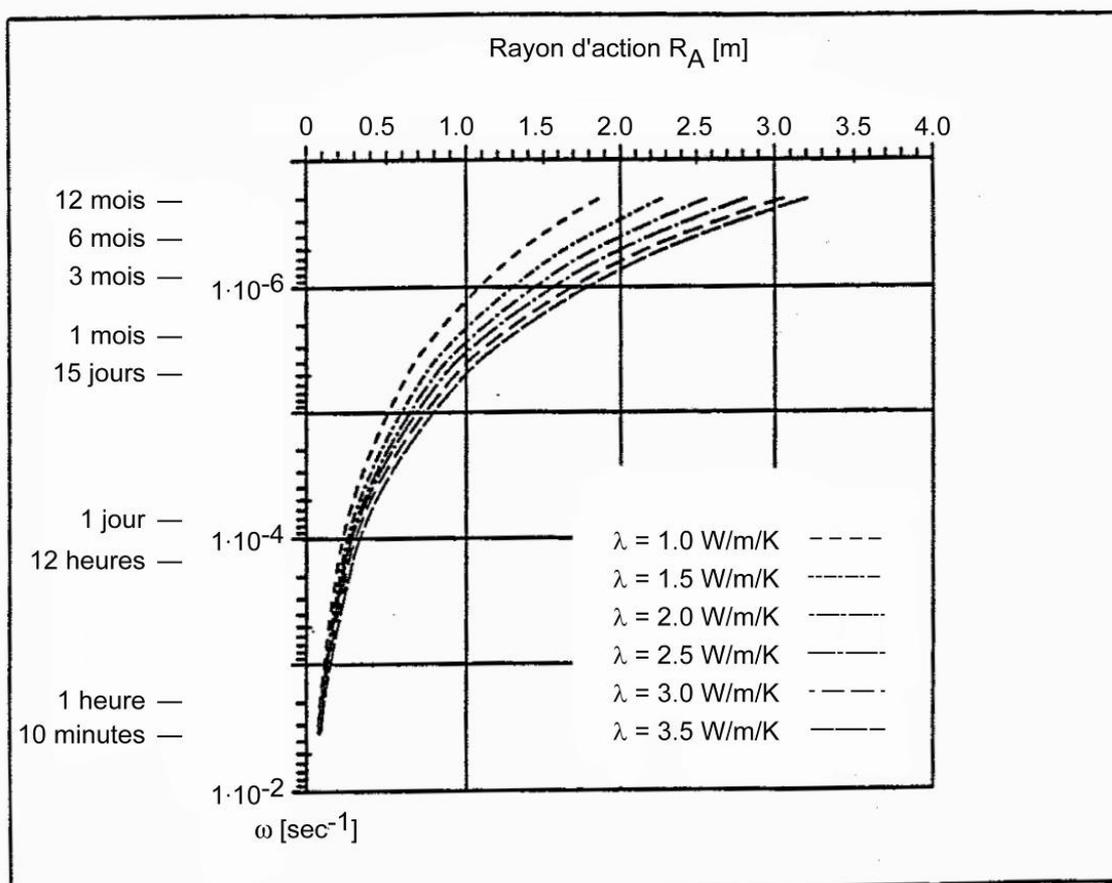


Figure 2.6. Rayon d'action de la sonde en fonction de la durée d'utilisation et de la conductivité thermique du terrain (SIA 1988).

Dans la pratique, une distance de 7 à 8 m est en général respectée ; dans le cas de champs de sondes, des distances de l'ordre de 5 à 6 m sont fréquemment utilisées, mais il s'agit alors d'une gestion saisonnière de la thermique d'un volume souterrain de roches avec une recharge estivale de chaleur. Dans le canton de Neuchâtel, une distance minimale de 5 m entre le forage et le bord de la parcelle est exigée afin de garantir un espace d'au moins 10 m entre deux installations individuelles.

2.2.3 Comportement à long terme des installations

Les premières sondes géothermiques ayant été implantées dans les années 1980, leur durée de vie réelle reste méconnue. La question se pose de savoir si cette énergie géothermique de faible température est renouvelable. Une étude a été menée sur une installation existante dans le but de

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

mettre en évidence l'évolution à long terme de ce genre de système. Les résultats de cette étude sont détaillés dans plusieurs articles (Eugster et al. 1999; Rybach, 2001). L'installation choisie est une sonde géothermique de 105 m de profondeur, alimentant une maison familiale à Elgg, près de Zurich. Des capteurs de températures ont été placés à 0.5 et 1 m de la SGV, à des profondeurs de 1, 2, 5, 10, 20, 35, 50, 65, 85 et 105 m. Deux campagnes de mesures ont été réalisées :

- depuis le début de l'exploitation en 1986, jusqu'en 1991 ;
- entre 1996 (10 ans d'exploitation) et 1998.

Sur la base de ces mesures et de données climatiques, les variations de température dans le sol liées à cette installation ont été extrapolées jusqu'en 2015, ce qui correspond à une durée d'exploitation de 30 ans. Ensuite, la recharge du terrain a été modélisée sur 30 ans.

Ces travaux ont permis de montrer que la température aux alentours de la sonde descend très rapidement au cours des premières années d'exploitation, puis se stabilise à 1 ou 2 °C en dessous de la température de base initiale. En règle générale, plus la sonde est longue, plus la baisse de température est forte et plus le temps jusqu'à la stabilisation est grand (Pahud, 2002).

Trois cycles de fonctionnement de la sonde peuvent être distingués :

1. cycle journalier : la sonde fonctionne au maximum de sa puissance puis s'arrête, pour maintenir une température de 20 °C dans le bâtiment ;
2. cycle annuel : la sonde prélève du chaud en hiver ; en été, le terrain se recharge ;
3. cycle de vie : période d'exploitation, suivie d'une période de recharge du terrain.

Plus le cycle de fonctionnement est court, plus la baisse de température est grande ; elle se propage cependant moins loin dans le sous-sol et est plus rapidement compensée dans le cas 1 que dans le cas 3 (Fig. 2.7).

Après l'arrêt de l'exploitation, la période de recharge nécessaire pour que le terrain retrouve une température proche de sa température naturelle est environ égale à la durée d'exploitation. De la même manière qu'au début du fonctionnement de l'installation, la température du terrain remonte rapidement les premières années après l'arrêt, puis de plus en plus lentement. Signorelli et al. (2004) ont montré que dans le cas de plusieurs sondes (6 sondes espacées de 7.5 m), la période de recouvrement est plus de deux fois supérieure à la période d'exploitation (Fig. 2.8).

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

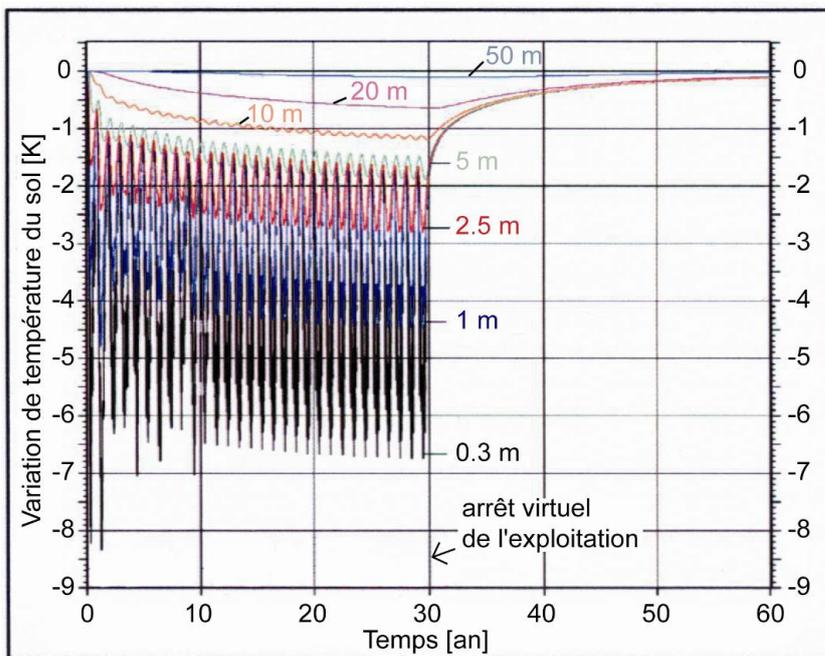


Figure 2.7. Mesures (années 0 à 10) et modélisation (années 10 à 60) des variations de température dans le sol à 50 m de profondeur et à 0.3, 1, 2.5, 5, 10, 20, et 50 mètres de distance d'une sonde géothermique verticale de 105 m. (Rybach 2001).

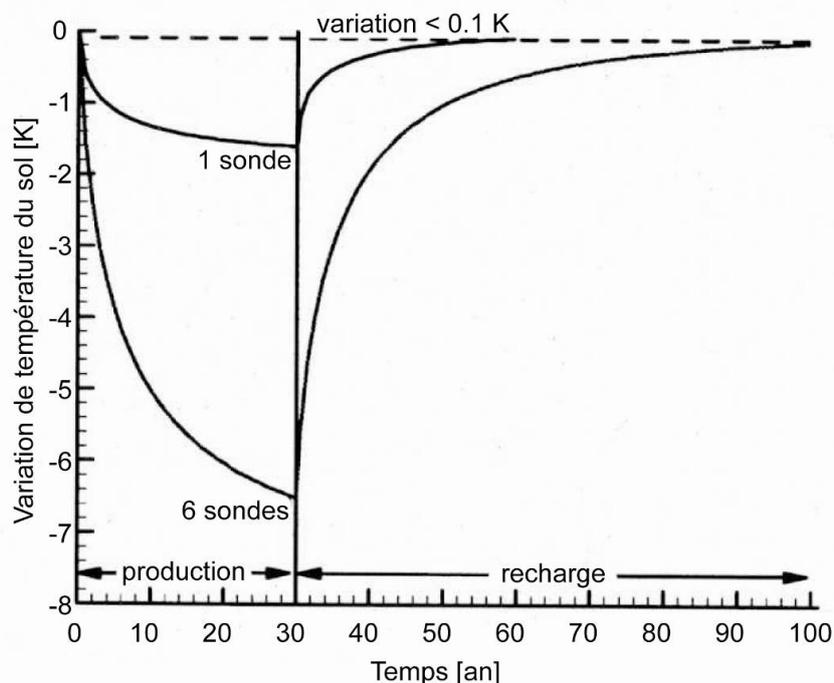


Figure 2.8. Variation de température dans le sol à une profondeur de 50 m et à 0.12 m de distance d'une sonde de 100 m de profondeur ou de six sondes de 100 m de profondeur espacées de 7.5 m (Signorelli et al. 2004).

2.2.4 Risques environnementaux liés aux sondes géothermiques verticales

Il existe trois risques principaux de dommage à l'environnement :

1. une fuite du fluide caloporteur à cause d'un défaut ou d'un dommage à la sonde ;
2. la mise en connexion de deux aquifères auparavant séparés par une couche imperméable ;
3. l'infiltration d'eau de surface ou de contaminants le long de la sonde, à cause d'un défaut de remplissage.

Les instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP, 2004) précisent qu'il est interdit d'installer des sondes géothermiques en zone S1 et S2 de protection des eaux souterraines. En zone S3, et dans les périmètres de protection des eaux, elles sont interdites sauf dérogation. Dans le reste du territoire, les contraintes générales visant à protéger l'environnement sont données dans la directive de l'OFEV (OFEFP, 1994) pour l'exploitation de la chaleur au moyen de sondes géothermiques fermées :

- Seuls les fluides caloporteurs figurant dans la liste des agents réfrigérants et des liquides caloporteurs éditée par l'OFEV peuvent être employés (propylène glycol, éthylène glycol, polyéthylène glycol, éthanol, méthanol, chlorure de calcium, chlorure de magnésium, chlorure de potassium, carbonate de potassium, acétate de potassium, formiate de potassium, chlorure de sodium et carbonate de sodium). Le circuit du fluide est surveillé par des témoins de pression qui signalent toute fuite.
- Le forage est interdit dans un site contaminé pour éviter les infiltrations d'eau polluée et dans les zones instables à cause du risque trop élevé de dommage à la sonde. Le sommet du forage doit être protégé afin d'éviter toute infiltration d'eau de surface le long de la sonde.
- Afin d'éviter un court-circuit entre plusieurs aquifères, la profondeur du forage est limitée selon les sites. Pour le canton de Neuchâtel, la carte des profondeurs autorisées pour les forages géothermiques a été réalisée récemment par le bureau Bernard Matthey Ingénieurs conseils SA (Annexe 2.1).
- Dans les zones à degré de risque élevé de radon, les sondes doivent impérativement être installées à l'extérieur des bâtiments (Fig. 2.9).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

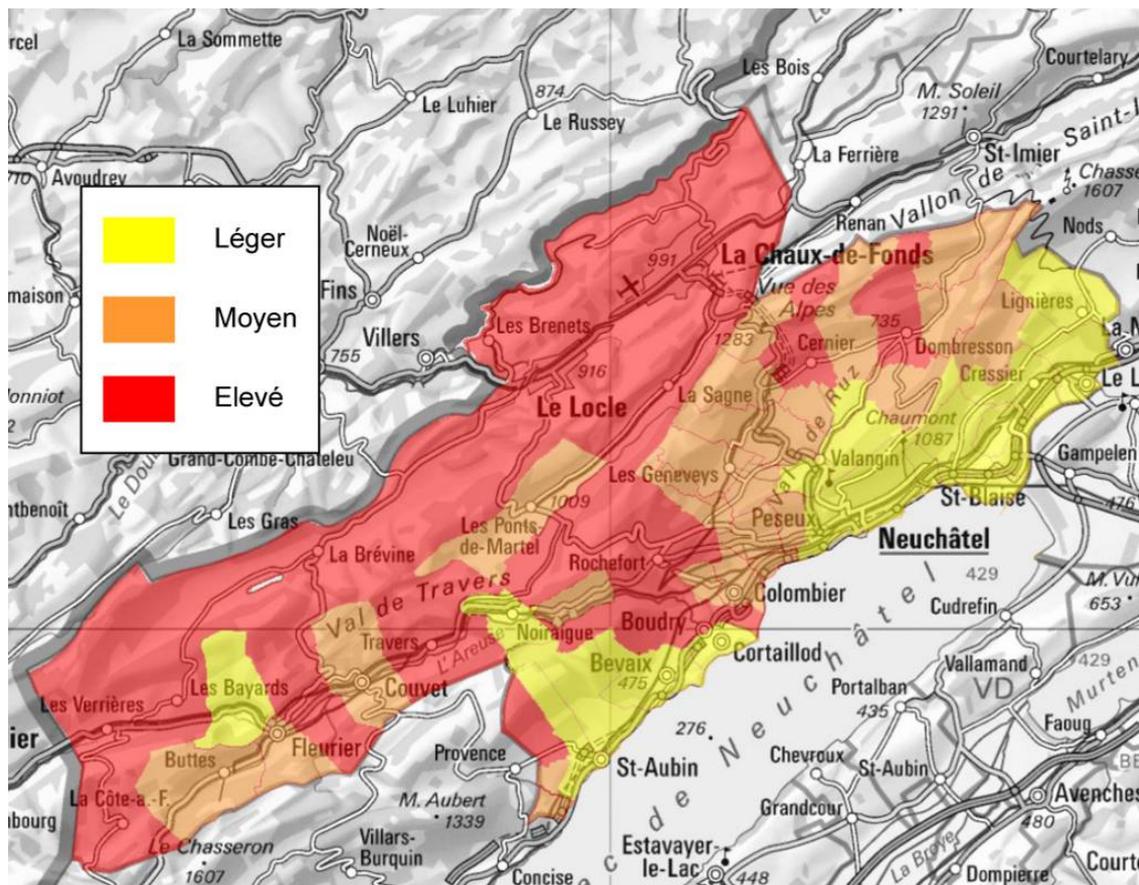


Figure 2.9. Degré de risque de radon pour le canton de Neuchâtel (extrait du guichet cartographique neuchâtelois sitn.ne.ch).

En cas de sous-dimensionnement et/ou de mauvaise exploitation de la sonde géothermique, les phénomènes de gel-dégel du terrain en profondeur peuvent conduire à des effondrements locaux pouvant créer des dommages sur les bâtiments situés à proximité, ou un effondrement et une rupture de la sonde elle-même dans le forage.

2.3 Méthodes d'évaluation des conditions d'implantations des sondes géothermiques verticales

2.3.1 Simulations et analyses de sensibilité

L'objectif du chapitre «dimensionnement des sondes géothermiques verticales » est de mettre en évidence les possibilités mais également les limites de l'exploitation de la chaleur du sous-sol au moyen de SGV dans le canton de Neuchâtel. L'altitude en moyenne plus élevée et la présence d'épais couches de calcaire parfois non saturées font que les conditions d'implantation y sont très différentes de celles rencontrées dans le Plateau suisse, où se construisent actuellement une grande partie des sondes géothermiques. De plus, la profondeur autorisée pour les SGV est souvent limitée sur le territoire cantonal, à cause de la présence de nappes karstiques captives. Par conséquent, il est parfois nécessaire d'implanter deux sondes moins profondes à la place d'une seule pour alimenter une maison familiale.

Pour évaluer l'influence de ces différentes particularités cantonales, des analyses de sensibilité et des simulations ont été réalisées avec le logiciel « Earth Energy Designer ». Lors d'une simulation, ce logiciel intègre environ 20 paramètres du site et de l'installation (Fig. 2.10). Une analyse de sensibilité sur tous les paramètres « secondaires » a tout d'abord été effectuée, afin de mettre en évidence l'influence de chacun de ces paramètres séparément sur le rendement thermique de la sonde. Les résultats des analyses de sensibilités sont présentés au § 2.4.1.

Une simulation plus détaillée a ensuite été réalisée pour chacune des particularités cantonales :

- Influence de mauvaises conditions liées à la présence d'épais couches de calcaire non saturées sur le rendement des SGV (§ 2.4.2).
- Estimation de l'augmentation de la longueur des SGV en fonction de la baisse de température moyenne annuelle avec l'altitude (§ 2.4.3).
- Détermination des différences de rendement de plusieurs SGV en fonction de l'espacement entre elles (§ 2.4.4).
- Evaluation des performances et des coûts de plusieurs sondes courtes ou d'une sonde longue (§2.4.5).

2.3.2 Description du logiciel utilisé

Les analyses de sensibilité et les simulations de sondes géothermiques verticales présentées dans ce travail ont été réalisées avec le logiciel "Earth Energy Designer" (EED). Il s'agit d'un logiciel fonctionnel, destiné aux spécialistes chargés de dimensionner les sondes. Ses algorithmes de calcul sont basés sur un modèle de simulation numérique en éléments finis (Superposition Borehole Model, SBM), développé à l'Université de Lund en Suède dans les années 1980 sur la base des travaux de G. Hellström et P. Eskilson notamment.

Ce modèle permet de trouver une solution analytique à de nombreuses configurations, obtenues en faisant varier les paramètres du système : caractéristiques du terrain et de la sonde, propriétés thermiques du bâtiment, durée d'exploitation du système.

Deux modes de simulation sont possibles :

- Pour une configuration donnée, calcul des températures minimales et maximales du fluide à la sortie de la sonde pour chaque année jusqu'à la fin de la durée d'exploitation.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Calcul de la longueur minimale nécessaire d'une sonde en fonction des paramètres de base de l'installation. Dans ce cas, l'utilisateur du logiciel doit fixer une contrainte au niveau de la température minimale atteinte par le fluide à la sortie de la sonde. Le logiciel calcule alors la longueur de sonde nécessaire afin que cette température soit atteinte lors de la dernière année d'exploitation. Pour cette limite de température, Hellström (2000) recommande de ne pas descendre au-dessous de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lors des pointes de chauffage.

Le logiciel EED ne permet pas de simuler des situations avec un écoulement d'eau souterraine ou avec une succession de couches géologiques aux propriétés thermiques différentes.

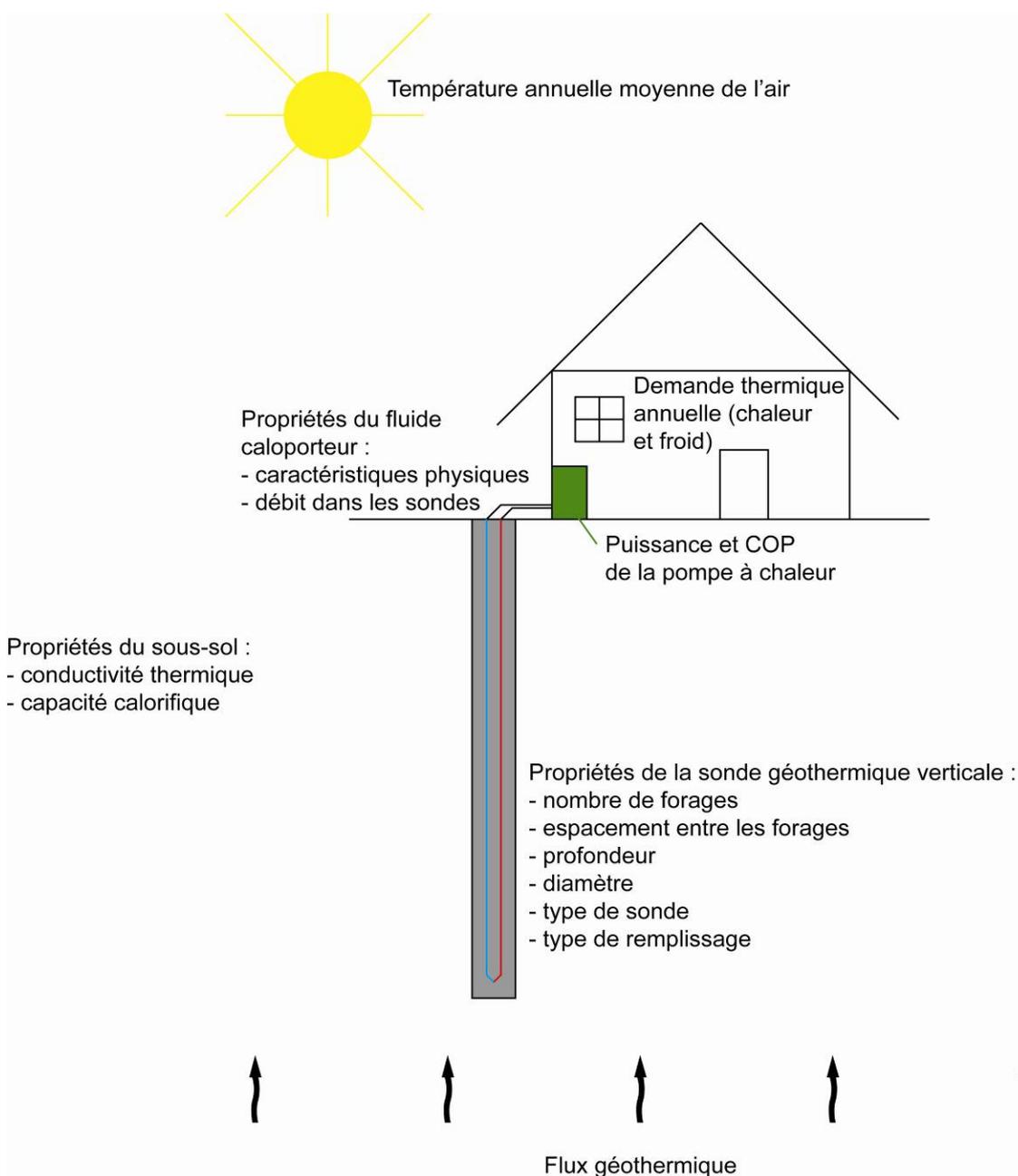


Figure 2.10. Paramètres pouvant être modifiés lors d'une simulation avec le logiciel EED.

2.4 Présentation et interprétation des résultats

2.4.1 Paramètres généraux du site et de l'installation

Comme mentionné au paragraphe précédent, le logiciel EED offre la possibilité de faire varier environ 20 paramètres liés à l'installation (Fig. 2.10). Le but de ce chapitre est de décrire chacun de ces paramètres et d'évaluer leur effet individuel sur le résultat de la simulation à partir d'une analyse de sensibilité.

Les demandes thermiques d'une maison familiale située à La Chaux-de-Fonds ont été utilisées pour effectuer ces analyses de sensibilité. Il s'agit de valeurs plausibles, correspondant à une maison familiale, d'une surface habitable de 150 m² environ, construite à la fin des années 1990 (Tabl. 2.3). Il faut cependant tenir compte du fait que ce cas n'est pas représentatif de tout le canton et n'a été choisi que pour déterminer l'influence individuelle des paramètres de l'installation sur le résultat de la simulation.

Tableau 2.3. Données thermiques de base du bâtiment à La Chaux-de-Fonds qui sont utilisées pour les analyses de sensibilité des paramètres fixes des simulations.

Paramètre	Valeur
Demande thermique annuelle	15'400 kWh/an
Puissance thermique de la PAC	7 kW
COP	4
Durée de fonctionnement annuelle	2200 h/an
Durée d'exploitation totale	30 ans

Paramètres de bases

Propriétés du site

CONDUCTIVITE THERMIQUE λ [W/m/K] ET CAPACITE CALORIFIQUE VOLUMIQUE CV [MJ/m³/K]

Si aucune valeur locale n'est disponible pour λ et CV, EED possède une base de données contenant des valeurs minimales et maximales ainsi qu'une valeur recommandée, pour de nombreux types de roches. L'influence de ces deux paramètres sur la longueur de la sonde a été modélisée pour les demandes thermiques du tableau 2.3. La longueur de sonde nécessaire augmente lorsque λ et CV diminuent. La conductivité thermique a cependant beaucoup plus d'influence que la capacité calorifique : la longueur de sonde nécessaire diminue d'en moyenne 135 % lorsque λ varie de 0.5 à 6.5 W/m/K, en revanche, elle ne diminue que de 20 % en moyenne lorsque CV varie de 0.5 à 5.0 MJ/m³/K (Fig. 2.11 et 2.12).

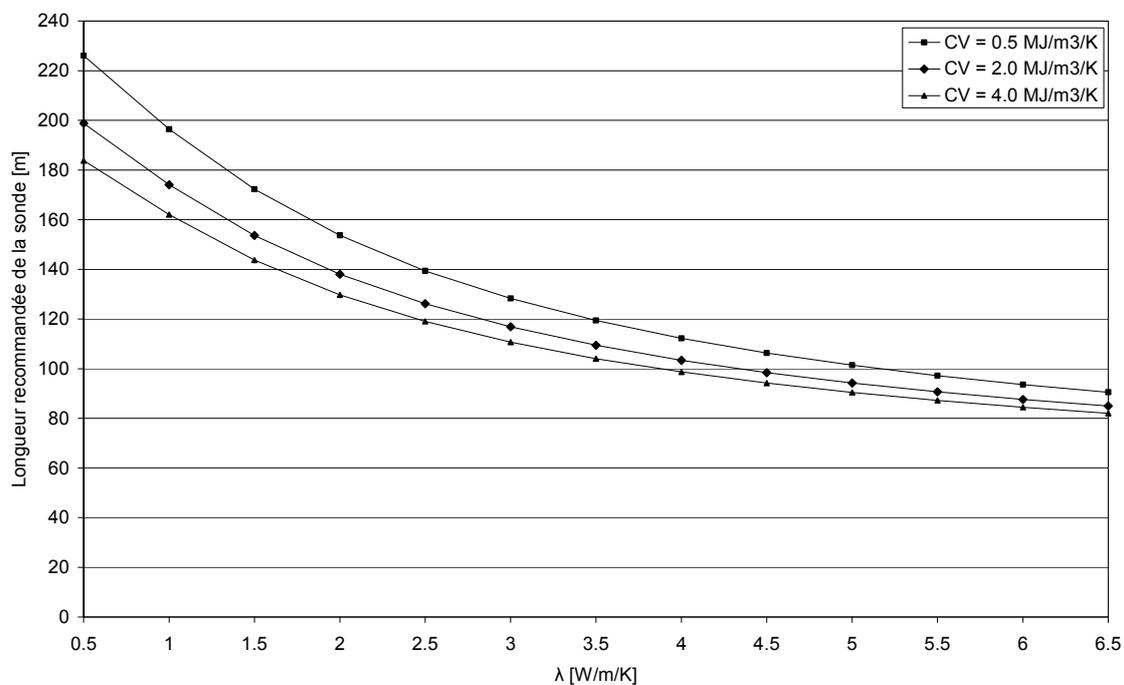


Figure 2.11. Influence de la conductivité thermique sur la longueur nécessaire de sonde, pour trois capacités calorifiques (0.5, 2.0 et 4.0 MJ/m³/K).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

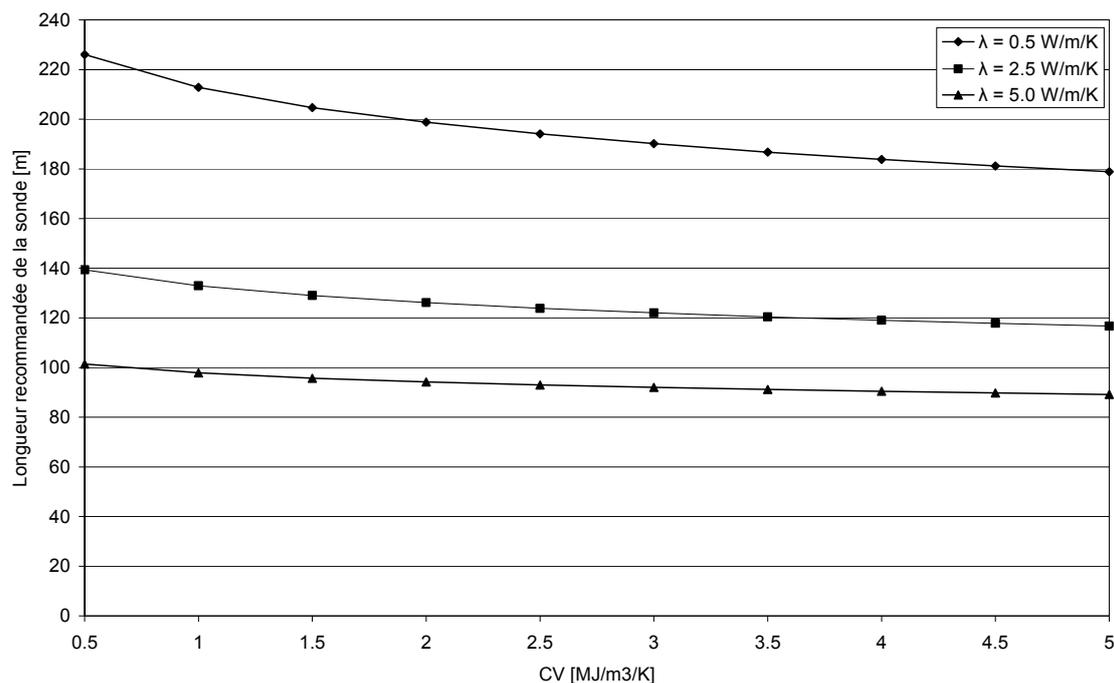


Figure 2.12. Influence de la capacité calorifique sur la longueur nécessaire de sonde, pour trois conductivités thermiques (0.5, 2.5 et 5.0 W/m/K).

Pour les deux paramètres, la relation avec la longueur recommandée de la sonde est de type logarithmique. Par conséquent, l'influence de λ et CV sur la longueur de la sonde est importante surtout lorsque la valeur de ces paramètres est faible (mauvaises propriétés thermiques du terrain).

Ce résultat est semblable à celui obtenu par Signorelli et al. (2002). Dans leur analyse de sensibilité réalisée avec le logiciel EWS (Erdwärmesonde), ils montrent que la capacité calorifique n'a que peu d'influence sur la puissance thermique produite (environ 0.12 kW gagnés pour une augmentation de CV de 0.2 kJ/m³/K) au contraire de la conductivité thermique (0.3 kW pour 0.2 W/m/K). Par conséquent, si CV peut être estimé grossièrement, il est préférable d'utiliser la valeur la plus précise possible de λ afin d'éviter des erreurs de dimensionnement, surtout pour des terrains aux mauvaises propriétés thermiques. Lors des simulations effectuées dans ce travail, les valeurs recommandées par EED pour un terrain calcaire ont été utilisées ($\lambda = 2.8$ W/m/K et CV = 2.3 kJ/m³/K).

TEMPERATURE ANNUELLE MOYENNE DE L'AIR [°C]

Elle a beaucoup d'influence sur le résultat de la simulation. Une simulation précise de son effet sur le dimensionnement d'une sonde est réalisée dans ce travail (voir paragraphe 2.4.3). Dans les autres simulations, la température moyenne annuelle de l'air dans la région d'implantation de la sonde a été choisie selon les données climatiques disponibles sur le site du canton de Neuchâtel (www.ne.ch).

FLUX GEOTHERMIQUE [W/m²]

Une valeur de 0.07 W/m² a été utilisée, sur la base de la carte du flux géothermique de la Suisse. Dans le cas de la simulation d'une implantation dans du calcaire non saturé, un flux nul a été imposé comme valeur extrême afin de modéliser l'absence locale de gradient géothermique (voir paragraphe 2.4.2).

Propriétés de la sonde géothermique verticale

TYPE DE SONDE :

Quatre types sont disponibles : U, double-U, triple-U ou coaxiale. La figure 2.13 présente le schéma d'une sonde double-U et d'une sonde coaxiale.

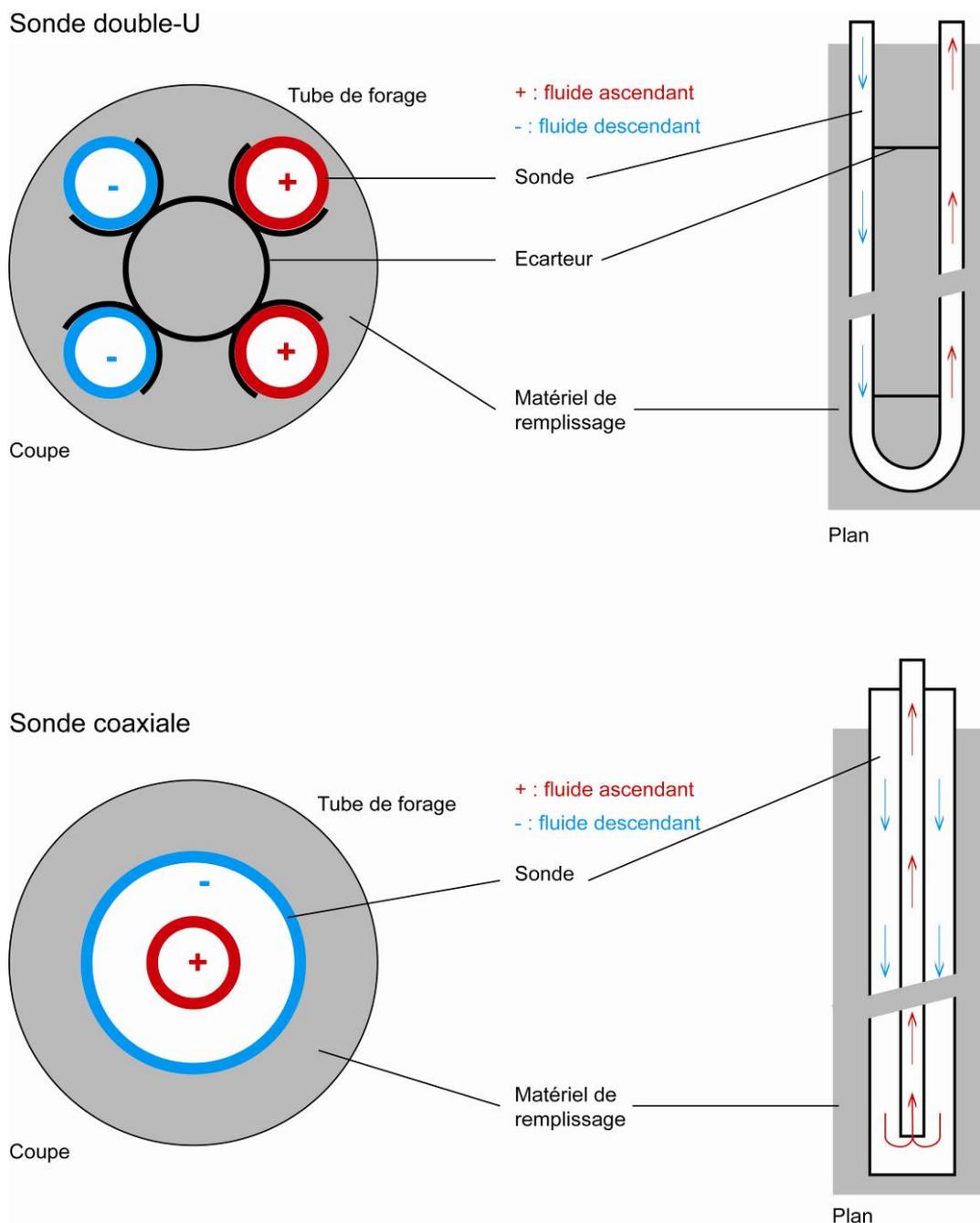


Figure 2.13. Schéma d'une sonde double U et d'une sonde coaxiale. Les écarteurs dessinés sur la sonde de type double-U servent à maintenir un écart maximal entre les tubes de la sonde, ce qui favorise le rendement thermique de l'installation.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

L'influence de chaque type de sonde a été testée sur la température du fluide à la sortie de l'échangeur et sur la longueur de la sonde, pour les données thermiques du tableau 2.3. Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.4. Influence du type de sonde sur la température du fluide et sur la longueur de la sonde. Les ΔT représentent la différence de température entre une configuration avec un type de sonde donné et la configuration avec une sonde en double-U, avec la longueur recommandée pour la sonde en double-U. Le nombre de Reynolds est calculé pour un débit total de 0.42 l/s à la sortie de la sonde.

Type de sonde	ΔT (jan) [°C]	ΔT (juil) [°C]	Nombre de Reynolds	Longueur recommandée [m]
Coaxiale	-0.75	-0.04	531	132
U	-1.51	-0.09	1904	144
Double-U	-	-	952	119
Triple-U	+0.21	+0.01	635	115

La sonde double-U est de loin la plus utilisée lors de l'installation des SGV, parce qu'elle est relativement facile à mettre en place, moins coûteuse qu'une triple-U pour une efficacité comparable et beaucoup plus efficace qu'une sonde coaxiale ou une sonde en simple-U. La sonde double-U a été utilisée pour toutes les simulations suivantes.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

CONFIGURATION

Détermine le nombre et la disposition des sondes de l'installation. EED offre 308 agencements possibles, pour 1 à 120 sondes (linéaire, L, L2, U, rectangle ouvert ou rectangle, figure 2.14).

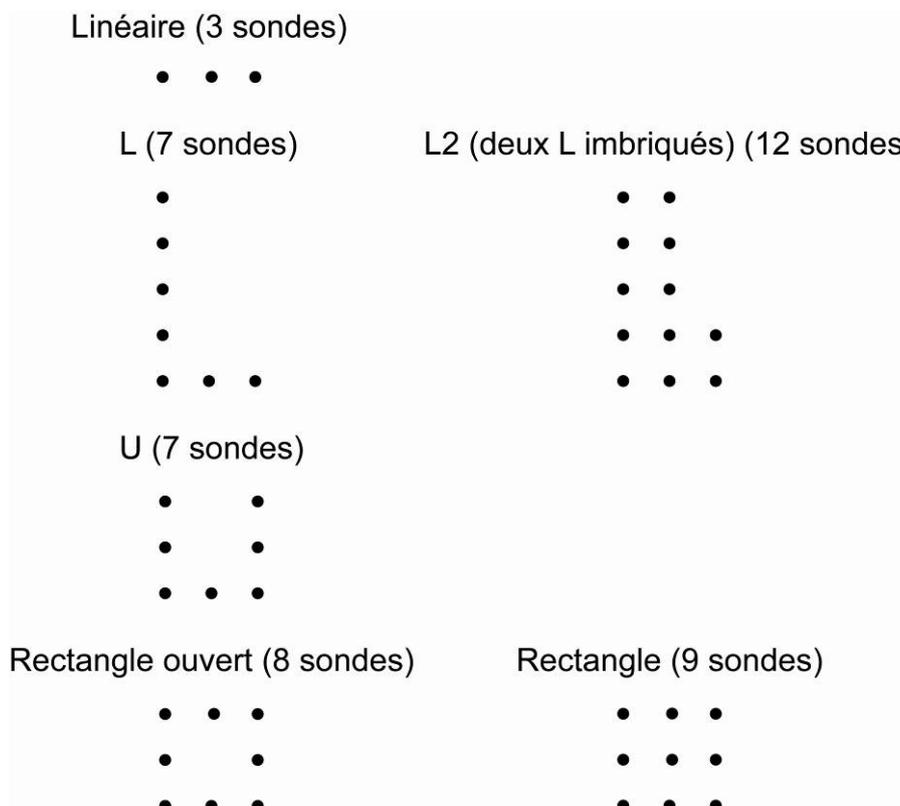


Figure 2.14. Exemples de différentes configurations disponibles dans EED.

S'il y a plusieurs sondes pour alimenter l'installation, elles peuvent être raccordées en série ou en parallèle à la PAC. Dans le premier cas, le débit total traverse toutes les sondes, contrairement au deuxième, où le débit est réparti également entre les sondes. Dans la pratique, les sondes sont en général raccordées en parallèle.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Dans ce travail, 6 sondes au maximum ont été modélisées. Pour une et deux sondes, il n'existe évidemment qu'une seule configuration possible. Pour 3, 4, 5 et 6 sondes, les dispositions de la figure ci-dessous sont disponibles (Fig. 2.15) :

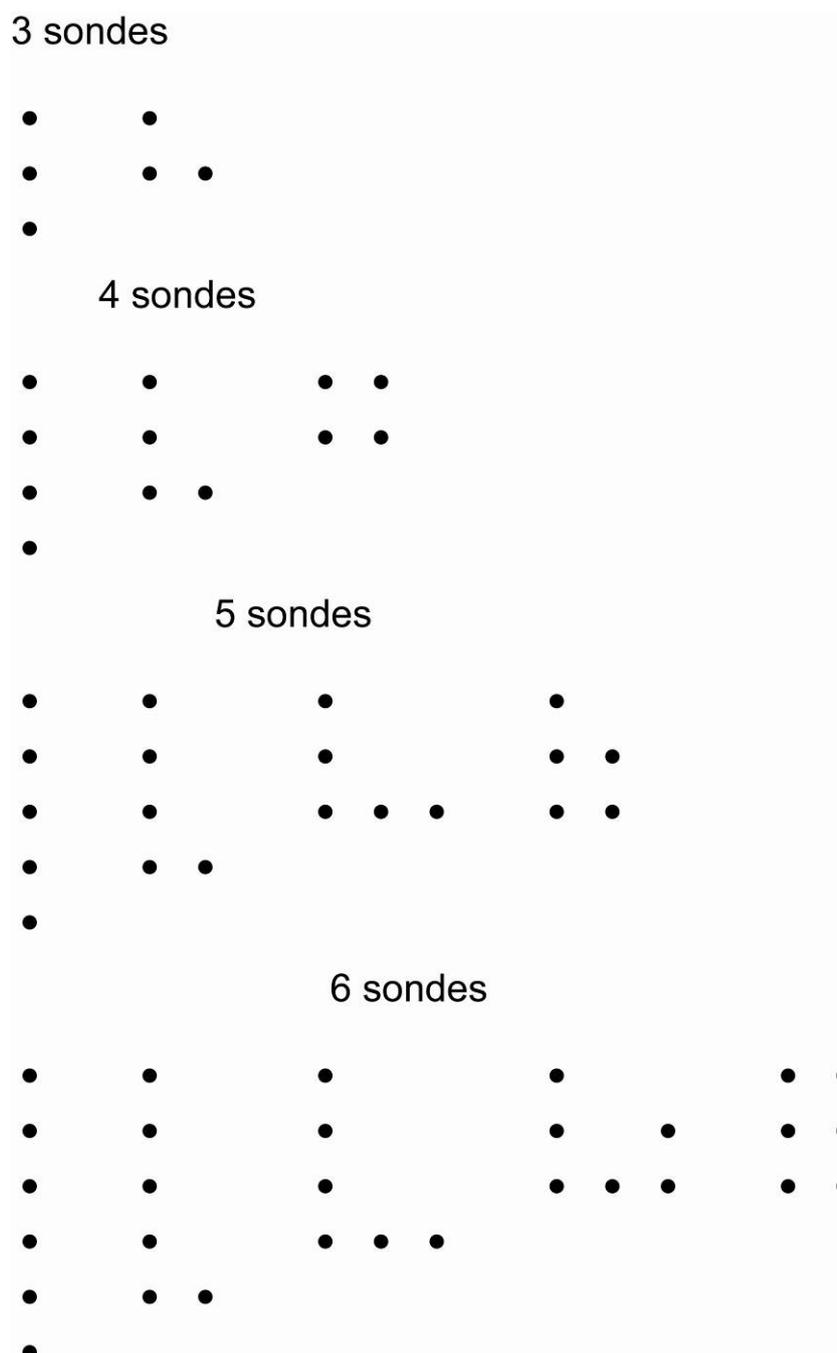


Figure 2.15. Différentes configurations proposées par EED pour 3 à 6 sondes.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Ces agencements ont également fait l'objet d'une analyse de sensibilité. Les différences de longueur de sonde recommandée et de température du fluide ont été calculées par rapport à la configuration linéaire et sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tabl. 2.5).

Tableau 2.5. Influence de la configuration des sondes sur la température et la longueur totale de sonde recommandée. Les ΔT représentent la différence de température entre une configuration donnée et une configuration linéaire, pour une longueur de sonde recommandée pour une configuration linéaire. Les ΔL sont la différence de longueur de sonde recommandée entre une configuration donnée et la configuration linéaire. Les sondes sont raccordées en parallèle.

Nb de sondes	Configuration	ΔT jan [°C]	ΔT juil [°C]	ΔL [m]
3	L	-0.08	-0.09	1
4	L	-0.07	-0.09	1
	Carré	-0.24	-0.28	3
5	L	-0.06	-0.07	1
	L	-0.08	-0.1	1
	U	-0.14	-0.17	2
6	L	-0.05	-0.06	1
	L	-0.07	-0.08	1
	U	-0.1	-0.12	1
	Rectangle	-0.33	-0.37	4

Les résultats obtenus montrent que la différence entre les configurations linéaires, en L et en U est faible, mais augmente légèrement lorsque les sondes sont disposées en carré ou en rectangle (Tabl. 2.5). Bien que ce paramètre n'ait que peu d'influence sur le rendement thermique de l'échangeur de chaleur, il est préférable de disposer les sondes de manière linéaire plutôt qu'en carré si la place à disposition est suffisante.

LONGUEUR DE LA SONDE [M]

Ce paramètre peut être défini par l'utilisateur ou optimisé par EED lors de la simulation.

ESPACEMENT [M]

Il s'agit de l'espacement entre les sondes lorsqu'il y en a plusieurs. L'influence de ce paramètre sur la longueur de la sonde a été simulée plus en détail au paragraphe 2.4.4. L'espacement accepté par le logiciel est compris entre 1/2 (au maximum) et 1/50 (au minimum) de la longueur de la sonde.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

DIAMETRE DU FORAGE [M]

Lors de la simulation, le diamètre du forage a une influence sur la résistance thermique de l'échangeur, parce qu'il détermine l'épaisseur du remplissage annulaire. Il détermine également la largeur maximale de la sonde et l'espacement maximal qu'il peut y avoir entre les branches du U de la sonde. Ce paramètre a été imposé à 0.13 m jusqu'à 150 m de profondeur et à 0.15 m pour des forages plus profonds, qui sont des valeurs standards pour les forages de SGV actuellement.

DEBIT A TRAVERS LES TUBES [M³/S]

Il est fixé par la puissance thermique de la PAC et par la différence de température du fluide entre l'entrée et la sortie de la PAC, selon la formule ci-dessous :

$$Q = \frac{P_{sol}}{\Delta T * C_{V(eau)}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

$C_{V(eau)}$ est la capacité calorifique volumique de l'eau. ΔT représente la différence de température du fluide entre l'entrée et la sortie de la PAC. Pour un rendement thermique idéal, cette valeur est généralement fixée à 3 °C. P_{sol} est la puissance thermique extraite du terrain, qui dépend de la puissance thermique de la PAC P_{th} et de son coefficient de performance (COP) :

$$P_{sol} = P_{th} \frac{(COP - 1)}{COP} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Dans le cas des demandes thermiques du tableau 2.3 (P_{th} de 7 kW), le débit dans les sondes pour obtenir un ΔT de 3 °C est fixé à 0.42 l/s.

EED utilise le débit pour calculer le nombre de Reynolds (R_e) du fluide dans la sonde, selon la formule ci-dessous :

$$R_e = \frac{\rho Q d}{A \eta} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

où ρ est la densité du fluide [kg/m³], Q le débit du fluide [m³/s], d le diamètre de la sonde [m], A la surface de la sonde [m²] et η la viscosité du fluide [kg/m/s].

Le nombre de Reynolds définit le régime d'écoulement du fluide. S'il est inférieur à 2300, l'écoulement est laminaire alors que s'il est supérieur à 2300, l'écoulement devient turbulent. Le régime d'écoulement du fluide a une influence importante sur les échanges thermiques qui ont lieu avec le sous-sol. Les flux de chaleur entre le fluide et le sous-sol sont décrits par la relation suivante :

$$W = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

où T_s est la température du solide et T_∞ la température du fluide non influencée par la présence du solide. « h » est appelé coefficient d'échange thermique et dépend des propriétés thermiques du fluide et de la géométrie du milieu, mais surtout du régime d'écoulement du fluide puisque ce coefficient augmente fortement lorsque l'écoulement du fluide passe de laminaire à turbulent. Effectivement, lorsque le régime d'écoulement est laminaire, les échanges de chaleur à l'intérieur du fluide ainsi qu'entre le fluide et le solide sont uniquement de type conductif. Lorsque le régime devient turbulent, une partie des échanges thermiques sont de type convectif et par conséquent plus

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

efficaces. Ainsi, les échanges entre le sous-sol et le fluide sont améliorés si le régime du fluide est turbulent ($R_e > 2300$). D'un autre côté, les pertes de charge liées à la circulation du fluide dans la sonde augmentent fortement lorsque le régime d'écoulement passe de laminaire à turbulent puisqu'elles sont proportionnelles à la vitesse dans le premier cas et proportionnelles au carré de la vitesse dans le deuxième. Il faut par conséquent plus d'énergie pour faire circuler le fluide dans la sonde si son régime est turbulent.

Dans l'idéal, il faudrait donc optimiser le débit dans les sondes pour que R_e soit proche de 2300. Dans la pratique, le débit étant imposé par l'équation 2.3, il est possible d'avoir une influence sur R_e uniquement en changeant le diamètre de la sonde ou le type de fluide, ce qui se fait rarement, principalement pour des raisons techniques.

L'influence de R_e a été testée pour les données thermiques du tableau 2.3. Le débit a été varié théoriquement pour obtenir des valeurs de R_e comprises entre 500 et 4000. Dans chaque cas, la longueur recommandée de la sonde et les résistances thermiques de l'échangeur ont été calculés. Le résultat de cette analyse de sensibilité est présenté dans les deux figures ci-dessous.

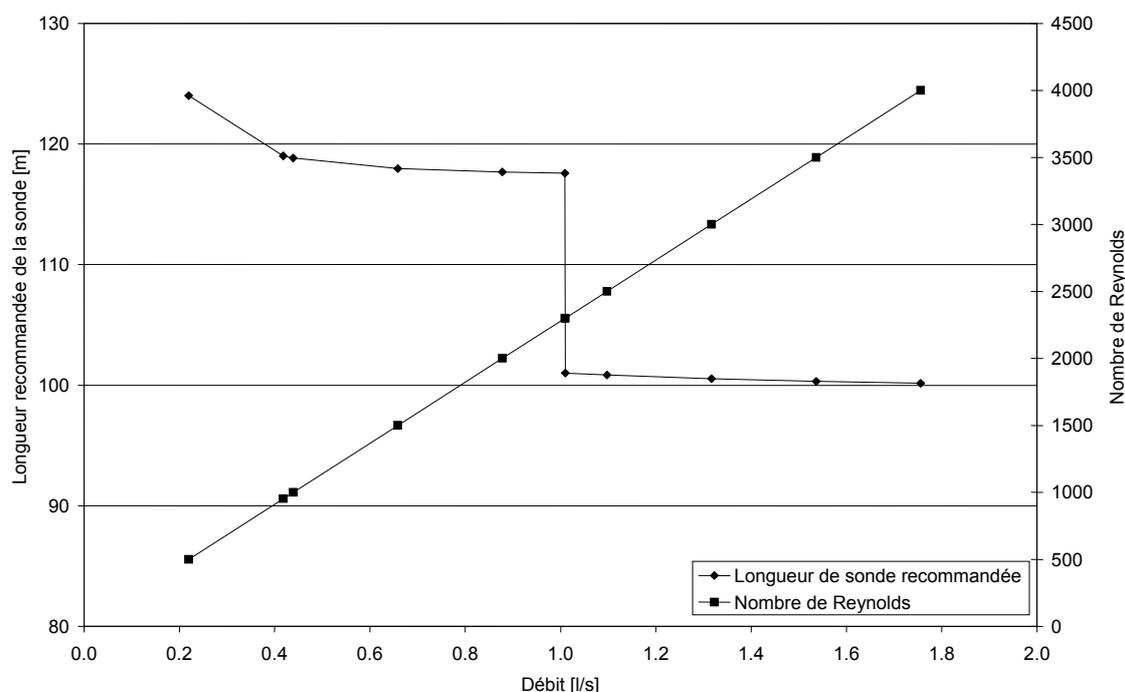


Figure 2.16. Longueur de sonde recommandée (échelle de gauche) et nombre de Reynolds du fluide (échelle de droite) en fonction du débit. La diminution rapide de longueur recommandée correspond au changement de régime du fluide ($R_e = 2300$).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

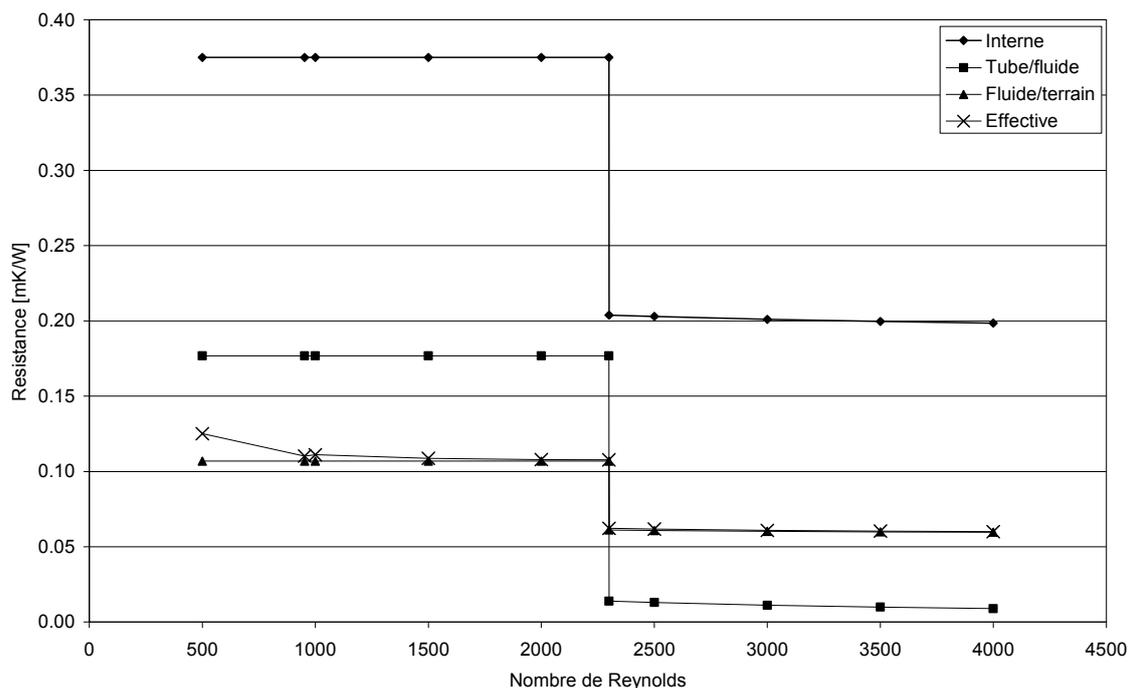


Figure 2.17. Evolution des résistances de l'échangeur de chaleur (résistance interne, résistance entre le tube et le fluide, résistance entre le fluide et le terrain et résistance effective) en fonction du nombre de Reynolds. Lorsque le nombre de Reynolds atteint 2300, le changement de régime du fluide provoque une baisse brusque de la résistance de l'échangeur de chaleur.

CARACTERISTIQUES DE LA SONDE (DIAMETRE [M], EPAISSEUR DE LA PAROI [M], CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA PAROI [W/M/K])

Pour ces paramètres, EED possède également une base de données des caractéristiques des sondes les plus couramment utilisées. Dans la pratique, une sonde en PE (DN32) est généralement utilisée pour des forages jusqu'à 150 m de profondeur. Pour des forages plus profonds, des sondes un peu plus larges sont utilisées (DN40) pour résister à la pression du terrain. Le même principe a été appliqué dans ce travail.

ESPACE ENTRE LES TUBES DE LA SONDE [M]

Distance entre le côté « descente » et le côté « montée » d'une sonde en U. La valeur doit être choisie entre un minimum qui dépend du diamètre de la sonde et un maximum qui dépend du diamètre du forage. L'écartement doit être le plus important possible afin de réduire les interactions thermiques entre les tubes de la sonde. Dans la pratique, la valeur maximale ne peut être atteinte que par la pose d'écarteurs tous les 8 à 10 mètres lors de l'installation de la sonde.

L'effet d'un espacement minimal et maximal sur la longueur de la sonde a été simulé pour les demandes thermiques du tableau 2.3 ; la différence de température du fluide atteint 0.6 °C en janvier et -0.04 °C en juillet tandis que la longueur recommandée dans le cas le moins favorable est de 129 m, en comparaison de 119 m dans le cas favorable.

La pose d'écarteurs conduit à un coût supplémentaire de l'échangeur qui n'est pas forcément compensé par le gain de prix lié à la diminution de profondeur du forage. Cependant, il est recommandé d'utiliser des écarteurs puisqu'ils assurent un meilleur rendement thermique de la sonde, ce qui permet également de limiter la consommation électrique de la PAC.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Dans les simulations des paragraphes suivants, une valeur maximale de 0.07 m d'écartement entre les branches du U a été utilisée pour des sondes DN32 dans un forage de diamètre 0.13 m et de 0.08 m pour des sondes DN40 dans un forage de diamètre 0.15 m

CONDUCTIVITE THERMIQUE DU REMPLISSAGE [W/M/K]

Elle dépend du matériau utilisé pour faire le contact entre la sonde et le terrain. Le plus souvent, c'est un mélange de bentonite (1/3) et de ciment (2/3) qui est utilisé. Sa conductivité thermique est comprise entre 0.8 et 1.0 W/m/K, ce qui est faible en comparaison de celle d'autres mélanges à base de ciment parfois utilisés pour les remplissages de sondes géothermiques et dont la conductivité thermique atteint 2.0 W/m/K. La différence de température du fluide entre ces deux cas est de -1.09 °C en janvier et -0.06 °C en juillet. La longueur de sonde recommandée pour un remplissage avec le mélange bentonite/ciment est de 138 m (pour 119 m dans le cas d'un mélange à meilleure conductivité thermique).

Sur tous les paramètres de base simulés, c'est celui-ci qui a la plus grande influence sur la température du fluide. Il paraît donc important de choisir systématiquement un ciment de meilleure qualité comme matériel de remplissage des sondes. Le surcoût engendré par la différence de prix d'un mélange bentonite/ciment standard est nettement compensé par la diminution de la longueur nécessaire de sonde.

Dans de rares cas (Matthey et al. 1996, 1999), le remplissage du forage a été réalisé avec du sable de quartz saturé en eau. Sa conductivité thermique pouvant dépasser 3 W/m/K, un gain important peut être réalisé sur la longueur de la sonde. Ce matériel ne peut cependant pas être utilisé partout puisqu'il n'est pas étanche, il existe en effet un risque de pollution des eaux souterraines par ruissellement le long du forage ou de mise en contact de deux aquifères.

RESISTANCE DE CONTACT ENTRE LA SONDE ET LE REMPLISSAGE [KM/W]

Cette valeur est déterminée par la manière dont a été fait le remplissage. La résistance de contact est nulle dans le cas où le remplissage a été correctement réalisé et comble entièrement l'espace entre la sonde et le forage. Elle peut atteindre 0.03 Km/W s'il y a des vides entre la sonde et le terrain (Hellström, 2000). Ce paramètre a cependant peu d'influence sur le rendement thermique de l'échangeur, puisqu'entre ces deux cas extrêmes, la différence de température est de -0.16 et -0.01 °C en janvier et en juillet et la différence de longueur recommandée de la sonde de 3 m.

Résistance thermique de la sonde Rb [Km/W]

L'utilisateur du logiciel a le choix de donner une valeur pour ce paramètre (obtenue à partir d'un test de réponse thermique) ou de laisser EED le calculer à partir des autres données de l'installation. Dans ce travail, la résistance thermique a toujours été calculée par EED sur la base de 4 multipôles. Ce chiffre définit l'ordre du polynôme utilisé pour le calcul de la résistance thermique ; plus il est élevé, plus le résultat est exact, mais plus le temps de calcul est long.

La résistance thermique de la sonde dépend de nombreuses propriétés de l'échangeur : type de sonde, écartement entre les tubes, matériel de remplissage, type de fluide et débit dans les sondes. Pour les sondes en double-U, les paramètres qui ont le plus d'influence sont le matériel de remplissage, l'écartement entre les tubes et le débit dans les sondes (Matthey et al. 1996).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Les influences de ces trois paramètres sur la résistance thermique ont été étudiées et documentées en détail par Matthey & Pahud (1996), Matthey et al. (1996) ainsi que Pahud & Matthey (2001), qui ont démontré que la résistance thermique est minimale si :

1. du sable de quartz est utilisé comme matériel de remplissage ;
2. des écarteurs sont posés le long de la sonde ;
3. le diamètre des tubes est adapté pour que le nombre de Reynolds soit proche de 2300.

Fluide caloporteur

La conductivité thermique [W/m/K], la capacité calorifique massique [J/kg/K], la densité [kg/m³], la viscosité [kg/m/s] ainsi que la température de solidification [°C] du fluide caloporteur peuvent être définis par l'utilisateur ou choisis à partir de la base de données du logiciel qui contient dix fluides. Le type de fluide influence le rendement thermique de la sonde par ses propriétés physiques (conductivité thermique et capacité calorifique), mais surtout par son régime d'écoulement en fonction du débit fixé, qui dépend de sa densité et de sa viscosité.

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour chacun de ces fluides en regardant leur influence sur la longueur de la sonde pour les demandes thermiques du tableau 2.3 et pour un débit fixé à 0.42 l/s. Le résultat obtenu est présenté dans le tableau de la page suivante (Tabl. 2.6).

La longueur de sonde nécessaire lorsque le fluide utilisé est l'eau pure est beaucoup plus importante que dans les autres cas malgré son nombre de Reynolds très élevé. Ceci est dû notamment au fait que sa température de solidification est plus haute (0 °C) et que sa température minimale ne doit jamais descendre en-dessous de cette valeur. Pour tous les autres fluides, la température minimale a été fixée à -5 °C.

Dans la pratique, le fluide le plus utilisé est le monopropylène glycol 33 %, notamment parce que sa température de solidification est très basse (-17 °C), qu'il est relativement inerte, peu polluant et peu coûteux.

Tableau 2.6. Caractéristiques physiques, nombre de Reynolds pour un débit de 0.42 l/s et longueur de sonde recommandée pour les dix fluides caloporteurs proposés par le logiciel EED.

Type de fluide	Conductivité thermique [W/mK]	Capacité calorifique [J/KgK]	Viscosité [kg/m/s]	Densité [kg/m ³]	Température de solidification [°C]	Nombre de Reynolds	Longueur recommandée [m]
carbonate de potassium 25 %	0.534	3080	0.0039	1247	-13	3273	103
chlorure de calcium	0.530	3050	0.0037	1195	-18	3306	103
carbonate de potassium 33 %	0.524	2830	0.0056	1336	-20	2442	103
méthanol	0.450	4000	0.0040	960	-20	2456	104
monoéthylène glycol 25 %	0.480	3795	0.0052	1052	-14	2071	118
monopropylène glycol 25 %	0.475	3930	0.0079	1033	-10	1340	118
monoéthylène glycol 33 %	0.453	3565	0.0076	1068	-21	1438	119
monopropylène glycol 33 %	0.450	3725	0.0112	1042	-17	952	119
éthanol	0.440	4250	0.0076	960	-15	1293	119
Eau pure	0.591	4186	0.0013	99.8	0	7823	157

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Charge de base

COEFFICIENT DE PERFORMANCE DE LA POMPE A CHALEUR (COP)

Une valeur de 4 a été utilisée lors de toutes les simulations ; cette valeur constitue une moyenne caractéristique sur la période d'exploitation pour des pompes à chaleur sol-eau actuellement en fonction.

CHARGE DE BASE

Elle représente les besoins annuels en énergie de chauffage et de refroidissement. Il est possible de donner une valeur annuelle qui sera répartie en demande mensuelle selon un profil standard, mais également d'entrer directement des valeurs mensuelles. Dans la présente étude, des valeurs mensuelles ont été calculées à partir des demandes thermiques annuelles des bâtiments simulés et degrés-jour mensuels (DJ_m). Les degrés-jour DJ sont calculés par rapport à une température de référence de 20 °C qui correspond à la température de confort dans un bâtiment.

La formule suivante est utilisée pour calculer les degrés-jour à partir de la température journalière moyenne d'un site (T_{moy} , en °C) :

$$DJ = 20 - T_{moy} \text{ (Eq. 2.7)}$$

Il est admis que pour une température moyenne supérieure à 12 °C les degrés-jour sont nuls, donc qu'il n'y a pas besoin de chauffer les habitations.

Les degrés-jour mensuels DJ_m ou annuels DJ_{an} sont la somme des degrés-jour sur un mois et sur une année respectivement. Un calcul semblable peut être effectué pour les demandes de rafraîchissement en été, lorsque la température extérieure moyenne dépasse 20 °C. Les degrés-jour du canton de Neuchâtel sont disponibles sur le site internet du canton de Neuchâtel (www.ne.ch). Ils sont donnés pour neuf régions climatiques du canton : Neuchâtel, Littoral Est, Littoral Ouest, Val-de-Ruz, Val-de-Travers, La Chaux-de-Fonds, Le Locle, Vallée de la Sagne et Vallée de la Brevine. La charge de base mensuelle est alors calculée simplement sur la base d'une règle de trois :

$$\text{Charge de base mensuelle [kWh/an]} = \frac{DJ_m * Q_{th} \text{ [kWh/an]}}{DJ_{an}} \text{ (Eq. 2.8)}$$

La demande thermique du bâtiment correspond à la consommation annuelle nette de chaleur. Elle se calcule à partir de la surface de référence énergétique (SRE) et de l'indice énergétique du bâtiment, qui est la consommation de chaleur par unité de surface. Actuellement, pour un bâtiment construit selon un standard Minergie, l'indice énergétique est de 150 MJ/m²/an. Pour un bâtiment neuf, la valeur à atteindre selon la norme SIA 380/1 est de 250 MJ/m²/an alors que pour un bâtiment ancien, il est en moyenne de 500 MJ/m²/an.

Le tableau 2.7 montre un exemple de calcul de la consommation thermique annuelle, de la puissance de la PAC et de la longueur de la SGV nécessaires pour une villa et pour deux locatifs de 10 et 20 appartements respectivement, indépendamment du lieu d'implantation.

Tableau 2.7. Consommation nette, puissance de la PAC et longueur de la SGV calculés pour une villa et deux locatifs de 10 et 20 appartements. Le calcul est basé sur une durée de fonctionnement annuelle de la PAC de 2200 h/an et une puissance d'extraction du terrain de 40 W/m.

	Villa (150 m ²)	Locatif de 10 appartements	Locatif de 20 appartements
Consommation nette [kWh/an]			
Bâtiment Minergie	5156	34375	68750
Bâtiment neuf	8594	57292	114583
Bâtiment ancien	17188	114583	229167
Puissance de la PAC [kW]			
Bâtiment Minergie	2.3	15.6	31.3
Bâtiment neuf	3.9	26	52.1
Bâtiment ancien	7.8	52.1	104.2
Longueur de sonde [m]			
Bâtiment Minergie	59	391	781
Bâtiment neuf	98	651	1302
Bâtiment ancien	195	1302	2604

Charge de pointe

Lors de longues périodes où la température extérieure reste très froide, la pompe à chaleur doit fonctionner pendant plusieurs heures à pleine puissance pour que le bâtiment soit chauffé à la température de confort. La charge de pointe correspond à la puissance maximale de la PAC (normalement constante) et à la durée des périodes de fonctionnement continu pour chaque mois.

Le même calcul doit être appliqué pour les demandes de froid lors des périodes d'été très chaudes, dans le cas d'une utilisation de la sonde géothermique pour une climatisation en été, à l'aide d'une PAC réversible.

Les périodes mensuelles de fonctionnement en continu de la PAC et par conséquent la charge de pointe varient fortement d'une année à l'autre. Une analyse de sensibilité a été effectuée en changeant la durée de la période de fonctionnement continu pour chaque mois et en regardant son influence sur la longueur de sonde recommandée par le logiciel. Elle a permis de montrer que c'est la durée de fonctionnement en continu mensuelle pour les mois les plus froids et non le profil des durées de fonctionnement qui détermine la longueur de la sonde.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Comme le montre la figure 2.18, pour une puissance de la PAC donnée, la longueur de sonde nécessaire augmente de manière logarithmique lorsque la durée maximale de fonctionnement continu mensuelle augmente. Pour les demandes thermiques du tableau 2.3, la longueur de sonde nécessaire augmente de 8 m, ce qui correspond à 6.5 % de la longueur recommandée si la durée maximale de fonctionnement en janvier et en décembre passe de 12 à 48 h.

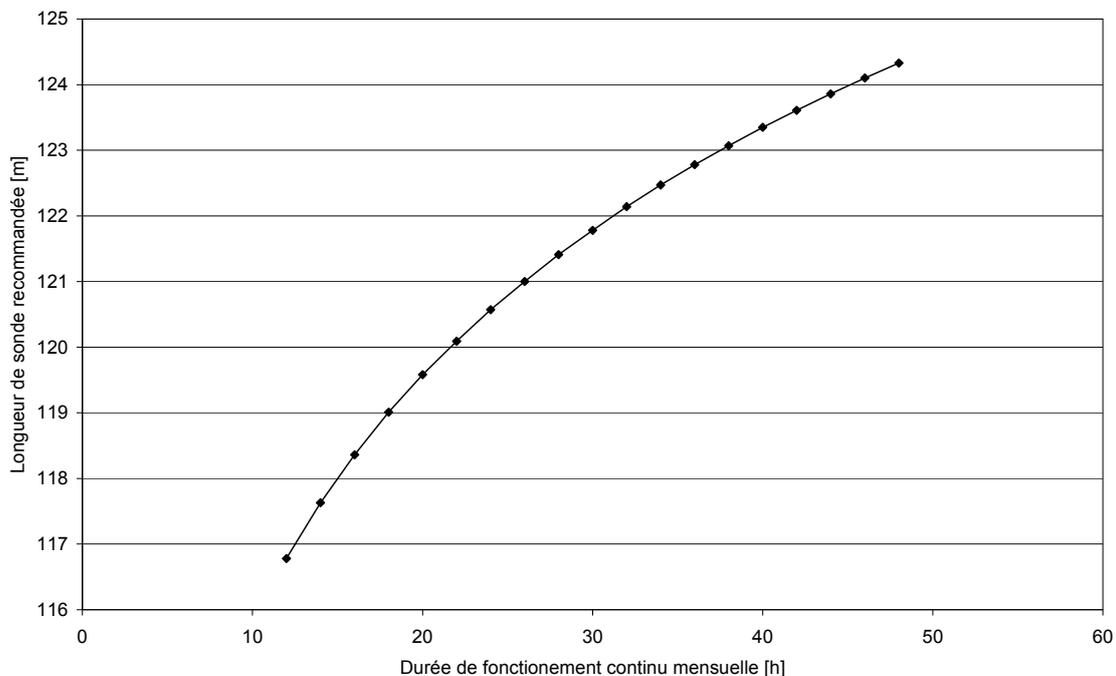


Figure 2.18. Longueur de sonde recommandée en fonction de la durée de fonctionnement continu mensuelle pour une villa à la Chaux-de-fonds (cf. Tab. 2.3). Cette valeur représente la durée par mois pendant laquelle la PAC fonctionne en continu à pleine puissance. Elle est maximale en janvier et en décembre et inférieure à une heure durant les mois d'été.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Dans le cadre de ce travail, des durées moyennes pour le canton de Neuchâtel ont été utilisées (Tabl. 2.8).

Tableau 2.8. Durées de fonctionnement continu de la PAC utilisées pour les simulations réalisées dans ce travail.

Mois	Durée de fonctionnement continu [h]
Janvier	18
Février	16
Mars	12
Avril	8
Mai à septembre	0
Octobre	8
Novembre	16
Décembre	18

Période de simulation

PERIODE DE SIMULATION [AN]

Il s'agit de la durée d'exploitation de l'installation. Elle a été définie à 30 ans lors des simulations réalisées dans ce travail.

PREMIER MOIS D'EXPLOITATION

Permet de décider quand l'exploitation a débuté (septembre dans ce travail).

2.4.2 Implantation d'une SGV dans un massif calcaire non saturé

Introduction

En Suisse, la majorité des sondes géothermiques sont implantées dans les terrains molassiques du Plateau. Les implantations dans le calcaire sont nettement moins nombreuses ; par conséquent, les propriétés thermiques du calcaire et surtout les caractéristiques géologiques (fissuration, karstification) sont peu connues. Un massif de calcaire sain, sans fracture et sans eau constitue un bon conducteur de chaleur. Cependant, dans la zone non saturée du karst, le gradient géothermique est généralement très faible (0.4 à 0.6 °C/100m) ; ceci est dû au fait que les écoulements d'eau qui ont lieu à la base d'un aquifère karstique sont suffisamment importants pour absorber la quasi-totalité du flux géothermique provenant d'en dessous. De nombreux auteurs ont observé, décrit et expliqué ce phénomène (Badino, 2005 ; Benderitter & Roy, 1993 ; Jeannin, 1990 ; Jeannin et al., 1997 ; Luetscher & Jeannin, 2004 ; Matthey, 1974 et Šafanda et al., 2005 notamment). Un travail de séminaire effectué dans le cadre du cours postgrade en hydrogéologie du CHYN a permis la synthèse de ces articles et est présenté dans l'annexe 2.2.

Malgré ces conditions apparemment défavorables, aucun cas de panne d'une SGV dû à un environnement karstique n'a été mis en évidence pour autant que le dimensionnement était correct,, ce qui semble montrer que l'effet du karst est peu important (Bassetti et al., 2006). Le but de cette simulation est de mettre en évidence l'influence d'une variation de flux géothermique sur une installation.

D'un point de vue pratique, lors d'une implantation en milieu calcaire, il arrive que le forage traverse une fracture de diamètre important, ce qui peut poser un problème pour le remplissage de l'espace annulaire entre la sonde et la paroi du forage. Effectivement, le coulis injecté va s'infiltrer dans la fracture et il sera par conséquent nécessaire d'en injecter suffisamment pour combler localement la fracture avant de pouvoir terminer le remplissage de manière correcte, ce qui peut nécessiter un volume de coulis deux à trois fois plus important que dans un cas normal.

Paramètres de simulation

La valeur du gradient géothermique ne peut pas être modifiée directement dans le logiciel EED. En revanche, il est possible de faire varier le flux géothermique, qui est directement relié au gradient. Ainsi, pour simuler les mauvaises conditions thermiques liées à la baisse du gradient géothermique dans un massif calcaire non saturé, trois valeurs de flux géothermique ont été utilisées :

4. Cas normal, avec un flux de 0.07 W/m².
5. Cas intermédiaire de 0.035 W/m², partant du principe que l'écoulement d'eau souterraine à la base de la zone non saturée du karst n'est pas suffisant pour absorber la totalité du flux géothermique.
6. Cas extrême de 0 W/m² où tout le flux géothermique est absorbé par l'écoulement d'eau souterrain à la base de la zone non saturée.

L'influence du flux géothermique a été modélisée pour une gamme de demandes thermiques comprises entre 5000 et 75'000 kWh/an, ce qui correspond à des puissances de pompes à chaleur comprises entre 2 et 35 kW, pour 2200 heures de fonctionnement annuel. Pour des constructions récentes, ces demandes thermiques sont adaptées pour chauffer et produire l'eau chaude sanitaire d'une gamme de bâtiments allant d'une villa à un immeuble locatif de vingt appartements environ (Fig. 2.19).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

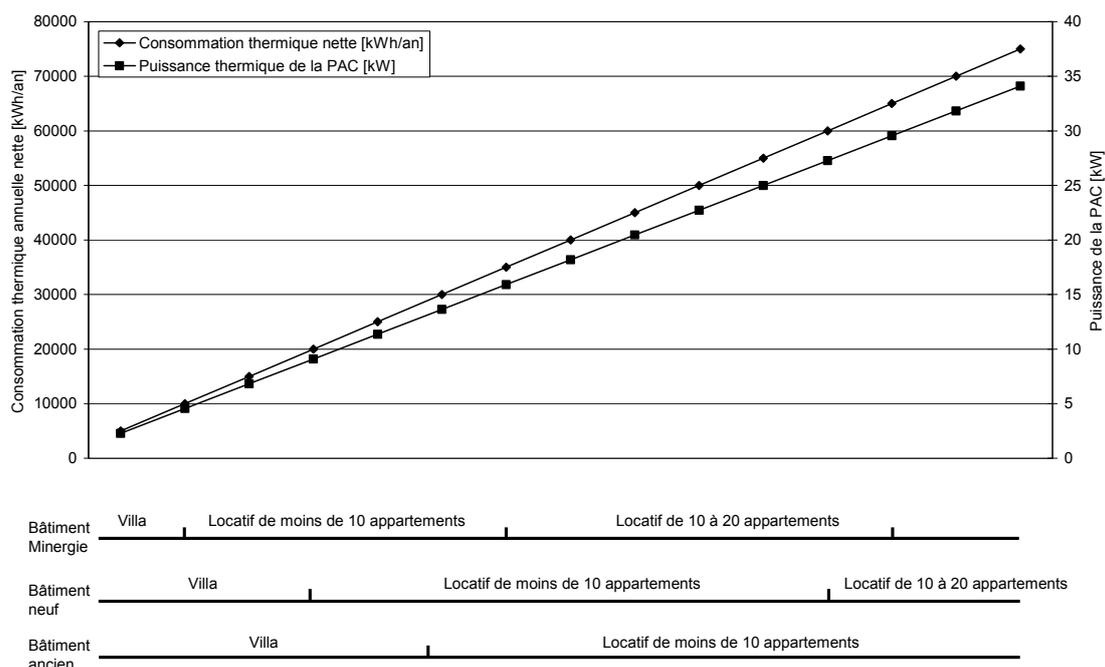


Figure 2.19. Consommation thermique nette (échelle de gauche) et puissance de la PAC (échelle de droite) pour des bâtiments de différentes tailles, récents et anciens. Le calcul est basé sur un indice énergétique de 150 MJ/m²/an pour les bâtiments Minergie, de 250 MJ/m²/an pour des bâtiments neufs et de 500 MJ/m²/an pour les bâtiments anciens.

Les demandes thermiques des bâtiments neufs ont été utilisées pour l'interprétation des résultats de la simulation. La température moyenne annuelle de l'air à La Chaux-de-Fonds a été utilisée (7 °C) pour la simulation. Les autres paramètres utilisés sont ceux qui ont été définis au chapitre précédent et sont présentés dans le tableau.

Tableau 2.9. Paramètres de base de la simulation en massif calcaire non saturé.

Paramètres	Valeur
Terrain (calcaire)	
Conductivité thermique [W/mK]	2.8
Capacité calorifique [MJ/m ³ K]	2.3
Sonde et échangeur de chaleur	
Type	Double-U
Diamètre [m]	0.13 si longueur (L) < 150 m 0.15 si longueur (L) > 150 m
Débit [m ³ /s]	En fonction de la demande thermique annuelle
Résistance de contact [mK/W]	0
Type de sonde	PE DN32 mm si L < 150 m PE DN40 mm si L > 150 m
Espacement des tubes [m]	0.07 si L < 150 m 0.08 si L > 150 m
Conductivité thermique du remplissage [mK/W]	2.0
Fluide caloporteur	Monopropylène glycol 33 %
COP	4.0
Exploitation	
Durée [an]	30
Mois de départ	septembre (09)

Pour chaque demande thermique, la longueur de sonde recommandée pour un cas normal, avec un flux géothermique de 0.07 W/m² a tout d'abord été calculée. Ensuite, la température du fluide à la sortie de la sonde a été calculée en gardant cette longueur, mais en diminuant le flux géothermique à 0.035 W/m², puis à 0 W/m², ce qui permet d'estimer la perte de rendement thermique de l'échangeur. Finalement, la longueur de sonde nécessaire pour ces deux derniers cas a également été simulée.

Résultats

La longueur recommandée de la sonde augmente lorsque le flux géothermique diminue. Elle augmente également de manière pratiquement linéaire avec la puissance thermique fournie (Fig. 2.20).

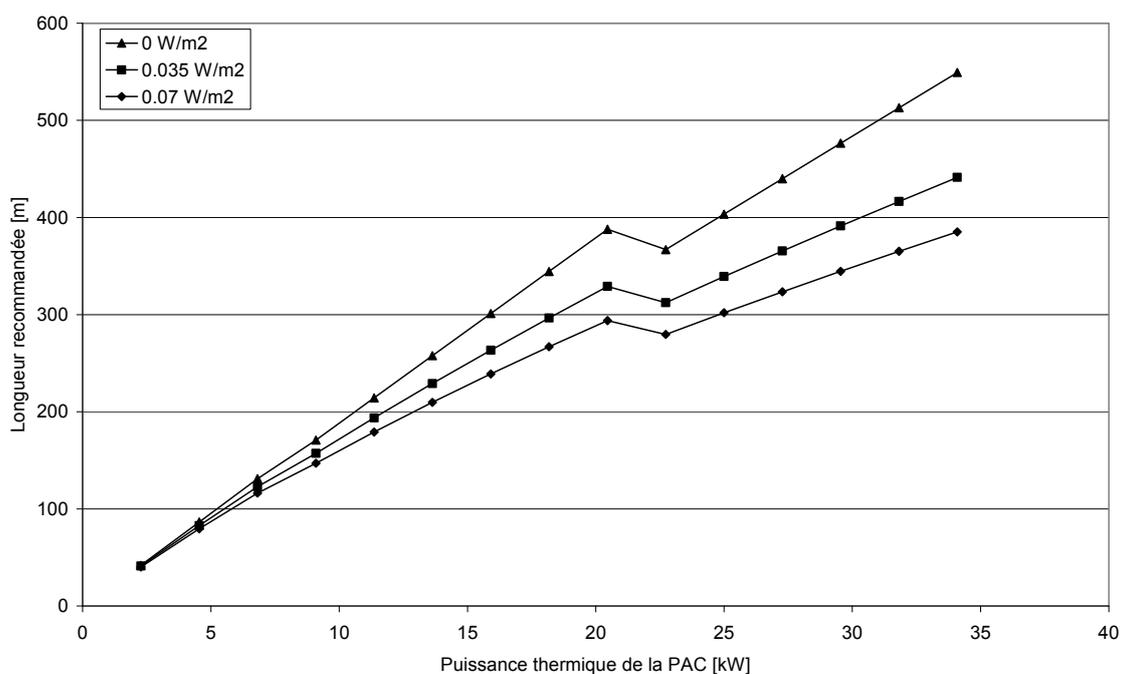


Figure 2.20. Longueur de sonde recommandée en fonction de la puissance thermique fournie, pour trois flux géothermiques : cas normal de 0.07 W/m^2 , cas intermédiaire de 0.035 W/m^2 et cas extrême de 0 W/m^2 , où la totalité du flux géothermique est absorbé. La rupture de la droite entre 20 et 25 kW est due au changement de régime du fluide dans la sonde, lié à l'augmentation du débit.

Les pentes des droites calculées à partir de cette figure montrent qu'une augmentation de 10 m de la longueur de la sonde équivaut, en régime laminaire, c'est-à-dire pour des puissances thermiques inférieures à 20 kW à un gain de 0.53 kW en l'absence de flux géothermique et à un gain de 0.67 kW pour un flux géothermique normal de 0.07 W/m^2 . Ce gain augmente lorsque le fluide passe en régime turbulent pour atteindre 0.72 à 1.08 kW pour 10 m de sonde.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Pour les petites installations, la longueur recommandée pour les trois flux géothermiques est très semblable. La différence entre ces trois cas devient en revanche plus marquée pour des grandes installations. Les différences de longueur recommandée entre le cas normal (0.07 W/m^2) et le cas intermédiaire (0.035 W/m^2) ainsi qu'entre le cas normal et le cas extrême (0 W/m^2) ont été calculées et sont présentées sur le graphe de la figure 2.21. En l'absence de flux géothermique, un accroissement de longueur de 5 à 45 % est nécessaire pour obtenir un même rendement thermique, alors que cet accroissement reste inférieur à 15 % si le flux géothermique n'est diminué que de moitié.

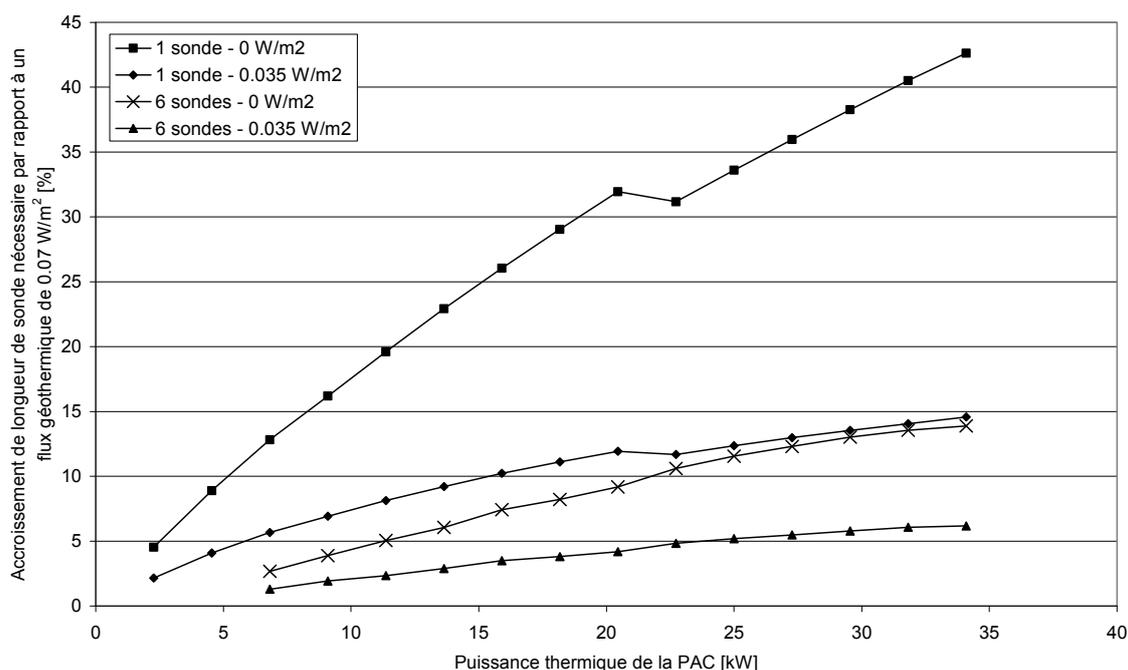


Figure 2.21. Accroissement de longueur nécessaire (en %) entre un cas intermédiaire (flux géothermique 0.035 W/m^2) ou extrême (pas de flux géothermique) et un cas normal (flux géothermique de 0.07 W/m^2), en fonction de la puissance thermique fournie. Pour six sondes, il s'agit de l'accroissement de la longueur totale cumulée des six sondes. Le seuil visible entre 20 et 25 kW pour une sonde est dû au changement de régime du fluide dans la sonde, lié à l'augmentation du débit.

La simulation a été refaite dans les mêmes conditions, mais en alimentant les installations par six sondes espacées de 8 m et disposées en rectangle. Les résultats obtenus montrent que l'influence de l'affaiblissement du flux géothermique est moins perceptible s'il y a plusieurs sondes pour alimenter l'installation. Effectivement, l'accroissement de longueur de sonde nécessaire pour obtenir un même rendement thermique est plus faible dans le cas de six sondes : il est compris entre 3 et 14 % si le flux géothermique disparaît totalement et seulement entre 1 et 6 % lorsque le flux géothermique est diminué de moitié (Fig. 2.21).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Si la longueur de la sonde est adaptée à un flux géothermique normal de 0.07 W/m^2 , la température du fluide à la sortie de la sonde diminue fortement si le flux géothermique est amoindri. La figure 2.22 montre la différence de température (ΔT) du fluide entre ce cas normal et un cas intermédiaire (flux de 0.035 W/m^2) ou un cas extrême (0 W/m^2).

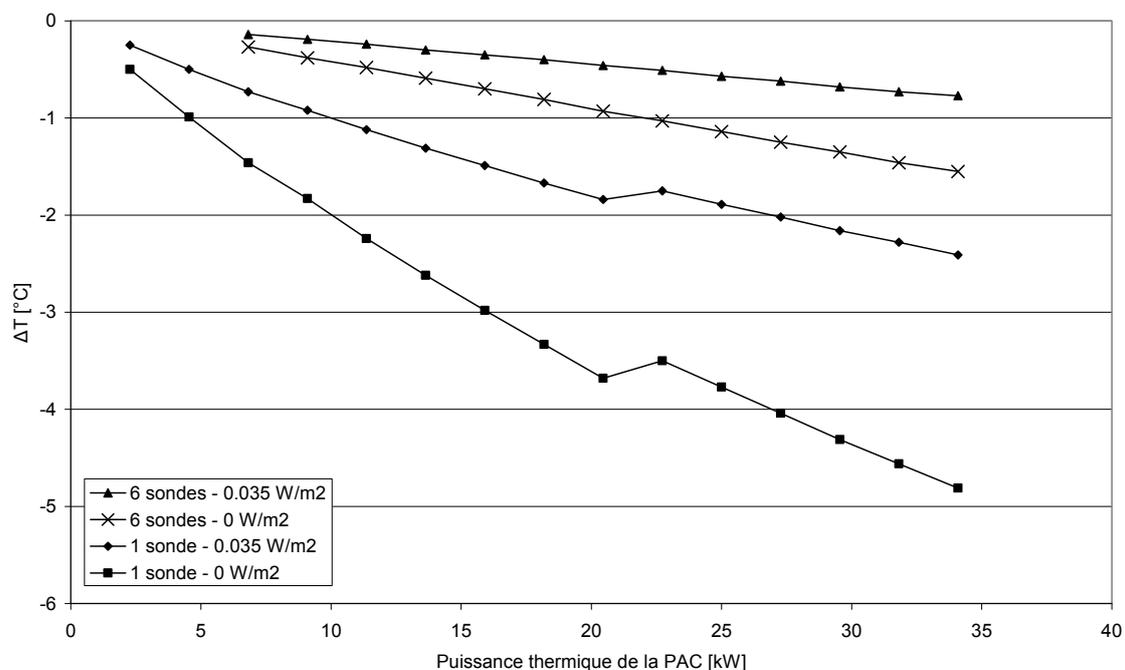


Figure 2.22. Diminution de température du fluide obtenue à la sortie de la sonde en fonction de la puissance thermique fournie, entre un cas intermédiaire (flux géothermique de 0.035 W/m^2) ou extrême (sans flux) et un cas normal (flux géothermique de 0.07 W/m^2), pour une longueur de sonde adaptée à un flux géothermique normal. Le seuil visible pour une sonde entre 20 et 25 kW est dû au changement de régime du fluide dans la sonde, lié à l'augmentation du débit.

La diminution de température varie également de manière linéaire avec la puissance thermique de la PAC. Le fluide perd en moyenne 0.07 °C par kW si le flux géothermique est diminué de moitié et en moyenne de 0.14 °C par kW si le flux géothermique est totalement absorbé par un écoulement d'eau souterraine.

Dans le cas d'une installation alimentée par six sondes, l'influence du flux géothermique est moins importante. Effectivement, les différences de températures du fluide obtenues à la sortie de la sonde sont plus faibles dans ce cas. Le fluide perd 0.02 °C par kW si le flux géothermique est diminué de moitié et 0.05 °C par kW si le flux disparaît complètement.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

La puissance extraite du terrain (PE, en W/m) a été déterminée en fonction de la puissance extraite du sol (P_{sol} , en W) et de la longueur de sonde recommandée (L), selon la formule ci-dessous, pour toutes les configurations simulées dans ce chapitre :

$$PE = \frac{P_{sol}}{L} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

La puissance extraite diminue lorsque le flux géothermique est affaibli. Pour une seule sonde, elle varie entre 42 et plus de 66 W/m pour un flux géothermique normal de 0.07 W/m², mais ne dépasse pas 60 W/m en l'absence de flux (Fig. 2.23).

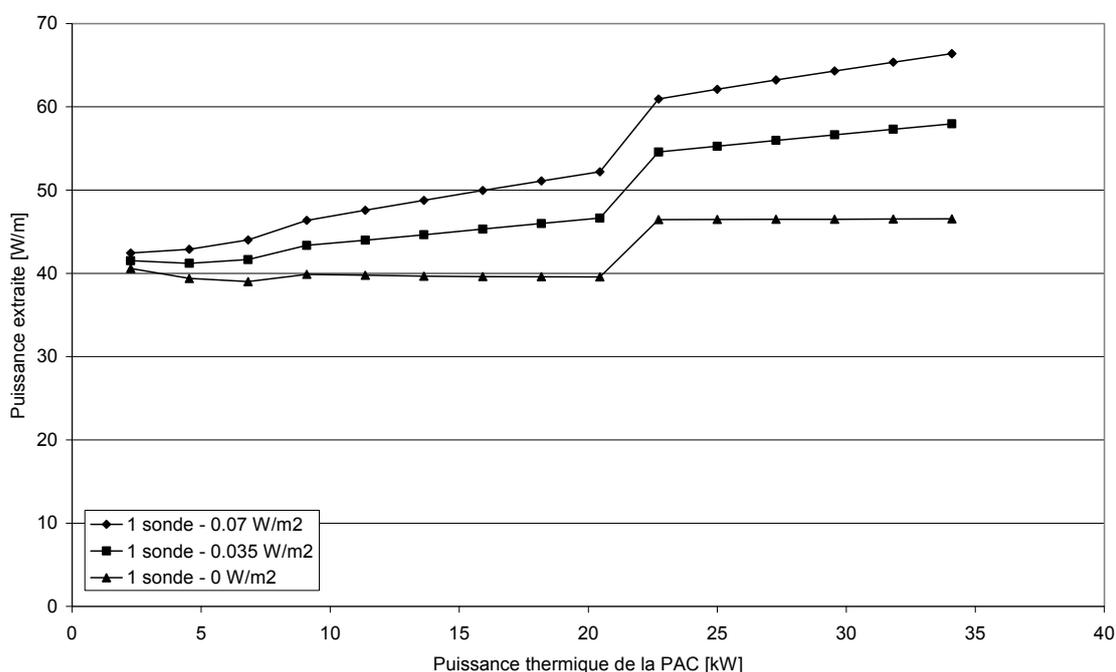


Figure 2.23. Puissance extraite du terrain en fonction de la puissance thermique de la PAC, pour les trois flux géothermiques simulés (0.07, 0.035 et 0 W/m²). Le premier seuil est dû au changement de diamètre de sonde utilisé (DN32 à DN40) tandis que le deuxième est dû au changement de régime du fluide dans la sonde lié à l'augmentation du débit nécessaire.

Cette figure indique également que la puissance extraite du terrain augmente de manière significative pour les grandes puissances thermiques de PAC, ce qui implique qu'il est plus favorable de construire une grande installation pour alimenter plusieurs bâtiments que de construire plusieurs installations individuelles. Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation de température en profondeur, liée au gradient géothermique. Effectivement, en circulant dans une sonde plus profonde, le fluide verra sa température augmenter et contiendra par conséquent plus d'énergie thermique à transmettre à la PAC. Cette hypothèse est prouvée par le fait que les puissances extraites du terrain pour un cas sans flux et sans gradient géothermique n'augmentent pas avec la puissance de l'installation (relation « 0 W/m² » de la figure 2.23).

Synthèse de l'effet de l'affaiblissement du flux géothermique

Cette simulation permet de montrer que dans un cas théorique, l'absence totale de gradient géothermique a un effet important sur la température du fluide caloporteur et sur la longueur de sonde nécessaire.

D'autre part, cette simulation a mis en évidence que l'affaiblissement ou la disparition totale du flux géothermique a plus d'effet lorsque la longueur de sonde augmente, c'est-à-dire si :

- la demande thermique annuelle augmente ;
- pour une même demande thermique, la température moyenne annuelle diminue ;
- pour une même demande thermique, le nombre de sondes diminue.

Ceci est dû au fait que la proportion entre l'apport de chaleur depuis la surface et l'apport de chaleur par le flux géothermique diminue lorsque la profondeur augmente. L'affaiblissement du flux géothermique est moins compensé par la chaleur provenant de la surface et son influence est par conséquent plus marquée en profondeur.

Pour de petites installations, l'influence d'un massif calcaire non saturé, sans flux géothermique reste faible. Il est cependant nécessaire de prévoir une longueur de forage un peu plus élevée pour éviter une trop grande consommation d'énergie électrique par la PAC. Pour les grandes installations et s'il y a un risque d'avoir un flux géothermique réduit, une investigation de détail par un spécialiste du sous-sol (géologue ou hydrogéologue) est nécessaire. Les tableaux 2.10 et 2.11 offrent une synthèse des puissances d'extraction utilisables et des accroissements des longueurs de sonde en cas d'affaiblissement ou de disparition du flux géothermique pour des bâtiments de différentes tailles. Les autres paramètres de l'installation sont donnés dans le tableau 2.9.

Tableau 2.10. Puissance extraite du terrain utilisable pour des bâtiments de différentes tailles implantés dans du calcaire et pour trois flux géothermiques : cas normal de 0.07 W/m², cas intermédiaire de 0.035 W/m² et cas extrême, sans flux géothermique.

Puissance extraite du terrain [W/m]	Villa (150 m²) (10'000 kWh/an)	Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)
Cas normal (0.07 W/m ²)	43	49	63
Cas intermédiaire (0.035 W/m ²)	41	45	56
Cas extrême (0 W/m ²)	39	40	47

Tableau 2.11. Pourcentage de longueur supplémentaire nécessaire pour alimenter des bâtiments de différentes tailles implantés dans du calcaire et par rapport à un flux géothermique normal de 0.07 W/m², pour un cas intermédiaire de 0.035 W/m² et un cas extrême, sans flux géothermique.

Accroissement de la longueur de la sonde [%]	Villa (150 m²) (10'000 kWh/an)	Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)
Cas intermédiaire (0.035 W/m ²)	4	9	13
Cas extrême (0 W/m ²)	9	23	36

Les résultats présentés ci-dessus sont applicables si la sonde est comprise sur toute sa longueur dans un massif calcaire non saturé, ce qui est rarement le cas. Dans le canton de Neuchâtel, il s'agit principalement des structures anticlinales qui constituent des accumulations importantes de couches de calcaire et forment les principaux reliefs du canton : Chaumont, Montagne de Boudry, ainsi que les flancs du Val-de-Ruz, de la Vallée de la Sagne et des Ponts-de-Martel. Au sommet de ces structures, le niveau de la nappe peut se trouver à 200 m de profondeur. Il s'agit de régions d'altitude élevée et peu urbanisées, donc relativement peu susceptibles de servir de terrain d'implantation pour une SGV. Dans les zones concernées, il est possible de considérer un cas intermédiaire avec un flux de 0.035 W/m² lors du dimensionnement d'une implantation, la totalité du flux géothermique étant rarement absorbée par les eaux souterraines. En cas de doute, il est préférable de demander l'avis d'un géologue de la région qui pourra donner des précisions quant à l'épaisseur de la zone non saturée du massif.

Les simulations présentées dans ce chapitre tiennent compte d'un remplissage annulaire de la sonde correctement effectué. Lors d'un forage dans des calcaires, le risque existe de rencontrer une fissure et de ne pas pouvoir injecter suffisamment de coulis pour constituer un remplissage complet. Dans ce cas, la perte de rendement thermique également peut être importante. Cependant, si les compagnies de forage sont averties à l'avance, des solutions techniques peuvent être préparées et appliquées lors de la réalisation du forage.

2.4.3 Influence de la température moyenne annuelle de l'air lors de l'implantation d'une SGV

Introduction

La température annuelle moyenne de l'air à l'endroit de l'implantation influence le dimensionnement des sondes géothermiques verticales. Pour un gradient géothermique de 3 °C/100 m, la température atteinte à 100 m de profondeur est de 13 °C si la température moyenne est de 10 °C, mais descend à 8 °C si la température moyenne n'est que de 5 °C. La sonde doit être plus longue pour compenser cette différence. D'autre part, un bâtiment de même surface habitable devrait normalement avoir une consommation thermique annuelle plus grande s'il est situé dans une région où la température annuelle moyenne de l'air est basse. Dans la pratique, les habitudes architecturales font que l'isolation est généralement meilleure dans les régions plus froides. Pour le canton de Neuchâtel, il est possible de considérer que des bâtiments de même surface habitable ont une consommation thermique nette équivalente quelque soit leur situation géographique.

La température annuelle moyenne de l'air dépend principalement de l'altitude, mais également de la morphologie locale du terrain (exposition du versant et climat local : nébulosité, vents principaux, vallée,...).

Signorelli et al. (2002) ont montré que l'influence de la température extérieure sur la puissance disponible pour une SGV était linéaire et de l'ordre de 0.94 kW par °C, pour une sonde de 265 m. Le nomogramme de dimensionnement des sondes présenté dans les normes VDI (2001) tient compte de ce paramètre (Fig. 2.5).

Dans le cas du canton de Neuchâtel, les zones habitables s'étendent de 430 m (Neuchâtel et littoral) à plus de 1000 m d'altitude. Au niveau du climat, le canton peut être ainsi séparé en neuf régions (www.ne.ch). Il s'agit de : Neuchâtel, Littoral Est, Littoral Ouest, Val-de-Ruz, Val-de-Travers, Le Locle, La Chaux-de-Fonds, Vallée de la Sagne et Vallée de la Brévine. Les températures annuelles moyennes de ces régions varient de 11.1 °C pour le Littoral Ouest à 5.8 °C pour la Vallée de la Brévine.

Un profil annuel moyen des degrés-jour mensuels a été calculé sur la base des valeurs de température des cinq dernières années (2002 à 2007). Ce profil annuel est représenté sur le graphe de la page suivante (Fig. 2.24) pour chacune des neuf régions climatiques :

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

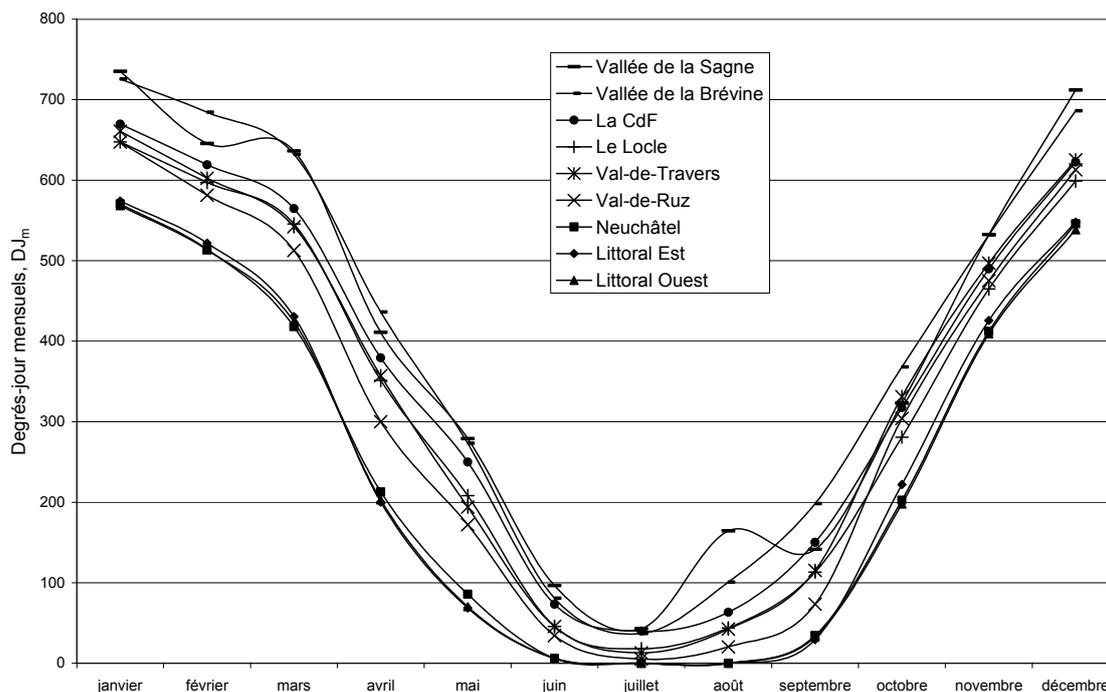


Figure 2.24. Profils annuels des degrés-jour mensuels pour les neuf régions climatiques du canton.

La forme du profil est semblable pour les neuf régions : les degrés-jour sont élevés et diminuent peu entre décembre et mars ; ils sont intermédiaires pour avril et mai, pratiquement nuls jusqu'en septembre et augmentent à nouveau de manière plus ou moins linéaire jusqu'en décembre. Les courbes peuvent être séparées en trois groupes :

1. Neuchâtel et le littoral ; dans ces trois régions, le besoin de chauffage est nul en juillet et en août (DJ = 0).
2. Val-de-Ruz, Val-de-Travers, Le Locle et La Chaux-de-Fonds.
3. Vallées de la Sagne et de la Brévine.

Des écarts par rapport à une courbe « lissée » sont visibles, notamment sur le profil de la Vallée de la Sagne. Ceci est dû au fait qu'il y a moins de données de température pour cette région (depuis 2005 seulement). La moyenne étant calculée sur un nombre inférieur de données, les valeurs extrêmes sont moins compensées et influencent plus la valeur moyenne.

Paramètres de simulation

La simulation a été menée de manière semblable à celle présentée au § 2.4.2. La demande de chaleur annuelle du bâtiment a été variée entre 5000 à 75'000 kWh/an pour une durée annuelle de fonctionnement de 2200 heures. Ces simulations ont été réalisées pour une installation à Neuchâtel, à La Chaux-de-Fonds et à La Brévine où les températures moyennes annuelles sont de 10.6, 7 et 5.8 °C respectivement. Le profil des degrés-jour de ces trois régions a été utilisé pour les simulations.

Les autres paramètres utilisés sont ceux du tableau 2.9 (avec un flux géothermique de 0.07 W/m²). L'analyse de sensibilité a été effectuée sur la longueur de sonde nécessaire pour chacune des configurations décrites ci-dessus.

Résultats

La longueur recommandée de la sonde pour une puissance thermique donnée augmente si la température annuelle moyenne de l'air diminue (Fig. 2.25). Le profil des degrés-jour influence également de manière significative la longueur de la sonde, notamment pour les régions les plus froides du canton où il n'est pas rare que le système de chauffage doive fonctionner tous les mois de l'année. Au contraire, au bord du lac, les degrés-jour au mois de juillet et d'août sont nuls, ce qui permet une meilleure recharge thermique du terrain en été, très favorable pour l'installation.

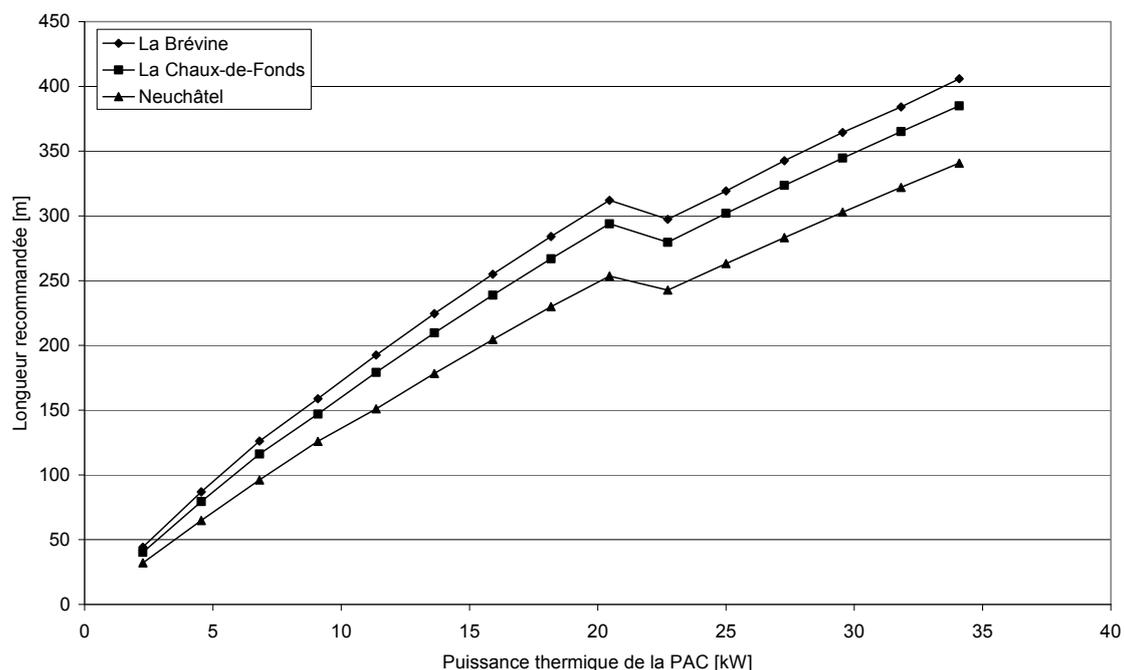


Figure 2.25. Longueur recommandée d'une sonde en fonction de la puissance thermique fournie, pour trois régions du canton de Neuchâtel (Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds et La Brévine). Le seuil visible entre 20 et 25 kW est dû au changement du régime d'écoulement du fluide lié à l'augmentation du débit nécessaire.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Dans le cas d'une implantation à la Brévine, une augmentation de 10 m de la longueur de la sonde permet de gagner 0.69 kW en régime laminaire et 1.04 kW en régime turbulent. La situation est un peu plus favorable à La Chaux-de-Fonds où ces valeurs sont de 0.72 et 1.08 kW et a fortiori à Neuchâtel où elles atteignent 0.83 et 1.16 kW pour 10 m de sonde.

En pourcentage, l'accroissement de longueur de sonde nécessaire pour compenser la baisse de la température moyenne annuelle est plus important pour les petites installations que pour les grandes (Fig. 2.26).

L'augmentation de la longueur de sonde par rapport à une implantation à Neuchâtel varie de 38 à 19 % pour la Brévine et de 25 à 13 % pour La Chaux-de-Fonds.

La même simulation a été réalisée en choisissant une alimentation de l'installation par six sondes. L'augmentation de sonde nécessaire pour compenser la différence de température annuelle moyenne est nettement plus importante dans ce cas puisqu'elle varie entre 45 et 34 % pour la Brévine et entre 30 et 23 % à La Chaux-de-Fonds.

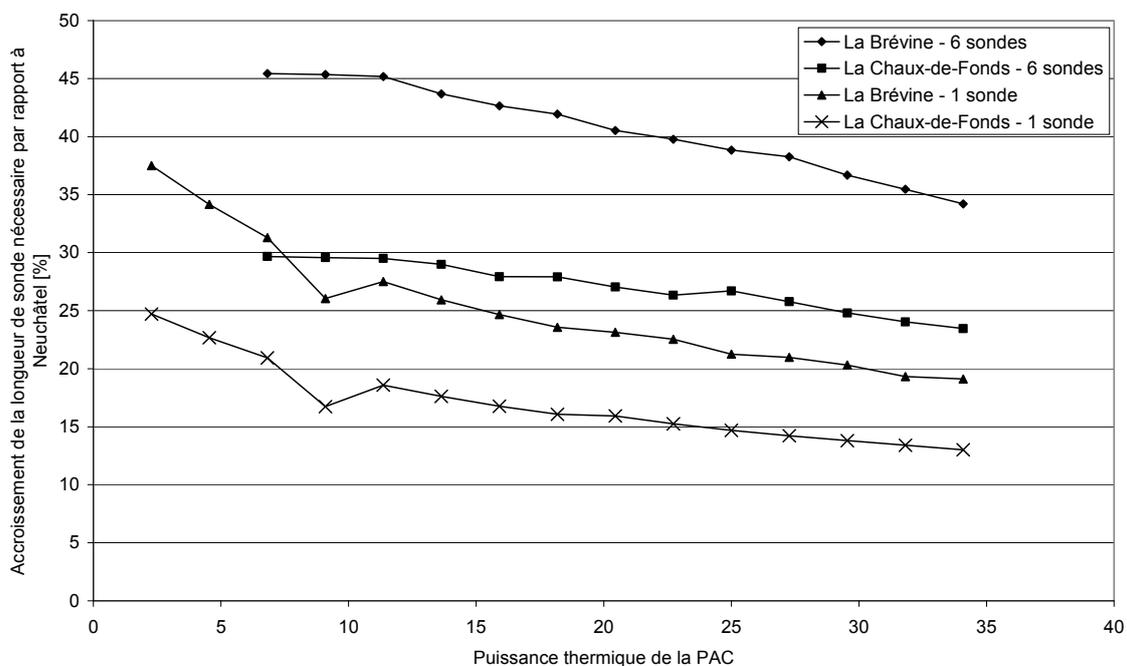


Figure 2.26. Accroissement de longueur nécessaire (en %) en fonction de la puissance thermique fournie, pour alimenter une installation à La Brévine ou à La Chaux-de-Fonds par rapport à une installation à Neuchâtel, pour une et six sondes.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Les puissances d'extraction du terrain ont été calculées pour ces trois régions. Elles sont plus faibles à La Brévine où elles varient de 38 à 63 W/m qu'à La Chaux-de-Fonds où elles valent 42 à 66 W/m et à Neuchâtel où elles sont comprises entre 53 et 75 W/m.

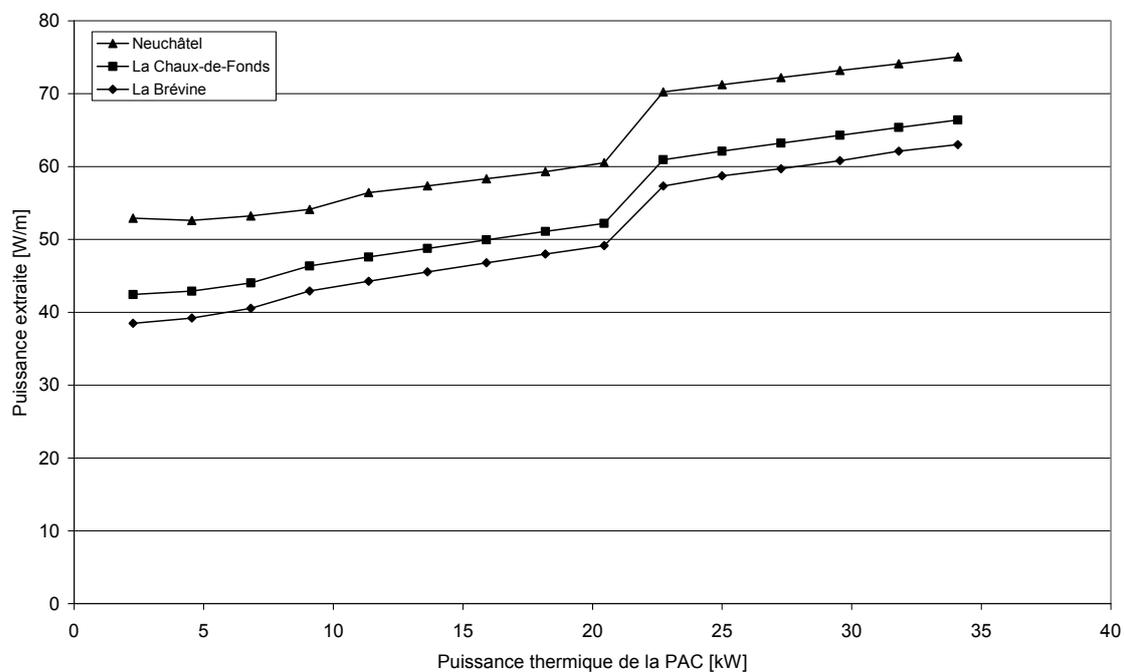


Figure 2.27. Puissance extraite du terrain en fonction de la puissance thermique de la PAC, pour trois régions du canton (La Brévine, La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel). Le seuil visible est dû au changement de régime du fluide dans la sonde lié à l'augmentation du débit nécessaire.

Synthèse de l'effet de la température moyenne annuelle de l'air

La température annuelle moyenne de l'air dans le canton de Neuchâtel varie entre 5.8 et 11.1 °C. Cette différence de température en surface se retrouve également en profondeur. Ce paramètre a par conséquent un effet important sur le rendement thermique des SGV, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement. Pour une longueur de sonde donnée, la perte de puissance extraite est de l'ordre de 2.5 W/m pour une diminution de la température annuelle moyenne de l'air de 1 °C.

De plus, la température moyenne annuelle de l'air a un effet plus important sur les sondes courtes, c'est-à-dire si :

- la demande thermique annuelle diminue ;
- pour une même demande thermique, le nombre de sondes augmente.

Effectivement, à faible profondeur, la proportion entre l'apport de chaleur depuis la surface et l'apport de chaleur du flux géothermique augmente. Une baisse de la température moyenne annuelle de l'air y est donc moins compensée par le flux géothermique.

Les tableaux 2.12 et 2.13 offrent une synthèse des puissances d'extraction utilisables et des accroissements des longueurs de sonde en fonction de la situation de l'installation dans le canton, pour différentes tailles de bâtiments.

Tableau 2.12. Puissance extraite du terrain pour des bâtiments de différentes tailles, dans trois régions du canton : Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds et La Brévine où les températures moyennes annuelles de l'air sont respectivement de 10.6, 7 et 5.8 °C.

Puissance extraite du terrain [W/m]	Villa (150 m²) (10'000 kWh/an)	Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)
Neuchâtel	53	57	72
La Chaux-de-Fonds	43	49	63
La Brévine	39	46	60

Tableau 2.13. Accroissement de longueur de sonde nécessaire pour alimenter des bâtiments de différentes tailles à La Brévine et à La Chaux-de-Fonds, par rapport à une installation à Neuchâtel.

Accroissement de la longueur de la sonde [%]	Villa (150 m²) (10'000 kWh/an)	Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)
La Chaux-de-Fonds	23	18	14
La Brévine	34	26	21

2.4.4 Espacement et influences mutuelles entre les sondes

Introduction

Comme mentionné au paragraphe 2.2.2, la distance entre les sondes d'une installation a une influence sur le rendement thermique du système. Une distance minimale doit être respectée entre les sondes pour éviter une surexploitation de la chaleur du sous-sol pouvant conduire à un mauvais fonctionnement de l'installation, se traduisant par une diminution du COP de la pompe à chaleur et une augmentation drastique de la quantité d'électricité consommée, ou dans le pire des cas, par le gel du terrain aux alentours de la sonde et par une panne de l'installation. Dans le cas d'un champ de sonde où cette distance ne peut pas être respectée, une recharge thermique du terrain en été doit être effectuée.

Le volume d'influence de l'installation dans le sous-sol dépend de la profondeur de la sonde et de la conductivité thermique du terrain. Plus la sonde est profonde, plus son influence latérale augmente. Par ailleurs, si la conductivité thermique est faible, la variation de température se propage moins loin dans le sous-sol mais sa valeur est localement plus importante.

De manière générale, plus les sondes sont éloignées les unes des autres, meilleur sera leur rendement ; la distance à partir de laquelle il n'y a plus aucune influence est estimée à la moitié de la longueur de la sonde (Pahud et al., 2002). En revanche, une distance de moins de 5 m entre les sondes conduit à un gel rapide du terrain dans les premières années d'exploitation (Signorelli et al., 2004). Dans le canton de Neuchâtel, aucune valeur minimale n'est fixée pour la distance entre deux sondes d'une même installation, par contre une distance minimale de 10 m doit être respectée entre deux installations.

Pour évaluer les interactions entre plusieurs installations, Rybach & Sanner (2000) ont modélisé l'influence mutuelle de 60 maisons individuelles. Chaque maison est équipée d'une PAC d'une puissance de 7 kW, alimentée par deux SGV. Cette étude a permis de montrer qu'à partir d'une distance de 40 m entre les installations, il n'y a plus d'influence mutuelle. De plus, par rapport à une installation isolée, il faut compter environ 60 % de longueur de sonde supplémentaire s'il y a plusieurs installations espacées de 15 m et 25 % si elles sont espacées de 20 m (Fig. 2.28).

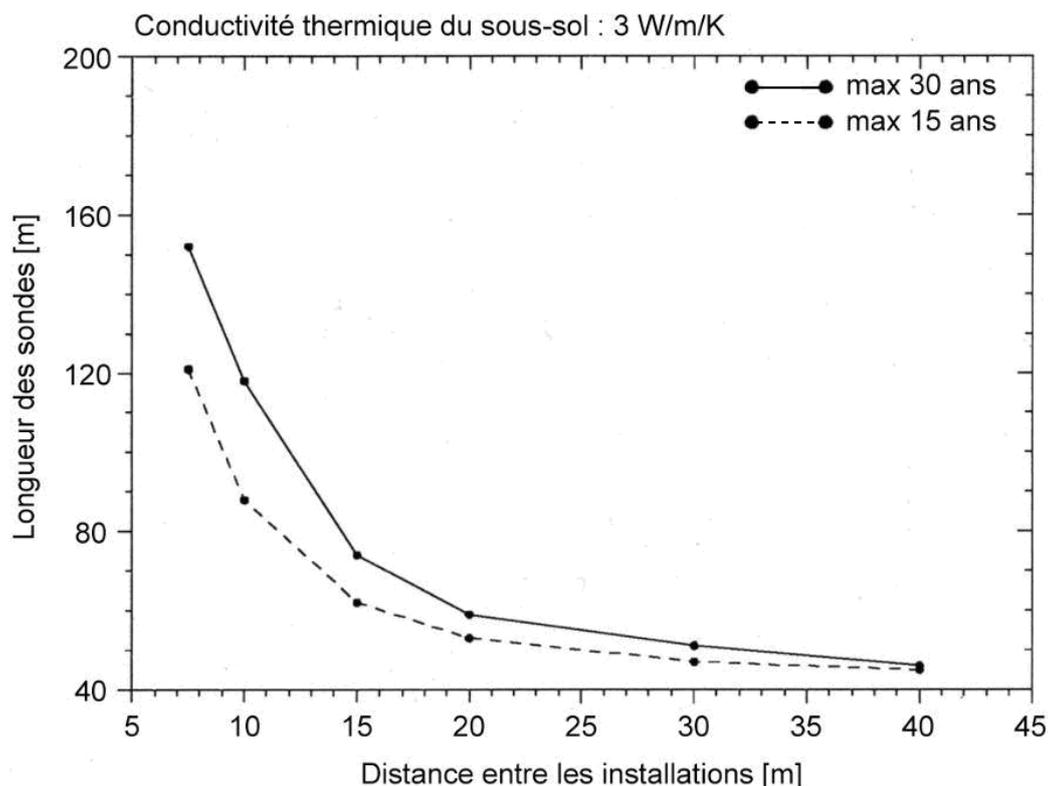


Figure 2.28. Longueur totale de sonde nécessaire en fonction de l'espacement entre des installations de 7 kW et une durée d'exploitation de 15, respectivement 30 ans (Rybach & Sanner 2000).

Paramètres de simulation

Pour cette simulation des demandes thermiques de 5'000 à 75'000 kWh/an ont été utilisées pour des installations alimentées par deux sondes et par six sondes disposées en rectangle. Dans un premier temps, la simulation a été réalisée avec un espacement de 8 m entre les sondes, puis avec un espacement de 16 m. La longueur totale recommandée a été calculée pour ces différentes configurations.

Les valeurs des autres paramètres utilisés sont celles du tableau 2.9. La température moyenne de l'air à La Chaux-de-Fonds a été utilisée.

Résultats

Si l'espacement entre les sondes augmente, leur influence mutuelle et par conséquent la longueur totale de sonde nécessaire diminuent. L'influence de l'espacement est moins marquée dans le cas de deux sondes que dans le cas de six sondes (Fig. 2.29).

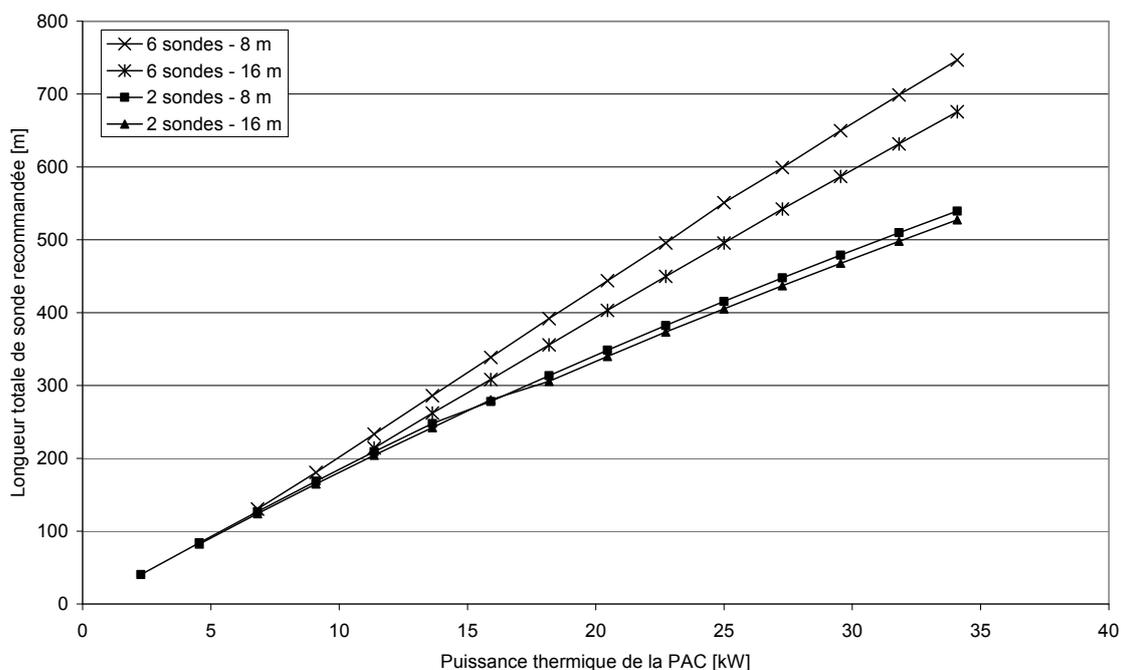


Figure 2.29. Longueur totale de sonde recommandée en fonction de la puissance thermique fournie, pour deux sondes et six sondes, séparées de 8 m puis de 16 m.

Cette figure met en évidence que l'augmentation du rendement thermique lorsque l'espacement passe de 8 à 16 m n'est pas très importante. Pour six sondes, la puissance thermique fournie gagnée pour une augmentation totale de 10 m de sonde passe de 0.44 à 0.49 kW lorsque l'espacement augmente de 8 à 16 m. L'influence de l'espacement est plus faible dans le cas de deux sondes pour lesquelles ces valeurs varient seulement de 0.62 à 0.65 kW.

Plus le nombre de sondes est grand, plus les interactions entre elles sont importantes. Pour cette raison, l'espacement entre les sondes a une influence plus forte s'il y a plus de sondes.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le gain réalisé sur la longueur totale nécessaire de sonde lorsque l'espacement passe de 8 à 16 m a été calculé pour les deux cas de la figure 2.29. Ce calcul a montré que le gain est constant en fonction de la demande thermique du bâtiment. Il est de 2 % dans le cas de deux sondes et de 10 % dans le cas de six sondes. Le gain de longueur totale des sondes a ensuite été recalculé pour plusieurs espacements jusqu'au maximum de 55 m accepté par le logiciel ainsi que pour 3, 4 et 5 sondes (Fig. 2.30).

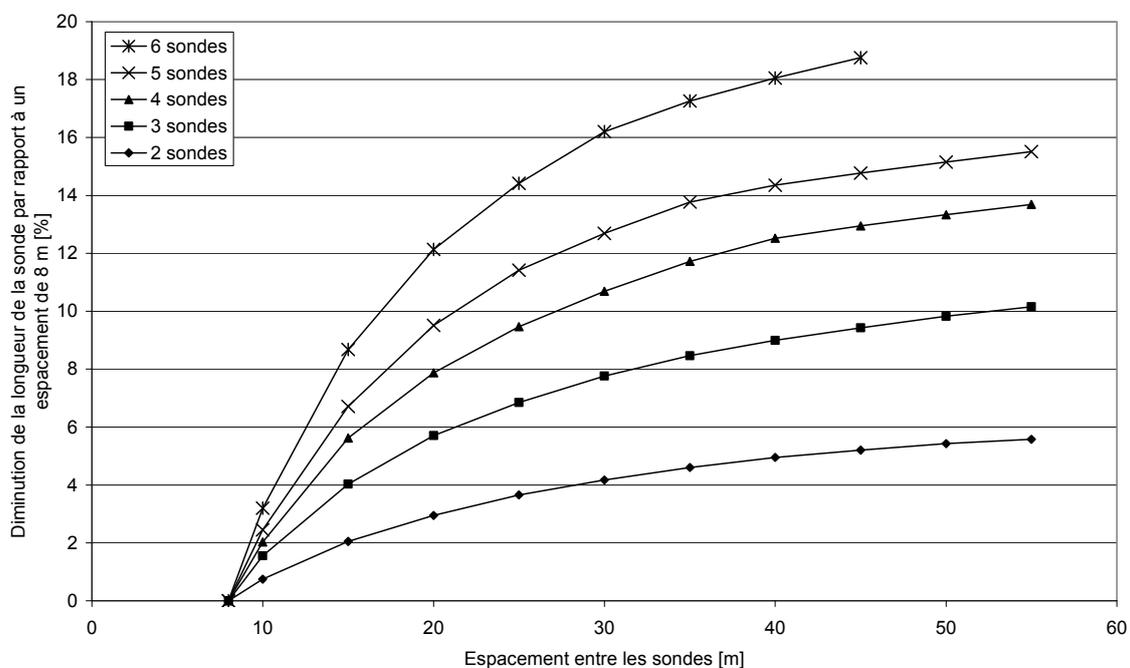


Figure 2.30. Diminution de la longueur de sonde nécessaire (en %) pour différents espacements par rapport à un espacement de 8 m, pour deux à six sondes. Cette diminution ne dépend pas de la demande thermique du bâtiment ni de la température moyenne annuelle de l'air à l'endroit de son implantation.

La diminution de la longueur totale de sonde varie de manière logarithmique avec l'espacement. Plus le nombre de sondes est élevé, plus l'effet de l'espacement est important. Effectivement, si séparer les sondes de 16 m suffit pour gagner 10 % sur la longueur totale des sondes dans le cas de six sondes, il faut les espacer de 53 m pour réaliser un gain équivalent dans le cas de trois sondes. Un gain de 10 % n'est pratiquement pas réalisable dans le cas de deux sondes.

La puissance extraite du terrain a également été calculée pour les installations de deux et de six sondes pour un espacement de 8 et 16 m (Fig. 2.31). De la même manière que pour la diminution de la longueur de la sonde, la puissance extraite du terrain n'augmente pas beaucoup entre ces deux espacements. Elle varie entre 41 et 48 W/m pour deux sondes et entre 39 et 34 W/m pour six sondes.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

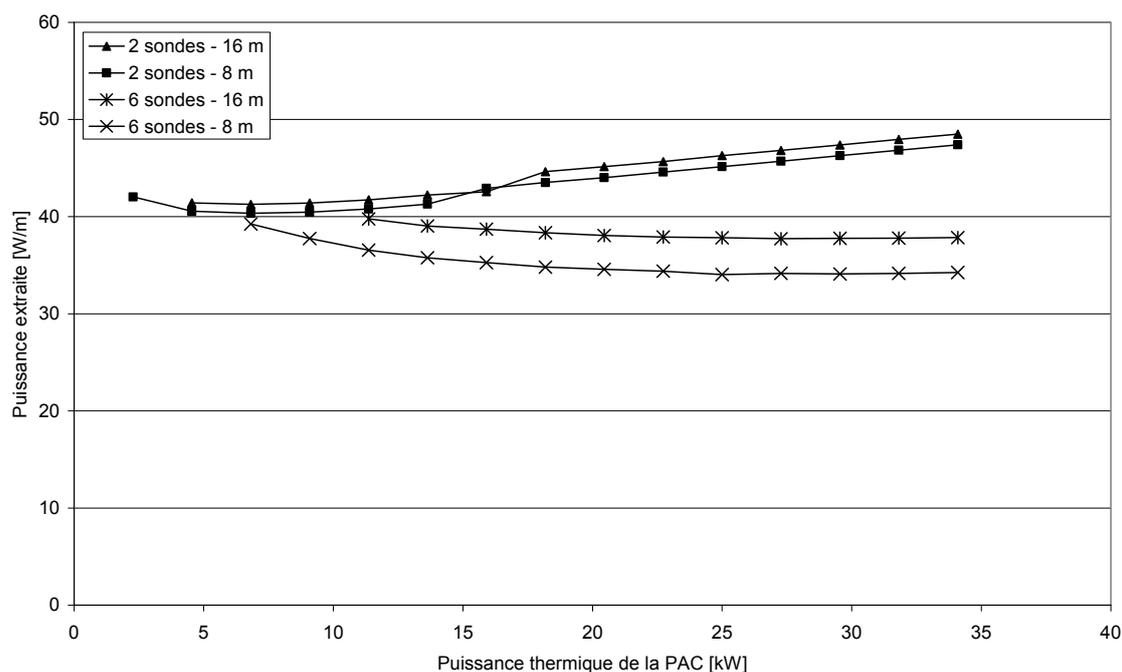


Figure 2.31. Puissance extraite du terrain en fonction de la puissance thermique de la PAC, pour une installation alimentée par deux sondes et par six sondes espacées de 8 et 16 m.

Synthèse de l'effet de l'espacement entre les SGV

Il est très important lors de l'implantation d'une installation équipée de plusieurs sondes de respecter une distance minimale entre les sondes supérieure à 5 m, mais de préférence de l'ordre de 7 à 8 m. Au-delà de 8 m, les résultats de la simulation ont montré qu'augmenter la distance entre les sondes n'avait pas une influence significative sur la longueur totale nécessaire de l'échangeur de chaleur pour les installations de deux et trois sondes. L'influence est un peu plus marquée pour les installations de quatre à six sondes, mais reste toutefois modérée. Dans tous les cas, le gain réalisé sur la longueur totale des sondes en fonction de l'espacement est le même quelle que soit la demande thermique annuelle du bâtiment.

Par conséquent, un espacement de 8 m peut être utilisé pour des installations comprenant deux ou trois sondes. Pour des installations alimentées par quatre à six sondes, il peut être judicieux d'utiliser le maximum d'espace à disposition pour l'implantation des sondes, puisqu'une faible différence d'espacement permet de gagner quelques mètres par sonde ou d'améliorer le rendement thermique de l'installation. Toutefois, pour un champ de sondes, l'augmentation des longueurs de raccordement devra être calculée en fonction du gain sur la longueur des sondes. D'autre part, une recharge thermique estivale du champ de sondes sera toujours plus efficace sur le plan énergétique.

2.4.5 Différences de performances et de coût entre plusieurs sondes courtes et une sonde unique longue

Introduction

Dans le canton de Neuchâtel, la profondeur autorisée pour les forages géothermiques est limitée en présence de la nappe captive du Malm et du Valanginien. Cette profondeur limite varie entre 60 et 180 m (Annexe 2.1). La profondeur est limitée à 60 m sur une grande partie de la surface du canton, où par conséquent plusieurs sondes courtes sont nécessaires pour alimenter une maison familiale.

D'autre part, pour éviter une multiplication importante des systèmes individuels et donc des sondes, notamment dans les zones à haute densité d'habitation, il peut être judicieux de construire une grande installation, dimensionnée pour alimenter plusieurs bâtiments. Ce genre d'installation doit être équipé soit d'une SGV longue ou de plusieurs sondes de longueur standard.

L'analyse de performance et de coût présentée dans ce chapitre doit permettre de trouver la meilleure solution envisageable pour ces situations.

Paramètres

L'analyse a été réalisée sur des bâtiments d'une demande thermique comprise entre 5'000 et 75'000 kWh/an équipés de une à six sondes et situés à Neuchâtel. Les autres paramètres utilisés sont ceux du tableau 2.9. La longueur de sonde recommandée a été calculée pour ces configurations.

Les différentes configurations ont été comparées sur la base de ces résultats, mais également à partir d'une estimation de leur coût. Pour cette estimation, des renseignements sur les prix actuels du marché ont été pris auprès de plusieurs compagnies de forages géothermiques en Suisse romande (Tabl. 2.14).

Tableau 2.14. Prix indicatifs des différents éléments d'un forage géothermique en Suisse romande réalisé dans des conditions d'accès et de terrain habituelles.

Eléments	Prix indicatifs (CHF/m)
Forage jusqu'à 200 m	60
Sonde DN 32 mm	15
Sonde DN 40 mm	20
Remplissage du trou (matériau de bonne conductivité thermique)	9
Ecarteurs des sondes	8
Total SGV unique, selon les standards pratiqués	80 à 85
Total SGV unique, avec les améliorations proposées ci-dessus	92 à 97
Raccordements en surface (tuyaux et fouilles)	~225

Dans le cas de difficultés d'implantation, dues par exemple à l'accès au site (pente, altitude) ou à la présence de roches particulièrement résistantes au forage comme le granite, ces prix augmentent de manière significative.

Résultats

Pour un rendement thermique semblable, la longueur totale de sonde nécessaire est plus grande s'il y a plusieurs sondes courtes et ce d'autant plus si la demande annuelle de chaleur est élevée (Fig. 2.32).

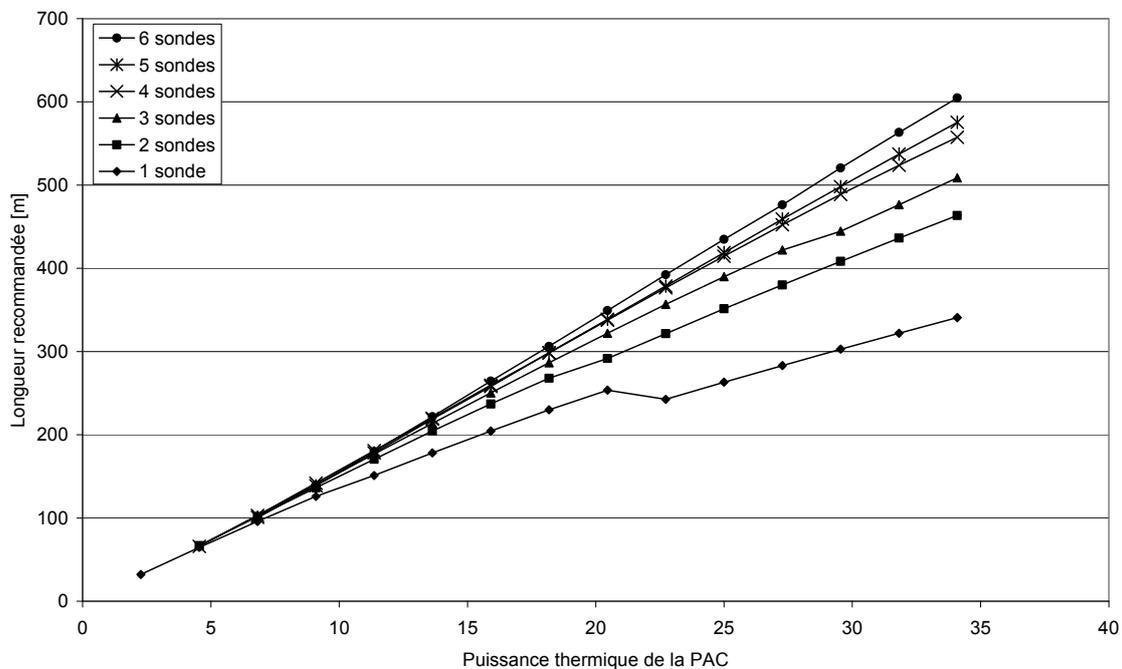


Figure 2.32. Longueur totale de sonde nécessaire pour une à six sondes en fonction de la puissance thermique de la PAC. Le seuil visible sur la droite « 1 sonde » est dû au changement de régime du fluide lié à l'augmentation du débit.

Le gain de puissance thermique pour une augmentation de 10 m de sonde est compris entre 0.83 et 1.16 kW pour une seule sonde, en fonction du régime du fluide. Pour deux sondes, il diminue à 0.75, respectivement 0.54 kW pour six sondes.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

En pourcentage, l'accroissement de longueur totale de sonde pour les configurations de deux à six sondes par rapport à une sonde unique est très important. Pour des puissances thermiques inférieures à 20 kW, il varie entre 3 et 38 %. Il augmente fortement au-dessus de 20 kW où il s'échelonne entre 35 % pour deux sondes et plus de 70 % pour six sondes (Fig. 2.33). Ce saut est dû au fait que dans le cas d'une sonde, le régime du fluide passe de laminaire à turbulent entre 20 et 25 kW, ce qui donne un rendement thermique encore plus favorable.

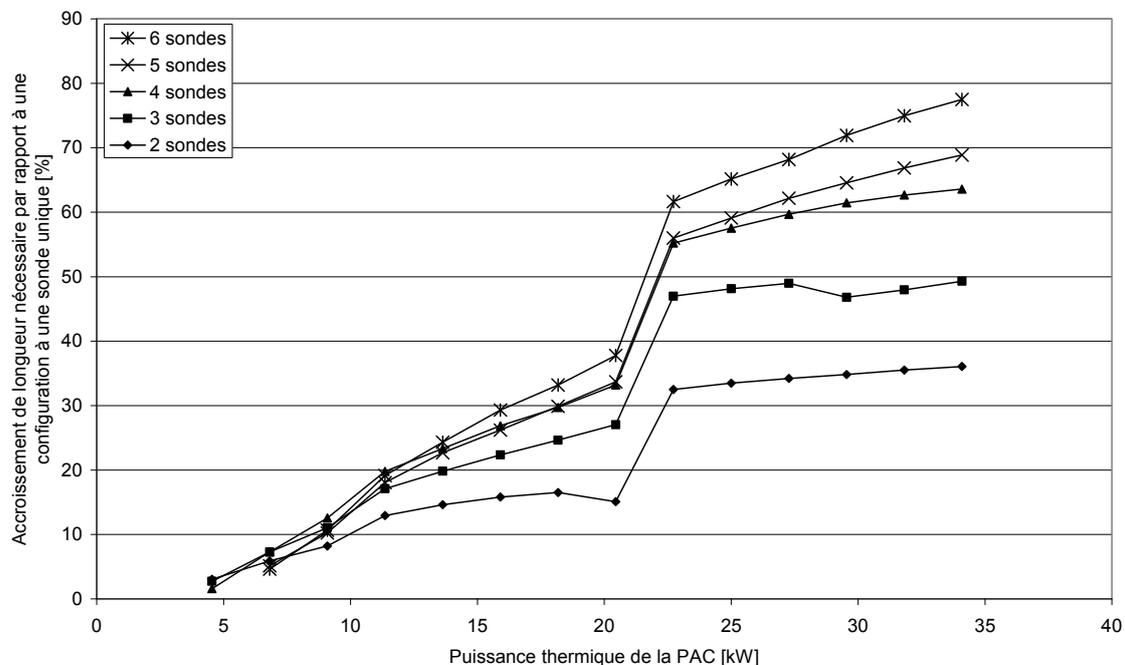


Figure 2.33. Accroissement de longueur nécessaire pour des installations alimentées par deux à six sondes, par rapport à la longueur d'une sonde unique. Le saut est dû au changement de régime du fluide entre 20 et 25 kW pour une sonde.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le même phénomène est mis en évidence par la puissance extraite du terrain obtenue pour ces différentes configurations. Elle est nettement plus élevée pour une seule sonde que pour tous les autres cas (Fig. 2.34).

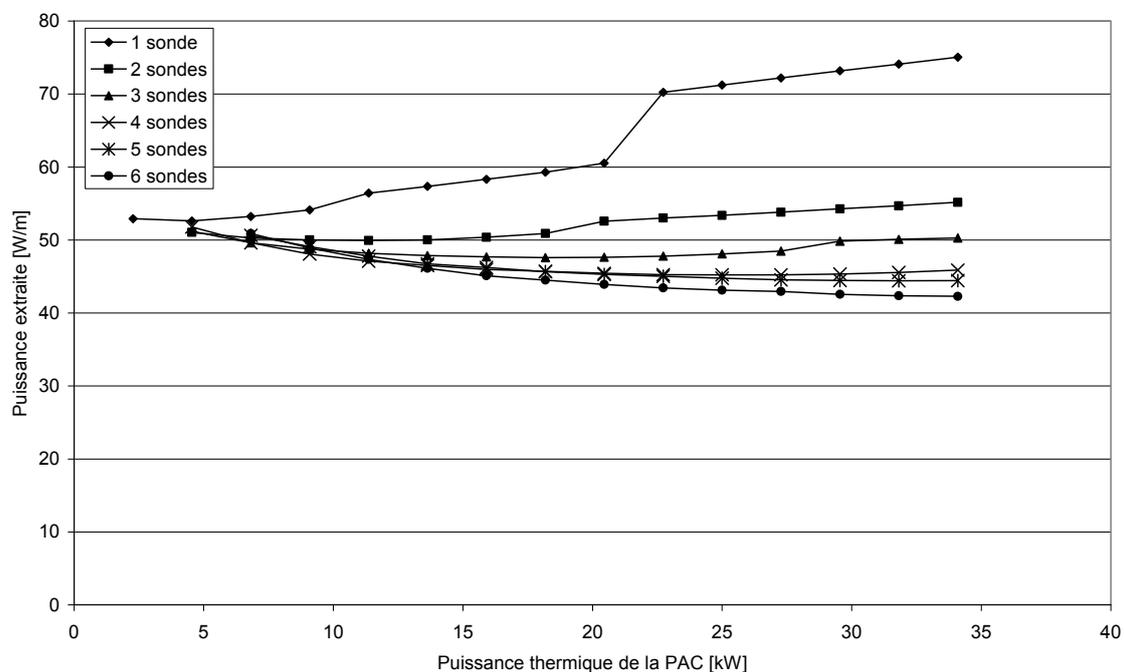


Figure 2.34. Puissance extraite du terrain en fonction de la puissance thermique de la PAC, pour une à six sondes. Le seuil sur la courbe « 1 sonde » est dû au changement de régime du fluide.

Pour une sonde unique, la puissance extraite du terrain varie entre 53 et 75 W/m avec la puissance thermique de la PAC. Elle augmente encore légèrement pour les installations de deux sondes, pour lesquelles elle est comprise entre 51 et 55 W/m. Pour des installations de trois sondes, sa valeur est presque constante, aux alentours de 50 W/m. Par contre, pour quatre à six sondes la puissance extraite du terrain diminue avec la puissance thermique de la PAC.

A partir de quatre sondes, il est recommandé voire indispensable de procéder à une recharge thermique du sous-sol en été pour ne pas surexploiter la réserve thermique du sous-sol. Cette recharge peut se faire de manière naturelle en rafraîchissant les bâtiments (geocooling, freecooling), ou en injectant dans le sous-sol de l'eau réchauffée par des panneaux solaires thermiques.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le tableau 2.15 synthétise la longueur de sonde nécessaire pour trois types de bâtiments. Le tableau 2.16 montre l'accroissement de longueur de sonde nécessaire en pourcent, par rapport à une installation à une sonde unique dans les trois mêmes cas.

Tableau 2.15. Longueur totale de sonde nécessaire pour trois bâtiments de taille différente, alimentés par une à six sondes, espacées de 8 m.

Nombre de sonde Type de bâtiment	1	2	3	4	5	6
	Longueur totale de l'échangeur [m]					
Grande villa (250 m ² , 15'000 kWh/an)	96	102	103	103	101	101
Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	178	204	214	220	219	222
Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)	283	380	422	452	459	476

Tableau 2.16. Accroissement de longueur totale nécessaire de sonde pour trois bâtiments de taille différente alimentés par deux à six sondes espacées de 8 m, par rapport au même bâtiment alimenté par une seule sonde.

Nombre de sonde Type de bâtiment	2	3	4	5	6
	Accroissement de longueur [%]				
Grande villa (250 m ² , 15'000 kWh/an)	6	7	7	5	5
Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	15	20	23	23	24
Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)	34	49	60	62	68

Les longueurs totales de sonde recommandées sont légèrement inférieures dans le cas de cinq et six sondes, pour les petits bâtiments. Ceci est dû probablement au choix de la configuration des sondes et ne peut pas être interprété comme un gain du rendement thermique pour ces installations.

L'analyse des coûts des installations a été réalisée sur la base des résultats du tableau 2.15, avec les prix présentés dans le tableau 2.14. Etant donné que ces prix sont indicatifs et peuvent varier rapidement notamment parce qu'ils sont liés au prix du pétrole, seul le pourcentage d'augmentation des coûts pour les configurations de deux à six sondes par rapport à la configuration à une sonde unique sont présentés dans ce travail (Tabl. 2.17).

Tableau 2.17. Ordre de grandeur des augmentations de prix (%) pour trois types de bâtiments alimentés par deux à six sondes, par rapport à une sonde unique.

Type de bâtiment	Nombre de sonde				
	2	3	4	5	6
Grande villa (250 m ² , 15'000 kWh/an)	30	55	75	100	120
Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	20	40	50	65	75
Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)	40	65	75	85	95

Le coût de l'échangeur thermique de n'importe laquelle de ces configurations est toujours au moins 20 % plus élevé que celui d'une sonde unique. La différence est la plus faible dans le cas du locatif de 5 appartements, pour lequel les sondes uniques coûtent un peu plus cher que pour les petits bâtiments parce qu'elles dépassent 150 m et doivent avoir 40 mm de diamètre. Le prix de la sonde unique d'un locatif de 10 appartements est probablement un peu sous-estimé, puisque le prix des forages augmente à partir de 200 m.

Synthèse de la comparaison entre les performances et les coûts d'une sonde longue ou de plusieurs sondes courtes

Les résultats de la simulation ont montré que les rendements thermiques des installations équipées de plusieurs sondes sont toujours inférieurs à ceux d'une sonde unique. Ce phénomène est mis en évidence par le tableau 2.18 qui synthétise les puissances d'extraction obtenues pour trois bâtiments de tailles différentes, alimentés par une à six sondes. Pour une petite installation, le rendement obtenu avec plusieurs sondes est légèrement plus faible que celui d'une sonde unique. Cette différence devient en revanche très marquée pour les installations avec une demande thermique annuelle plus importante.

Tableau 2.18. Puissance extraite du terrain obtenue pour trois types de bâtiments différents, alimentés par une à six sondes.

Nombre de sonde Type de bâtiment	1	2	3	4	5	6
	Puissance extraite du terrain [W/m]					
Grande villa (250 m ² , 15'000 kWh/an)	53	50	50	50	51	51
Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	57	50	48	47	47	46
Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)	72	54	48	45	45	43

A cause de cette baisse de rendement thermique, la longueur totale nécessaire et par conséquent le prix de l'échangeur augmentent très rapidement avec le nombre de sondes.

Ainsi, il est recommandé dans la mesure du possible d'installer toujours un nombre minimal de sondes pour alimenter une installation, et de préférence de favoriser l'implantation de grandes installations équipées d'une sonde géothermique verticale unique.

Dans les cas où il y a plus de quatre sondes installées, il est nécessaire voire indispensable de procéder à une recharge thermique du terrain en été afin de ne pas surexploiter la réserve thermique du sous-sol.

2.5 Synthèse des résultats et conclusions

La chaleur des roches du sous-sol est une ressource qui est disponible pratiquement partout et facilement exploitable. Elle est par conséquent utilisable pour chauffer et fournir l'eau chaude sanitaire de villas familiales, mais également de bâtiments de taille plus importante.

Le rendement thermique des sondes géothermiques verticales peut être estimé sur la base de la puissance extraite du terrain, qui englobe toutes les caractéristiques du site et de l'installation. Il représente le rapport entre l'énergie extraite du terrain et la longueur de sonde nécessaire. La puissance extraite du terrain dépend principalement de la conductivité thermique des roches du sous-sol. Dans le canton de Neuchâtel, la situation est favorable, puisque la majorité du sous-sol est constituée de calcaires ou de marnes, dont la conductivité thermique est comprise entre 2 et 3 W/m/K.

Les simulations ont mis en évidence que le rendement thermique des installations équipées d'une ou deux sondes augmente avec la demande thermique annuelle et donc avec la longueur nécessaire de l'échangeur de chaleur. Ceci s'explique par le fait que le gradient géothermique cause une augmentation de la température du terrain et par conséquent de l'énergie thermique exploitable avec la profondeur.

Trois autres paramètres liés au site peuvent avoir une influence significative sur le rendement thermique des sondes. La ressource thermique des roches peut être diminuée dans les massifs calcaires karstifiés, à cause des écoulements d'eau souterraine qui ont lieu à la base des aquifères karstiques et qui peuvent être suffisants pour affaiblir ou absorber la totalité du flux géothermique qui remonte vers la surface. La puissance extraite du terrain dépend aussi de la température moyenne annuelle de l'air sur le site de l'installation, liée directement à l'altitude. Finalement, il faut tenir compte du fait que la profondeur autorisée des sondes géothermiques est limitée sur une grande partie du territoire cantonal, à cause de la présence des nappes captives dans les calcaires du Malm et du Valanginien. La valeur de la limitation varie entre 60 et 180 m. Cette limitation impose pour de nombreux sites d'installer plusieurs sondes courtes à la place d'une seule sonde longue pour alimenter les installations. Dans ce cas, il faut prévoir un espace suffisant entre les sondes pour permettre le bon fonctionnement de l'installation.

L'influence de ces différents paramètres sur le rendement thermique des sondes a été évaluée dans le cadre de cette étude. La synthèse globale est présentée ci-dessous.

Implantation d'une sonde dans un massif calcaire

L'absorption du flux géothermique par les écoulements karstiques souterrains a été évaluée en comparant la longueur de sonde nécessaire pour un flux normal de 0.07 W/m², un flux affaibli de 0.035 W/m² et sans flux géothermique. La puissance extraite du terrain diminue lorsque le flux géothermique est affaibli, comme l'indique le tableau 2.19. L'effet de l'affaiblissement du flux est plus important sur les sondes profondes.

Tableau 2.19. Puissance extraite du terrain utilisable pour des bâtiments de différentes tailles implantés dans du calcaire à la Chaud-de-Fonds et pour trois flux géothermiques : cas normal de 0.07 W/m², cas intermédiaire de 0.035 W/m² et cas extrême, sans flux géothermique.

Puissance extraite du terrain [W/m]	Villa (150 m²) (10'000 kWh/an)	Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)
Cas normal (0.07 W/m ²)	43	49	63
Cas intermédiaire (0.035 W/m ²)	41	45	56
Cas extrême (0 W/m ²)	39	40	47

Même si dans l'absolu, l'absence de flux géothermique a une influence significative sur le rendement thermique des sondes, les régions concernées par ce phénomène sont relativement localisées au niveau du canton de Neuchâtel. Il s'agit des crêtes et des sommets comme Chaumont ou la Montagne de Boudry, ainsi que des flancs des vallées, qui sont des régions peu urbanisées, donc relativement peu susceptibles de servir pour l'implantation de SGV.

Température moyenne annuelle de l'air sur le site de l'implantation

Les moyens d'isolation des bâtiments étant souvent meilleurs dans les régions froides que dans les régions plus tempérées, il est admis que des habitations de taille semblable ont une demande thermique annuelle équivalente quelle que soit la température moyenne de l'air. La puissance extraite du terrain diminue lorsque la température annuelle moyenne s'abaisse. L'effet de la température est plus important sur les sondes courtes (Tabl. 2.20).

Tableau 2.20. Puissance extraite du terrain pour des bâtiments de différentes tailles, dans trois régions du canton : Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds et La Brévine où les températures moyennes annuelles de l'air sont respectivement de 10.6, 7 et 5.8 °C.

Puissance extraite du terrain [W/m]	Villa (150 m²) (10'000 kWh/an)	Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)
Neuchâtel	53	57	72
La Chaux-de-Fonds	43	49	63
La Brévine	39	46	60

Pour les petites demandes thermiques, la température moyenne annuelle de l'air a un effet très important. Il est impératif d'en tenir compte lors du dimensionnement des sondes pour de petites installations.

Performances d'une sonde longue ou de plusieurs sondes courtes

A cause des interactions entre les sondes, la longueur totale de sonde nécessaire pour alimenter un bâtiment est plus grande s'il y a plusieurs sondes. Ceci est mis en évidence par la diminution importante de la puissance extraite du terrain pour les installations alimentées par plusieurs sondes (Tabl. 2.21). D'autre part, les installations comprenant plusieurs sondes sont passablement plus coûteuses, notamment à cause du prix des raccordements nécessaires pour connecter les sondes.

Tableau 2.21. Puissance extraite du terrain obtenue pour trois types de bâtiments différents, alimentés par une à six sondes à Neuchâtel.

Nombre de sondes Type de bâtiment	1	2	3	4	5	6
	Puissance extraite du terrain [W/m]					
Grande villa (250 m ² , 15'000 kWh/an)	53	50	50	50	51	51
Locatif de 5 appartements (30'000 kWh/an)	57	50	48	47	47	46
Locatif de 10 appartements (60'000 kWh/an)	72	54	48	45	45	43

Espacement entre les sondes

Un espacement minimal de l'ordre de 7 à 8 m doit être respecté entre les sondes d'une installation. Une augmentation de l'espacement au-delà de 8 m n'a pas une influence significative sur le rendement thermique des sondes. Par conséquent, un espacement de 8 m peut être utilisé pour des installations comprenant deux ou trois sondes. Pour des installations alimentées par quatre à six sondes, une augmentation de l'espacement conduit à un léger gain de rendement thermique. Pour des installations de plus de quatre sondes, il est souvent indispensable de procéder à une recharge thermique du terrain en été pour ne pas surexploiter la réserve thermique du sous-sol. Le tableau ci-dessous (Tabl. 2.22) montre le gain de longueur de sonde (en %) en fonction de l'espacement, par rapport à un espacement minimal de 8 m.

Tableau 2.22. Diminution de la longueur de sonde nécessaire (en %) pour des espacements de 10, 15 et 20 m par rapport à un espacement de 8 m, pour deux à six sondes.

Espacement [m] Nombre de sondes	10	15	20
	Gain de longueur totale de sonde [%]		
2	1	2	3
3	2	4	6
4	2	6	8
5	2	7	10
6	3	9	12

En plus des paramètres du terrain cités ci-dessus, les paramètres techniques de la sonde géothermique verticale ont une influence significative sur son fonctionnement. Par conséquent, ils doivent être optimisés si l'on souhaite obtenir le meilleur rendement thermique possible. Un

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

matériau de remplissage du forage avec une bonne conductivité thermique (2 W/m/K), la pose d'écarteurs qui assurent un espacement maximal entre les branches du U lors de l'installation de la sonde et l'utilisation d'une sonde avec un diamètre adapté permettent d'assurer un rendement thermique optimal de l'échangeur de chaleur.

Le tableau 2.23 présente une synthèse de tous les paramètres étudiés dans ce chapitre, avec leur effet et leur importance sur le dimensionnement des sondes géothermiques verticales.

Tableau 2.23. Synthèse de l'effet et importance des paramètres du site et de l'installation sur le dimensionnement des sondes géothermiques verticales.

Paramètre	Référence	Importance sur le dimensionnement	Effet sur le dimensionnement
Conductivité thermique λ	§ 2.4.1 Fig. 2.11	Forte	Plus λ est élevé, plus la longueur de sonde recommandée diminue. Pour une petite implantation (1 à 6 sondes), la conductivité thermique peut être estimée en fonction de la géologie du sous-sol. Dans le cas d'un grand champ de sondes, il est préférable de la déterminer localement au moyen d'un test de réponse thermique.
Capacité calorifique C_V	§ 2.4.1 Fig. 2.12	Faible	Plus C_V est élevée, plus la longueur de sonde recommandée diminue
Température annuelle moyenne de l'air T_{moy}	§ 2.4.3	Forte	Plus T_{moy} est basse, plus la sonde doit être longue. Perte d'environ 2.5 W/m/°C. Par rapport à une sonde unique implantée à Neuchâtel, prévoir 13 à 25 % de longueur supplémentaire à La Chaux-de-Fonds et 19 à 38 % à La Brévine (les pourcentages correspondent à des besoins thermiques de 5'000 et 75'000 kwh/an.)
Flux géothermique	§ 2.4.2	Moyenne	Si on se trouve dans un massif calcaire bien karstifié et non saturé, prévoir 5 à 45 % de longueur supplémentaire si le flux géothermique est totalement absorbé et 2 à 15 % s'il n'est qu'à moitié absorbé (les pourcentages correspondent à des besoins thermiques de 5'000 et 75'000 kwh/an.)
Nombre de forages	§ 2.4.5	Moyenne	A cause des interactions entre les sondes, prévoir une longueur totale d'échangeur plus longue s'il y a plusieurs sondes. Plus le nombre de sondes est faible, meilleur est le rendement thermique de l'installation.
Configuration	§ 2.4.1 Tabl. 2.5	Faible	A cause des interactions entre les sondes, le rendement thermique est meilleur si les sondes sont implantées en ligne plutôt qu'en carré.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Paramètre	Référence	Importance sur le dimensionnement	Effet sur le dimensionnement
Espacement	§ 2.4.4	Moyenne	S'il y a plusieurs sondes, il faut prévoir un espacement de 7 à 8 m entre elles, excepté dans le cas d'un grand champ de sondes. S'il y a 4 à 6 sondes, un gain de rendement thermique peut être obtenu en les espaçant de quelques mètres supplémentaires.
Type de sonde	§ 2.4.1 Tabl. 2.4	Moyenne	La sonde en double-U a un très bon rendement thermique et est relativement peu coûteuse. C'est en règle générale celle qui est utilisée.
Diamètre de la sonde	§ 2.4.1	Faible	Des sondes avec des diamètres standard sont utilisées pour les SGV. Le diamètre pourrait être adapté afin que le régime d'écoulement du fluide soit le plus proche possible de la turbulence. Ceci permettrait d'optimiser la longueur de l'échangeur.
Espace entre les tubes en U	§ 2.4.1	Moyenne	La pose d'écarteurs le long de la sonde permet d'assurer un meilleur rendement thermique de l'installation.
Conductivité thermique du matériau de remplissage	§ 2.4.1	Forte	L'utilisation d'un ciment de remplissage à bonne conductivité thermique (2 W/m/K) à la place du mélange standard bentonite/ciment (0.6 W/m/K) permet d'assurer un meilleur rendement thermique de l'installation, voire d'optimiser la longueur de la sonde.
Qualité du remplissage	§ 2.4.1	Faible	Même si la perte de rendement thermique liée à ce paramètre n'est pas très grande, il est très important de toujours effectuer le remplissage du forage dans les meilleures conditions possibles.
Type de fluide caloporteur	§ 2.4.1 Tabl. 2.6	Moyenne	C'est le monopropylène glycol 33 % qui est souvent utilisé comme fluide caloporteur dans les sondes. Certains fluides ont cependant des propriétés physiques nettement meilleures; leur utilisation dans les sondes permettrait d'optimiser la longueur de l'échangeur.

2.6 Références

- Badino G., 2005. Underground drainage systems and geothermal flux. Acta Carsologica, 34, 2 : 277-316.
- Bassetti S., Rohner E., Signorelli S., & Matthey B., 2006. Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden. Rapport pour l'OFEN, non publié.
- Benderitter Y. & Roy B., 1993. Flow characterization through heat transfer evidence in a carbonate fractured medium : first approach. Water Resources Research, 29, 11 : 3741-3747.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Courtois N., Grisey A., Grasselly D., Menjot A., Noël Y., Petit V. & Thiery D., 2007. Application of aquifer thermal energy storage for heating and cooling of greenhouses in France : a pre-feasibility study. Proc. European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany.
- Eskilson P., 1987. Thermal analysis of heat extraction boreholes. Thèse de doctorat, department of Mathematical Physics, University of Lund. Lund, Sweden.
- Eugster W. J. & Rybach L., 1999. How renewable are borehole heat exchanger systems? Bulletin d'Hydrogéologie, 17 : 313-321.
- Hellström G., 1991. Ground heat storage. Thermal analysis of duct storage systems. Part I Theory. Department of Mathematical Physics, University of Lund. Lund, Sweden.
- Hellström G. & Sanner B., 2000. Earth Energy Designer (EED). User manual. Version 2.0, 43 pp.
- Jeannin P.-Y., 1990. Températures dans la zone vadose du karst. Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 9 : 89-102.
- Jeannin P.-Y., Liedl R. & Sauter M., 1997. Some concepts about heat transfer in karstic systems. Proc. 12th International Congress of Speleology, 1 : 195-198.
- Luetscher M. & Jeannin P.-Y., 2004. Temperature distribution in karst systems : the role of air and water fluxes. Terra Nova, 16 : 344-350.
- Matthey B., 1974. Gradient géothermique et hydraulique souterraine dans un aquifère karstique (Bassin de la source de l'Areuse/NE). Bulletin Société neuchâteloise des sciences naturelles, 97 : 301-314.
- Matthey B. & Pahud D., 1996. Recherche des paramètres permettant d'élever la température moyenne des fluides circulant dans des sondes en terre verticales et destinés à l'alimentation de pompes à chaleur. Rapport pour l'OFEN25 pp, 3 annexes.
- Matthey B., Pahud D. & Buchi J., 1996. Améliorer la productivité des sondes en terre. Calculs et mesures in situ. Geothermie – Energie der Zukunft. Konstanz 1996: 13 pp.
- Matthey B. & Freiburghaus S., 1999. Rafraîchissement d'un collège par sondes terrestres et distribution par le sol. Cisbat 99-Lausanne-1999: 337-342.
- Matthey B., Freiburghaus S. & Langel S., 1999. Stockage de chaleur solaire par sondes verticales et couplage à une pompe à chaleur. Geothermie.ch, 24 : 9-12.
- Pahud D. & Matthey B., 2001. Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ. Energy and Buildings, 33 : 503-507.
- Matthey B. & Pillonel B., 1983. Installation solaire du Mont de Pitié à Cortailod (NE). Résultats après une année de mesure. Energie solaire : 17-21.
- OFEV, 1994. Directives pour l'exploitation de la chaleur au moyen de sondes géothermiques fermées : 24 pp.
- OFEV, 2004. Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines : 133 pp.
- OFEV, 2007. Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Umwelt-Vollzug, BAFU / OFEV, version provisoire: 57pp.
- Pahud D., Mégel T., Kohl T. & Brenni R., 2002. Langzeiteffekt von Mehrfach-Erdwärmesonden. Rapport pour l'OFEN: 21 pp.
- Reuss M. & Sanner B., 2001. Planung und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen : Basis einer nachhaltigen Erdwärmennutzung, VDI-Richtlinie 4640 und Berechnungsverfahren. In : Erdwärme zum Heizen und Kühlen. Potentiale, Möglichkeiten und Techniken der Oberflächennahen Geothermie. Kleines Handbuch der Geothermie. Geothermische Vereinigung : 33-50.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Rybach L. & Sanner B., 2000. Ground-source heat pump systems. The European experience. *Geo-Heat-Center Bulletin*, 21: 16-26.
- Rybach L., 2001. Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and worldwide; sustainability aspects of GHPs. Chapter 2.1, *International summer school on direct application of geothermal energy*. *Int. Geothermal Days Germany* : 85-100.
- Rybach L. & Kohl T., 2003. The geothermal heat pump boom in Switzerland and its background. *Proc. International Geothermal Congress 2003, Reykjavik/Iceland* : 47-52.
- Šafanda J., Heidinger P., Wilhelm H. & Čermak V., 2005. Fluid convection observed from temperature logs in the karst formation of the Yucatán Peninsula, Mexico. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2 : 326-331.
- SIA, 1988. Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température. *Documentation D025* : 110 pp.
- SIA, 1996. Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. *Dokumentation D0136* : 142 pp.
- SIA, 2003. Energie aus dem Untergrund. Erdreichspeicher für moderne Gebäudetechnik. *Dokumentation D0179* : 115 pp.
- SIA, 2008. Erdwärmesonden. Norm SIA 384/6, version provisoire: 66 pp.
- Signorelli S. & Kohl T., 2002. Validieren des Programms EWS und Optimieren der Erdwärmesondenlänge. *Rapport pour l'OFEN* : 58 pp.
- Signorelli S., Kohl T. & Rybach L., 2004. Sustainability of production from borehole heat exchanger fields. *29 Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford* : 356-361.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2001. VDI Guideline 4640, Part 1 : Thermal Use of the underground. Fundamentals, approvals, environmental aspects, Beuth Verlag GmbH, Berlin: 31 pp.
- Verein Deutscher Ingenieure, 2001. VDI Guideline 4640, Part 2 : Thermal Use of the underground. Ground source heat pump systems, Beuth Verlag GmbH, Berlin: 43 pp.

3. POTENTIEL DES GÉOSTRUCTURES ÉNERGÉTIQUES

3.1 Introduction

Le présent chapitre 3 est destiné à l'évaluation du potentiel géothermique exploitable sur le territoire du canton de Neuchâtel dans le domaine des géostructures énergétiques. La première partie, soit le point 3.2, comprend une présentation générale de la technologie des pieux et autres géostructures énergétiques. On y décrit successivement le concept général du procédé, ses avantages et les méthodes de dimensionnement énergétiques. Cette partie inclut également des indications sur les aspects constructifs et économiques.

La deuxième partie (point 3.3) passe en revue quelques exemples significatifs réalisés en Suisse et à l'étranger au cours de ces dernières années, en mentionnant également les possibilités offertes par les ouvrages souterrains constitués par des géostructures.

La troisième partie est consacrée à une évaluation prospective du potentiel énergétique des géostructures du canton de Neuchâtel (point 3.4). On y évoque l'enquête auprès des entreprises de travaux spéciaux pour connaître le volume de construction annuel puis on décrit les travaux de recherches entrepris dans le but de localiser, sur le plan cantonal, les régions dans lesquelles des géostructures énergétiques sont susceptibles d'être réalisées.

Les secteurs à potentiel de géostructures énergétiques sont les zones de construction destinées à des bâtiments importants situées sur des terrains aux conditions géotechniques défavorables. On a donc sélectionné les surfaces répondant à ces deux critères sur le territoire cantonal, en les regroupant par région. Cette démarche reprend pour l'essentiel la méthodologie élaborée dans le cadre d'un travail de recherche réalisé au Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Joliquin, 2002). On a ensuite procédé à une évaluation des quantités de chaleur produite sur le territoire cantonal, basée sur une estimation du taux de croissance du volume de construction et du pourcentage de géostructures pouvant être équipé en échangeur de chaleur.

Cette troisième partie s'achève par une description de trois grands projets d'aménagement situés dans les secteurs à potentiel de géostructures, où l'état des démarches et l'intérêt des organismes concernés pourrait favoriser la concrétisation de tels ouvrages.

Le point 3.5 contient les conclusions et les recommandations quant à la suite à donner à la présente étude.

Une liste de références énumère les principales publications relatives à la conception, la réalisation et le fonctionnement des géostructures énergétiques, ainsi que celles concernant les exemples.

Les annexes contiennent les informations détaillées sur la nature du sous-sol, le tableau des surfaces potentielles et les plans de localisation des secteurs identifiés.

3.2 Les géostructures énergétiques

3.2.1 Concept général

Les géostructures sont des ouvrages d'appui ou de soutènement mis en place dans le sol ou en contact avec lui. Suivant le concept et la destination, on distingue les types suivants :

Pieux

- Pieux battus (pieux préfabriqués)
- Pieux moulés dans le sol

Parois

- Rideaux de pieux
- Parois moulées de fondation ou de soutènement
- Parois de fondation ou de soutènement préfabriqués

Dalles

- Dalles de fondation
- Dalles d'appui et de séparation dans le sol

Cadres en béton armé

En principe tous ces éléments et d'une façon générale toute construction en contact avec le sol peuvent être équipés en échangeur de chaleur géothermique. On les appelle alors des géostructures énergétiques (GEN). Pour des raisons pratiques, ce sont les éléments en béton qui sont le mieux adaptés à ce rôle, car la conductivité thermique et la capacité de stockage font du béton un matériau de construction idéal pour des absorbeurs d'énergie thermique. En effet, à partir de 15 à 20 mètres sous la surface de la Terre, la température devient très rapidement constante, avoisinant sous notre climat une valeur de 9-11° C. Ce niveau de température autorise une utilisation thermique pour le chauffage de bâtiments en hiver et pour le refroidissement en été. L'énergie absorbée par les géostructures est véhiculée par un fluide circulant dans un réseau de conduites dans le béton ou dans une cavité à l'intérieur du béton. Le schéma de principe d'un pieu énergétique moulé dans le sol est visible à la figure 3.1. La figure 3.2 montre des pieux centrifugés avant battage.



Figure 3.1. Schéma de principe d'un pieu énergétique moulé dans le sol avec sa cage d'armature et les conduites de circulation du fluide caloporteur.



Figure 3.2. Pieux centrifugés déposés sur le chantier avant mise en place (photo GRAM SA).

Les conduites sont reliées à un collecteur qui alimente une ou plusieurs pompes à chaleur (Fig. 3.3). Comme conduit caloporteur, on fait normalement appel à des tuyaux en matière synthétique. Dans le cas des géostructures préfabriquées et des éléments en béton coulés sur place, ces tuyaux sont fixés à la cage d'armature avant le bétonnage (Fig. 3.4 et 3.5). Pour les pieux en béton centrifugé, les circuits de tubes sont placés dans la cavité centrale du pieu (Fig. 3.6). L'espace restant est ensuite rempli avec un matériau ad hoc, possédant une bonne conductibilité thermique.

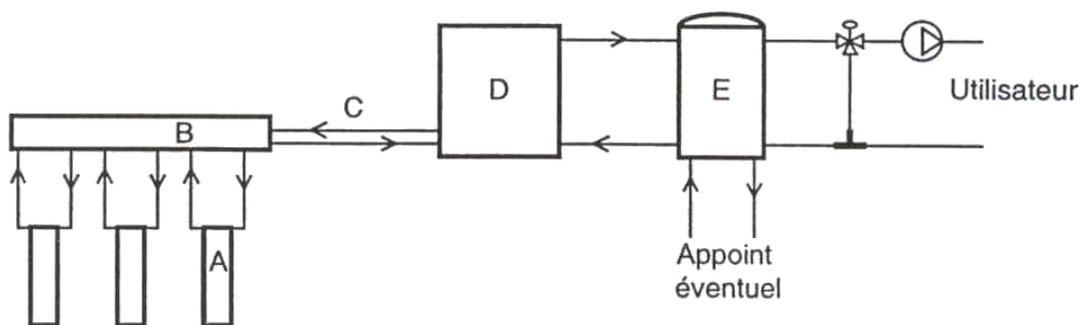


Figure 3.3. Schéma de principe d'une installation de pieux énergétiques avec pompes à chaleur. A : pieux énergétiques, B : collecteur, C : conduites de liaison, D : pompe à chaleur, E : stockage tampon (Pahud, 2002).



Figure 3.4. Conduites de circulation de fluide caloporteur fixées à la cage d'armature d'un pieu moulé (photo F-D. Vuataz).

Figure 3.5. Mise en place de la cage d'armature d'une paroi moulée équipée de conduites de circulation de fluide caloporteur (photo Nägelebau).

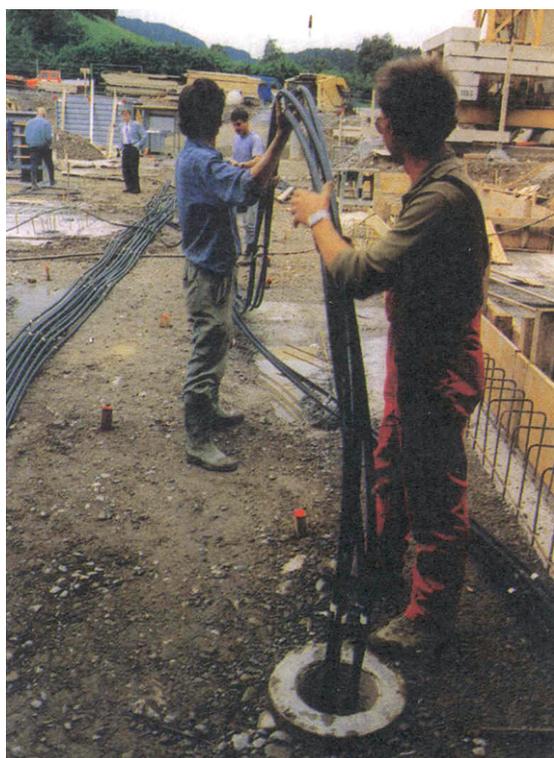


Figure 3.6. Pose de la conduite de circulation du fluide caloporteur dans la cavité intérieure d'un pieu battu dans le sol (photo SACAC AG).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

L'installation fonctionne sur un cycle annuel, avec extraction de chaleur du sol pendant la saison de chauffage (injection de froid dans le sol) et une extraction de froid pendant la saison chaude (injection de chaleur dans le sol). Les puissances installées varient de quelques kW à plusieurs centaines de kW thermiques.

Les pieux énergétiques en béton armé ont en général un diamètre entre 0.4 et 1.5 mètre et leur longueur peut atteindre 30 m, voire plus. Les parois moulées sont le plus souvent réalisées avec une épaisseur de 60 à 100 cm et peuvent descendre à des profondeurs identiques à celles des pieux.

La capacité énergétique d'un pieu battu, d'un diamètre de 40 cm, représente une puissance thermique ou frigorifique de l'ordre de 30 à 50 W/m, suivant l'écartement des pieux et les caractéristiques du sous-sol, notamment. Les mesures récentes ont démontré, que chaque mètre de pieu est capable de produire entre 40 et 150 kWh d'énergie par an. Dans certains terrains, des puissances bien plus élevées ont été enregistrées. La distance idéale entre deux pieux énergétiques est de 4 à 6 m.

3.2.2 Projet et caractérisation thermique

Le concept d'un système de chauffage et/ou de refroidissement utilisant des géostructures énergétiques doit être établi très tôt dans un projet, puisque les pieux de fondation seront bien souvent mis en œuvre avant que les installations de chauffage et de ventilation ne soient dimensionnées. Le nombre de pieux échangeurs ou le volume des parois moulées doit déjà être connu, ce qui implique à la fois une bonne connaissance des propriétés thermiques du terrain, de l'hydrogéologie locale et du type de géostructure utilisé, ainsi que la connaissance des besoins en énergie du bâtiment et de sa conception énergétique, de manière à pouvoir intégrer dans le système les échangeurs énergétiques de façon adéquate.

Au niveau du concept plusieurs paramètres doivent être définis très tôt, dont voici les principaux :

- Coefficient de performance annuel des pompes à chaleur.
- Puissance et quantité d'énergie spécifique annuelle délivrées par les géostructures.
- Besoin d'isolation des interfaces entre les divers constituants du système en contact avec le sol.
- Régime hydraulique au sein du système de circulation des fluides caloporteurs.

Les principaux paramètres géologiques et hydrogéologiques à déterminer sont la capacité thermique volumétrique, la conductibilité thermique, et la perméabilité du terrain. Pour la caractérisation thermique d'un système de géostructures énergétiques, on doit connaître sa résistance thermique et sa capacité thermique. Ces paramètres dépendent notamment du type de géostructure utilisé, de ses dimensions, du nombre et de l'arrangement spatial des tubes incorporés, du régime d'écoulement du fluide dans les tubes, et de la conductibilité thermiques des matériaux utilisés.

Le dimensionnement thermique d'un système de géostructures énergétiques s'effectue au moyen d'un outil de simulation, comme par exemple le logiciel PILESIM, développé à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Pahud, 2002). Il permet d'évaluer rapidement les performances thermiques du système, le potentiel thermique des géostructures et différents concepts du système. Le diagramme de la figure 3.7 résume les éléments intervenants dans le calcul par PILESIM du bilan énergétique global d'un système à pieux énergétiques. La synthèse des principaux résultats numériques du prédimensionnement d'un avant-projet est visible à la figure 3.8. Les puissances et énergies indiquées sont données par mètre linéaire de pieu énergétique.

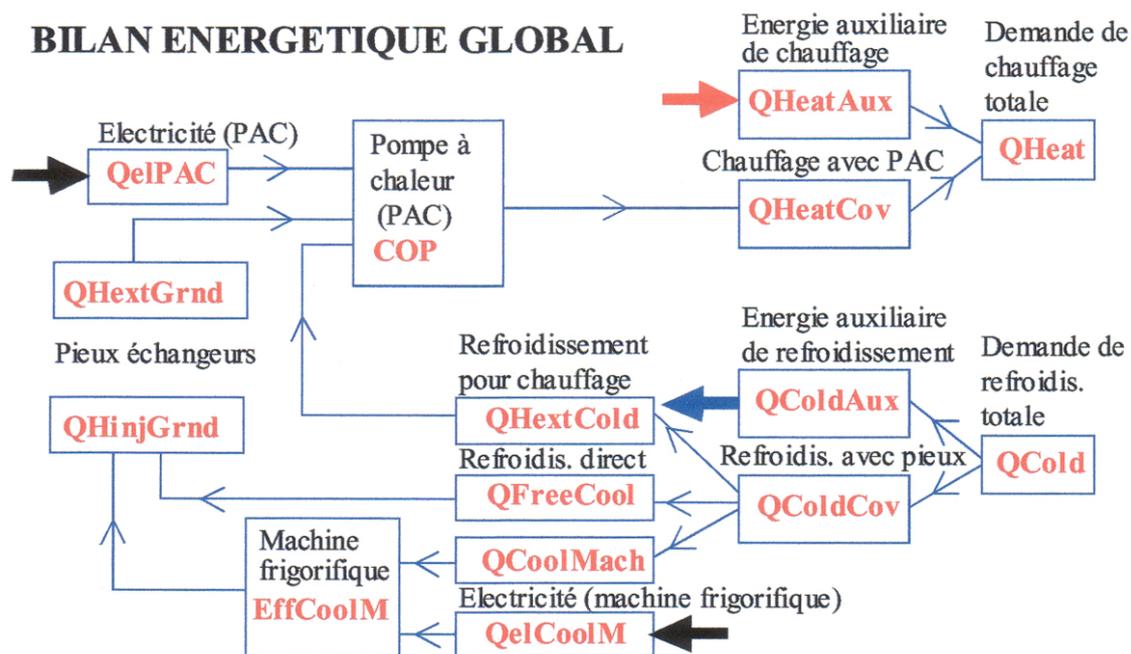
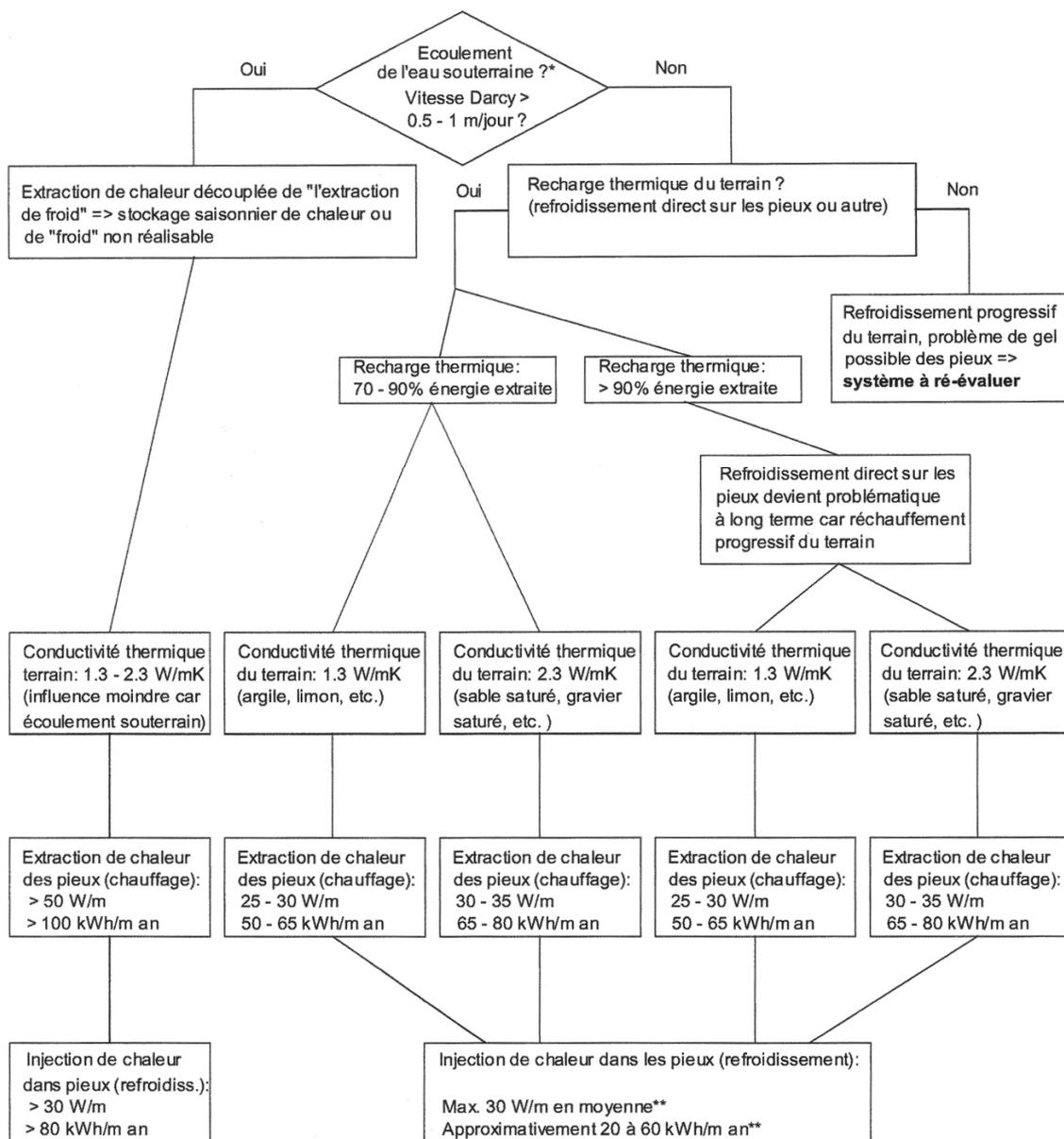


Figure 3.7. Etablissement du bilan énergétique global d'un système à pieux énergétiques à l'aide du logiciel PILESIM (Pahud, 2002).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel



* il suffit que l'eau souterraine s'écoule dans une couche traversée par les pieux échangeurs, même mince relativement à la profondeur de ces derniers, pour que l'effet soit significatif.

** si la recharge thermique du terrain excède 90% de l'énergie prélevée, la température du terrain aura tendance à augmenter à long terme, ce qui limitera la recharge thermique si elle est réalisée par du refroidissement direct sur les pieux.

- avec des pieux de diamètre plus grand (> 40 cm), l'espacement est généralement plus grand, et les performances indiquées ci-dessus peuvent être revues à la hausse (jusqu'à 50% pour des pieux de 1 m de diamètre).

- les valeurs données ci-dessus correspondent à un système monovalent. Pour un fonctionnement en ruban des pieux, la puissance par mètre de pieu sera plus basse, et la quantité d'énergie par mètre de pieu plus grande.

Figure 3.8. Synthèse des principaux résultats numériques du prédimensionnement d'un avant-projet. Les puissances et énergies indiquées sont données par mètre linéaire de pieu énergétique (Fromentin, 1997).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Ce programme de simulation a été utilisé avec succès en Suisse sur pratiquement tous les ouvrages importants au cours de ces dernières années.

Les effets induits dans le système sol - pieux par les cycles de chargement-déchargement de la température affectent dans une certaine mesure la faculté de portance mécanique des pieux de fondation. L'influence réelle de ce phénomène est étudiée depuis plusieurs années par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL. Les recherches théoriques sont validées par des observations sur une installation d'essai en vraie grandeur. Les conclusions tirées à ce jour permettent de dire que les effets thermiques ont une réelle importance sur le comportement des fondations profondes, et qu'il convient d'en tenir compte dans le dimensionnement. Toutefois on constate que, moyennant quelques précautions, ceci ne limite en rien la faisabilité de telles installations.

Pour l'établissement d'un avant-projet, il convient de tenir compte de quelques recommandations simples, qui doivent ensuite être vérifiées au niveau du dimensionnement final :

- Pour des raisons de statique et de vieillissement prématuré des géostructures, la température du fluide circulant dans les tubes ne devrait jamais être inférieure à 0°C.
- Une recharge thermique du terrain est indispensable en l'absence d'écoulement de l'eau souterraine.
- Il est recommandé de combiner la recharge thermique du terrain avec une production de froid en été.
- Une recharge thermique n'est pas nécessaire si la nappe souterraine s'écoule avec une vitesse suffisante, soit de l'ordre de 1 m/jour.
- La base du bâtiment devrait être isolée de manière à éviter les problèmes de condensation dans les locaux en contact avec le terrain.

3.2.3 Avantages d'un système à géostructures énergétiques

En matière de coût de l'énergie, la production du froid combinée avec celle de la chaleur est particulièrement économique. Une installation couplée à un système de géostructures énergétiques est sur ce point comparable à un système conventionnel de chauffage et de refroidissement.

Un autre avantage est la réduction d'énergie pour le chauffage. Le refroidissement direct avec les pieux échangeurs demande beaucoup moins d'énergie électrique qu'une machine frigorifique. L'énergie électrique économisée pendant l'été pour le refroidissement permet de compenser celle nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur en hiver.

S'agissant de géothermie, le recours à des géostructures énergétiques présente naturellement tous les autres avantages de cette ressource indigène et pratiquement inépuisable, comme l'absence d'émission de gaz à effet de serre, le faible encombrement des équipements et une exploitation particulièrement aisée.

3.2.4 Aspects économiques

Généralités

La rentabilité économique des installations techniques d'un bâtiment se calcule par la méthode des charges annuelles, conformément aux directives de la Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation (SWKI – SICC), et compte tenu des spécifications de la norme SIA 480, en faisant intervenir les charges suivantes :

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Charges financières des montants investis pour les installations techniques et pour l'aménagement des locaux.
- Coût de l'énergie utilisée (électricité consommée par la PAC et/ou par les appareils auxiliaires, etc.).
- Frais d'exploitation et d'entretien (surveillance, réparations, etc.).
- Autres frais (administration, assurances, etc.).

Les charges financières sont constituées par les coûts annuels, soit les intérêts sur le capital investi et son amortissement sur la durée d'utilisation (annuités). Le coût de l'énergie utilisée dépend de son prix d'achat et de la quantité consommée.

On démontre la rentabilité économique d'une installation d'énergie alternative en comparant les charges annuelles avec celles d'une installation de chauffage conventionnelle.

Exemple de calcul économique d'une installation à pieux énergétiques

Bases de départ

Nous prenons comme exemple un bâtiment locatif neuf comportant 24 appartements.

L'installation de chauffage est constituée par des pieux énergétiques couplés à une pompe à chaleur, permettant en période estivale de tempérer les locaux par refroidissement direct (free-cooling), au moyen du réseau de tubes posé dans le plancher. Une telle disposition favorise la régénération thermique du champ des pieux, et contribue ainsi à l'amélioration du coefficient de performance. Dans ce cas, l'énergie utilisée est limitée à celle consommée par la seule pompe de circulation.

Cette solution est comparée à une installation de chauffage au mazout.

Le calcul est effectué en faisant intervenir les coûts externes environnementaux (CEE), selon la norme SIA 480. A titre de comparaison, un deuxième cas est calculé sans CEE.

Données techniques	
Surface du bâtiment	env. 600 m ² (30 m x 20 m)
Surface de référence énergétique	env. 2'500 m ²
Nombre d'appartements	24
Puissance de chauffage	70 kW
Consommation de chaleur (y compris ECS)	215 MWh/a (énergie utile)
Longueur totale active des pieux énergétiques	1'200 m
Nombre de pieux énergétiques	78 (longueur 15.4 m)
Taux d'utilisation de la chaudière	88 %
Coefficient de performance de la PAC	3.2

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Prix admis des énergies consommées		
Mazout de chauffage (extra léger)		CHF 90.00 / 100 litres
Electricité	Hivers TH	16.8 cts / kWh
	Hivers TB	9.0 cts / kWh
Tarif de puissance en hiver		CHF 12.00 / kW mois

Au niveau des investissements, seules les installations de production sont prises en compte dans les deux variantes, donc sans les réseaux de distribution et sans les installations de diffusion de la chaleur.

Investissements pour l'installation de chauffage au mazout	
Comprenant chaudière avec brûleur, cheminée et citerne	
Total installation de chauffage conventionnelle au mazout	CHF 45'000.00
Investissements pour une installation de pieux énergétiques (PE) avec PAC	
Comprenant pompe à chaleur, pieux et aménagements, remplissage au glycole, collecteurs entre pieux	
Total installation de pieux énergétiques avec PAC	CHF 140'000.00

On ne prend en considération que l'équipement des pieux en échangeur. Les pieux eux-mêmes, exécutés pour des raisons de stabilité du bâtiment, font partie du coût de la construction de l'ouvrage.

Dépenses annuelles (CHF) de l'installation de chauffage à chaudière, avec prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)	
Entretien, exploitation, réparations	1'860.00
Coût de l'énergie	32'520.00
Total des coûts de fonctionnement	34'360.00
Total des charges financières	3'000.00
Total du coût externe environnemental (CEE)	10'980.00
Total des dépenses annuelles	CHF 48'340.00

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Dépenses annuelles (CHF) de l'installation de chauffage à PE et PAC, avec prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)	
Entretien, exploitation, réparations	1'400.00
Coût de l'énergie	15'550.00
Total des coûts de fonctionnement	16'950.00
Total des charges financières	7'000.00
Total du coût externe environnemental (CEE)	3'400.00
Total des dépenses annuelles	CHF 27'350.00

Alors que le coût d'investissement d'une installation PE/PAC est le triple de celui de l'installation conventionnelle, les dépenses annuelles ne représentent qu'un peu plus de la moitié, si l'on tient compte des coûts externes environnementaux. L'économie annuelle de CHF 21'000 permet d'amortir l'investissement supplémentaire de 95'000 francs en 5 ans environ.

Sans les coûts externes environnementaux, la comparaison donne les résultats suivants :

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à chaudière, sans prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)	
Total des dépenses annuelles	CHF 37'360.00
Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à PE et PAC, sans prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)	
Total des dépenses annuelles	CHF 23'950.00

On constate que dans la comparaison sans CEE, les dépenses annuelles de la solution PE/PAC, inférieures de CHF 13'400, permettent d'amortir l'investissement supplémentaire en 8 ans environ.

3.3 Exemples et projets de réalisations

3.3.1 Pieux énergétiques

Exemples suisses

Les origines de cette technique remontent au milieu des années 1980. Depuis lors, un grand nombre de bâtiments de toute nature, situés essentiellement dans le nord-est de la Suisse, a été construit selon ce système. Un des premiers et des plus importants est le centre industriel de l'entreprise Pago, dans le canton de St. Gall, qui repose sur 570 pieux énergétiques et en utilise le potentiel calorifique (Fig. 3.9).



Figure 3.9. Bâtiment industriel reposant sur 570 pieux énergétiques fonctionnant comme source de chaleur et de froid. 1 : Pieux énergétiques, 2 : Conduites de raccordement, 3 : Collecteur primaire, 4 : Collecteur principal, 5 : Centrale énergétique (Lippuner AG).

Un exemple récent est la nouvelle jetée mise en service en 2005 à l'aéroport de Kloten, avec ses 350 pieux moulés de 1 à 1,5 m de diamètre et longs de 30 m, dont une grande partie équipée en échangeur géothermique (Fig. 3.10. et 3.11). Un autre exemple récent est le bâtiment scolaire de Fully, en Valais, et ses 41 pieux énergétiques qui, selon le témoignage des récents tests, présente un bilan énergétique remarquable (Fig. 3.12).

La campagne de mesures effectuée à Kloten au cours des années 2004 et 2005, a démontré que le bilan énergétique du système, en particulier les demandes d'énergie annuelles de chauffage et de refroidissement sont proches des valeurs établies durant la phase de planification. D'autre part, les performances thermiques du système sont très bonnes.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

A Fully, les mesures et l'interprétation des résultats ont eu lieu entre 2001 et 2004. Les excellents rendements et le confort d'utilisation dont bénéficient les utilisateurs ont incité les autorités d'adopter le même système à la nouvelle salle polyvalente, qui sera construite prochainement à proximité du bâtiment scolaire existant.

Mais le système est également bien adapté à des constructions de petite et de moyenne taille, comme en témoignent les dizaines de réalisations de ce genre en service depuis des années, surtout en Autriche. Un bon exemple en Suisse est le bâtiment locatif de Willerzell, dans le canton de Schwyz, où les pieux énergétiques font partie d'un système énergétique comprenant notamment l'énergie solaire et la chaleur de l'environnement (Fig. 3.13).

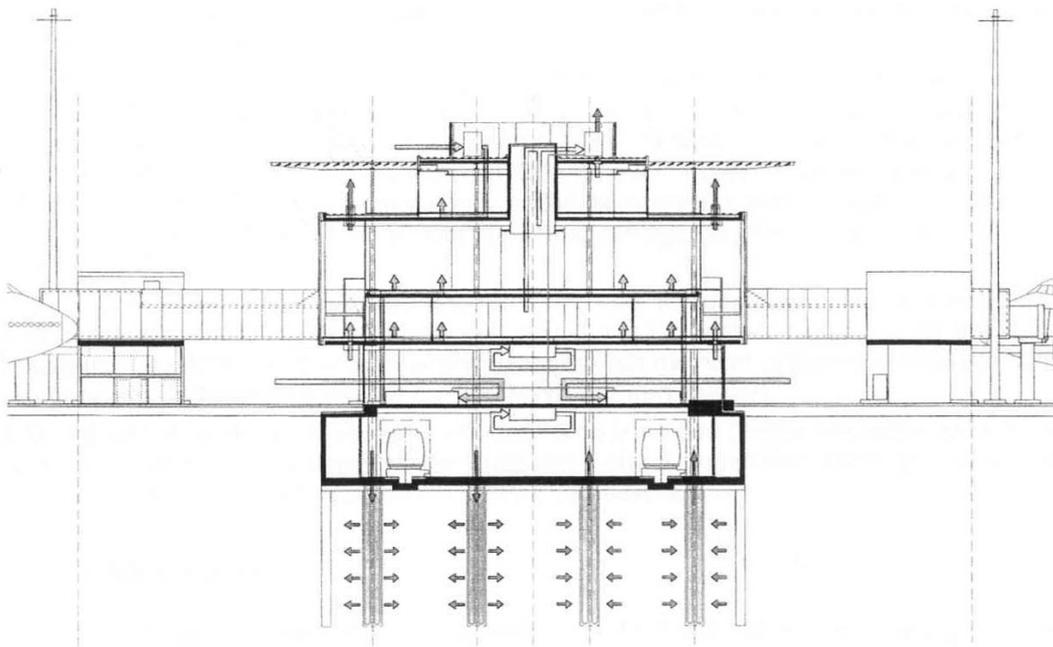


Figure 3.10. Coupe en travers de la nouvelle jetée à l'aéroport de Kloten indiquant la disposition des pieux énergétiques (Hubbuch, 2001).

Figure 3.11. Vue de la halle de transfert des passagers au sous-sol du terminal. Les piliers circulaires en béton reposent sur les pieux énergétiques indiqués sur la figure ci-dessus (photo J. Wilhelm).





Figure 3.12. Vue du bâtiment scolaire de Fully, en Valais, équipé de 41 pieux énergétiques (photo J. Wilhelm).



Figure 3.13. Vue d'un bâtiment locatif reposant sur des pieux énergétiques à Willerzell, dans le canton de Schwyz (photo H. Schönbächler).

Un important projet de pieux énergétiques est en cours de réalisation depuis 2007 à Domdidier, dans le canton de Fribourg. Il s'agit du centre de distribution régional de la chaîne Aldi, avec une série de bâtiments administratifs et industriels importants, dont des dépôts et des chambres froides. Le sous-sol se compose d'une succession de couches limono-argileuses et de sables fins sous une nappe d'eau, nécessitant la réalisation de pieux de fondation allant jusqu'à 40 mètres de profondeur sous le niveau de la plateforme. Sur un nombre total de 7600 pieux, 378 sont équipés en échangeur de chaleur. La photo de la figure 3.14 montre l'état du chantier de pose en juin 2007 avec, au centre, la rangée de pieux énergétiques.



Figure 3.14. Vue du chantier Aldi à Domdidier, avec au centre les rangées de pieux énergétiques (photo Aldi).

Un total de 60'000 mètres de tubes en PE a été posé, la mise en service du centre est prévue au cours de 2008. La mise en place d'un pieu énergétique de 38 m de long est visible à figure 3.15.



Figure 3.15. Pose d'un pieu énergétique de 38 mètres de long sur le chantier Aldi à Domdidier (photo J. Wilhelm).

Projets à l'étranger

A côté de l'Autriche, l'Allemagne est le pays où les pieux énergétiques ont connu le plus de succès, en particulier dans les grandes villes comme Francfort-sur-le-Main. La figure 3.16 montre la situation des principaux bâtiments sur pieux construits récemment, les points jaunes indiquent l'emplacement des constructions avec pieux énergétiques.



Figure 3.16. Bâtiments importants construits sur pieux énergétiques dans la ville de Francfort-sur-le-Main, en Allemagne (Katzenbach, 2007).

Un des plus significatifs est le Main Tower qui repose sur 102 pieux de 150 cm de diamètre et de 30 mètres de longueur (Fig. 3.17). Le bâtiment, qui abrite des bureaux, des locaux commerciaux et des parkings souterrains, a été mis en service en 2005.

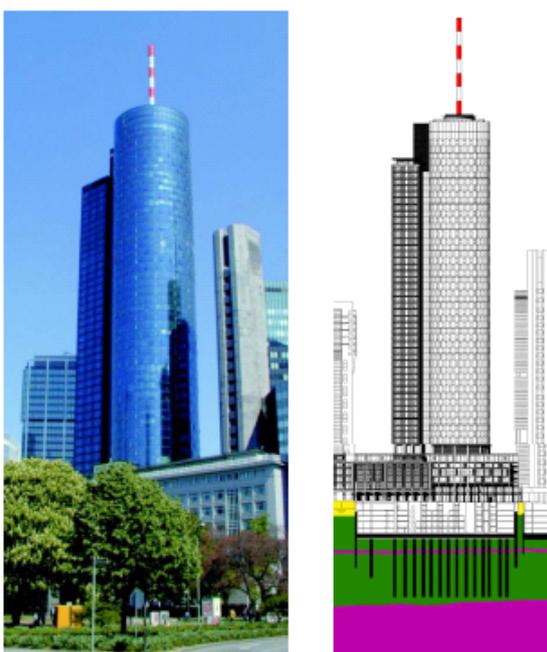


Figure 3.17. Photo et schéma en élévation du Main Tower, à Francfort-sur-le-Main, reposant sur 112 pieux énergétiques (Katzenbach, 2007).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

En France aussi quelques projets sur pieux énergétiques sont en train de voir le jour. Un des plus significatifs est L'American School de Paris (AUP), dont la construction devrait être entreprise en 2008 ou 2009 (Fig. 3.18). Les fondations des divers bâtiments sont prévues par pieux de 25 mètres de long, dont une grande partie sera équipée en échangeur de chaleur.



Figure 3.18. Projet des nouveaux bâtiments de l'American School de Paris, au bord de la Seine à Paris (Document AUP).

3.3.2 Tunnels

Divers éléments constructifs des tunnels et des ouvrages souterrains enterrés sont susceptibles d'être équipés en échangeur de chaleur. Les cadres en béton armé enterrés constituent une catégorie particulière des géostructures énergétiques. Ils trouvent leur application dans les tunnels urbains et les lignes de métro enterrées. Dans la région viennoise, en Autriche, plusieurs stations de métro et de liaisons ferroviaires sont conçues de façon à exploiter le potentiel calorifique du sous-sol. A la station Praterstern ce sont les parois moulées et le radier du tunnel enterré qui fournissent la chaleur et le froid pour les locaux d'exploitation (Fig. 3.19). Les rideaux de pieux du Lainzertunnel (Fig. 3.20) sont raccordés, par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur, à un bâtiment voisin.

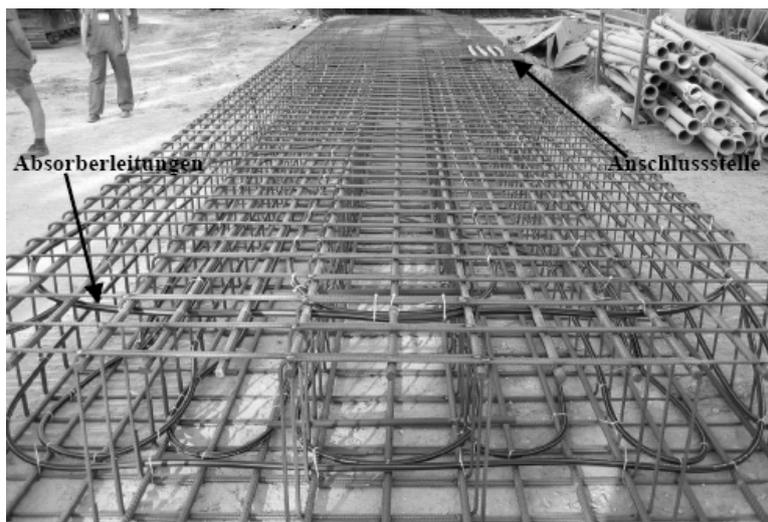


Figure 3.19. Métro de Vienne, station Praterstern. Cage d'armature d'une paroi moulée équipée par des tubes thermiques (Adam, 2008).

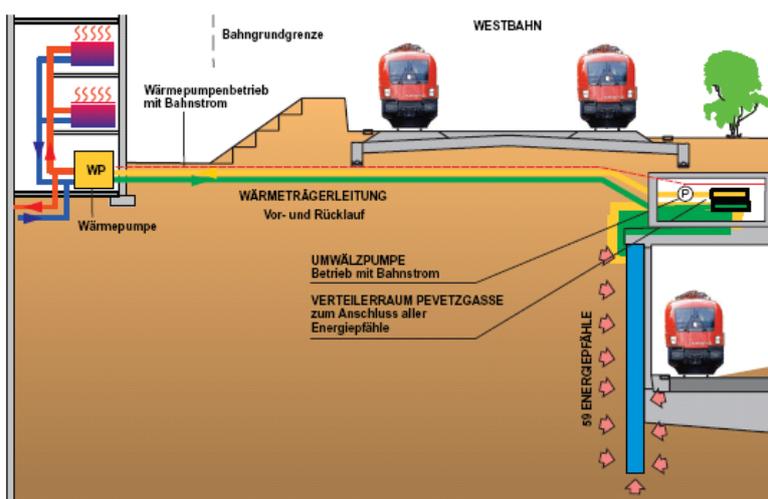


Figure 3.20. Lainzertunnel à Vienne, en Autriche. Rideau de pieux énergétiques raccordés à un bâtiment voisin (Adam, 2008).

En Suisse divers projets de cette nature sont actuellement à l'étude, en particulier sur les grands ouvrages ferroviaires urbains, comme la ligne diamétrale de Zürich et le projet CEVA à Genève.

On recherche également la possibilité d'utiliser la chaleur des massifs souterrains par des voussoirs de tunnels, voir les radiers et les bordures en béton équipés en échangeur thermiques (Fig. 3.21). Il en est de même des ancrages de soutènement et surtout des géotextiles d'étanchéité posés en sandwich entre les anneaux extérieur et intérieur (Fig. 3.22).

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

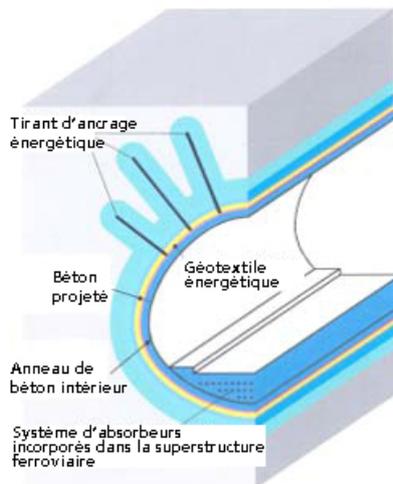


Figure 3.21. Eléments d'un tunnel susceptibles d'être équipés en échangeur de chaleur (Adam, 2008).

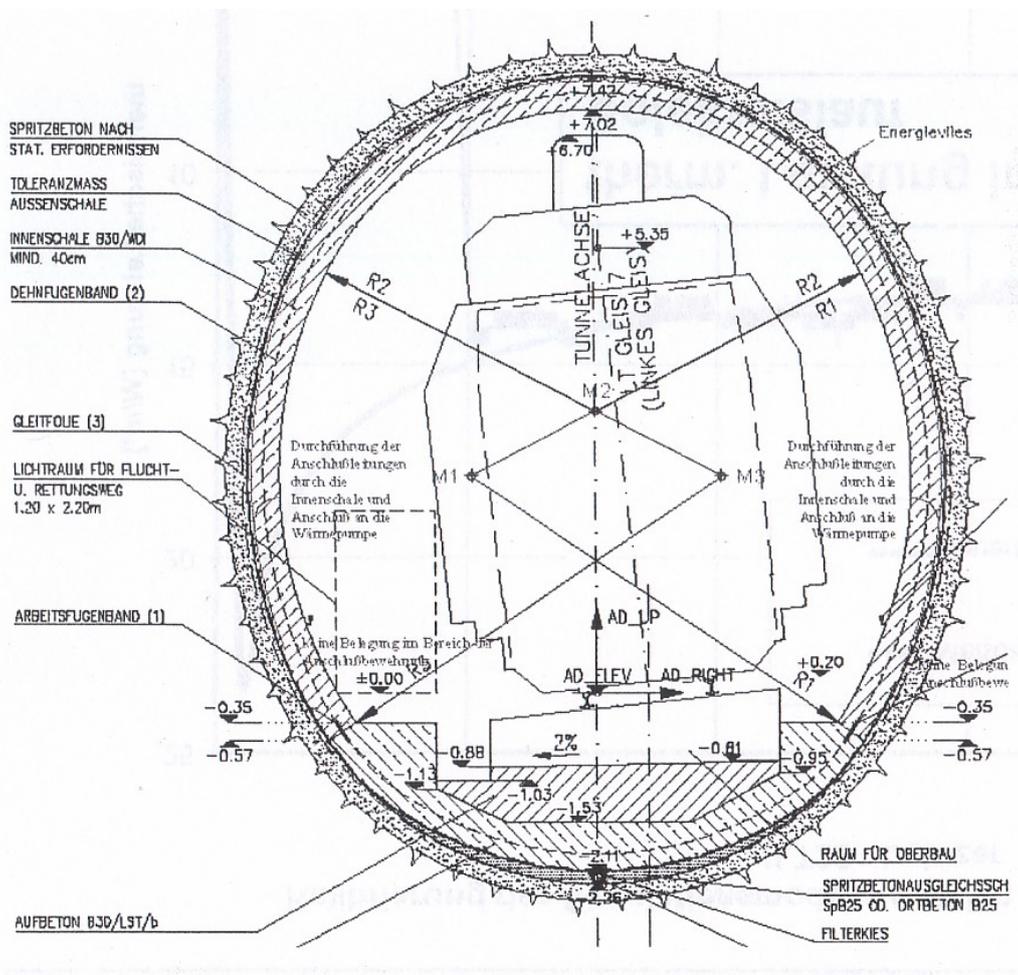


Figure 3.22. Géotextile énergétique posé entre l'anneau de soutènement extérieur et l'anneau de béton intérieur d'un tunnel (Adam, 2008).

Bien que se trouvant en phase de recherche, ces nouvelles tendances montrent la diversité des applications possibles de ce genre de procédé.

3.4 Evaluation du potentiel thermique des géostrutures énergétiques dans le canton de Neuchâtel.

3.4.1 Introduction

Afin de permettre une estimation du volume annuel de construction des géostrutures, une enquête a été menée entre juin et août 2007, par un questionnaire envoyé aux entreprises de travaux spéciaux, susceptibles d'avoir réalisé de tels ouvrages sur le territoire cantonal au cours des trois dernières années (2004 à 2006). Huit des 11 entreprises consultées ont répondu. Les réponses n'ayant pas donné d'indications suffisantes pour une estimation fiable de cette activité, on a procédé, on a procédé à l'évaluation du potentiel en partant des surfaces de construction disponibles dans les plans de développement communaux, selon la démarche suivante :

- Délimitation des régions présentant des conditions géologiques défavorables du point de vue des fondations des constructions.
- Désignation des zones d'affectation urbaines autorisant des constructions importantes dans les régions ci-dessus : zones à potentiel de géostrutures.
- Evaluation du potentiel énergétique des géostrutures par une méthode statistique.

Les paragraphes ci-après contiennent la description des études et les résultats obtenus au terme de cette démarche.

3.4.2 Conditions géologiques

Les conditions géologiques des régions impliquées, à sous-sol défavorable, sont décrites dans l'annexe 3.1, avec l'indication des sources d'information et les références d'auteurs. Ces régions sont situées dans la vallée du Locle – La Chaux-de-Fonds, dans le Val-de-Travers, dans la Vallée des Ponts, dans le Val-de-Ruz, le long des rives du lac de Neuchâtel, et dans la Plaine de la Thielle.

Vallée du Locle - La Chaux-de-Fonds

Le fond du synclinal du Locle - La Chaux-de-Fonds est constitué par les marnes et craies lacustres tertiaire de l'Oeningien (MEDS – Tortonien) qui reposent sur les Marnes Rouges (MMS – Helvétien). Ces terrains sont d'assez bonne portance à l'état sain mais l'altération superficielle qui avoisine généralement 10 à 20 m oblige à recourir à des fondations sur pieux pour les bâtiments comportant de fortes charges ponctuelles. Les craies de l'Oeningien peuvent être localement aquifères avec des niveaux piézométriques proches de la surface (2 à 5 m).

Le synclinal est très évasé entre la plaine du Col-des-Roches et le Crêt-du-Locle, ce qui détermine une extension latérale des terrains tertiaires étendue. A La Chaux-de-Fonds, dans le synclinal pincé, il ne subsiste qu'une mince bande de terrains tertiaires.

Entre Le Col-des-Roches et l'entrée de la ville du Locle (carrefour Klaus), des dépôts quaternaires palustres et lacustres (tourbes, limons) d'au moins 5 à 10 m recouvrent l'Oeningien.

Les Ponts-de-Martel

Les dépôts quaternaires tourbeux sont caractéristiques du fond de la vallée des Ponts. Ils reposent sur des craies lacustres tertiaires comparables à l'Oeningien de la vallée du Locle.

Val-de-Travers

Le Val-de-Travers a été occupé par un lac périglaciaire formé derrière un barrage situé près de Noiraigue. Le fond du Val de Travers est comblé sur plusieurs mètres voire dizaines de mètres d'alluvions et de dépôts quaternaires lacustres. La granulométrie des dépôts diminue de l'amont de la vallée (région de Fleurier riches en graviers) en direction de Noiraigue. Dès Môtiers, les niveaux fins, limoneux et argileux prédominent. La profondeur des dépôts peut localement excéder 50 m.

Val-de-Ruz

Savagnier et Dombresson : dépôts alluviaux fins, généralement peu épais (moins de 10 m).

Fontaines : sillon alluvial pouvant révéler des épaisseurs généralement faibles (max 10 m) de limons fins.

Rives du Lac de Neuchâtel

La géologie du bord du lac est caractérisée par une grande variabilité des dépôts qui comportent souvent des alternances de graviers alluviaux périglaciaires et des dépôts de limons lacustres. Ces limons peuvent s'avérer très peu stables et de nombreuses constructions sont bâties sur pieux. Citons le port du Petit-Cortaillod dont la première construction a glissé dans le lac, le nouveau bâtiment PMP SA à Serrières et la Faculté des lettres de l'Université.

Entre la baie de l'Evole et la piscine de la ville les terrains sont pour la plupart des remblais anthropiques de nature très variable.

A St-Blaise, un sillon de dépôts lacustres et palustres relie le lac au Loclat avec des tourbes et limons mous peu épais (< 10 m).

Partout, les niveaux piézométriques correspondent généralement à celui du lac.

Plaine de la Thielle

Entre Thielle et Le Landeron, les dépôts lacustres et palustres peuvent atteindre plus de 10 m d'épaisseur. Ils sont composés de niveaux de tourbes superficiels de plusieurs mètres reposant sur des limons lacustres. Les niveaux piézométriques sont souvent définis par les systèmes de drainage mis en place, notamment lors des deux corrections des eaux du Jura.

3.4.3 Zones d'affectation et surfaces potentielles

Les zones d'affectation urbaines suivantes ont été retenues comme étant susceptibles de recevoir des constructions importantes, pouvant exiger le recours à des fondations spéciales, en particulier des pieux :

- Zone de moyenne densité ZMD
- Zone de forte densité ZDF
- Zone commerciale ZC
- Zone d'activités économiques ZAE
- Zone industrielle ZI
- Zone mixte ZM
- Zone d'utilité publique ZUP

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Les zones d'affectation ainsi définies, situées dans les régions à géologie défavorable, ont été recensées, ce qui a permis de calculer les surfaces correspondantes en hectares. Les résultats relatifs aux communes concernées, groupés en cinq régions, sont indiqués dans les tableaux 3.1 et 3.2 ci-dessous.

Tableau 3.1. Surfaces potentielles – Détails par secteurs Région A : Les Montagnes

Région	Secteur	Surface [ha]
Les Montagnes	1. Le Locle	43,5
	2. La Chaux-de-Fonds	137,7
	Total	181,2
Littoral et Landeron	3. Le Landeron	34,2
	4. Cressier-Wavre	129,7
	5. St.Blaise-Marin-Epagnier	15,8
	6. Neuchâtel	24,9
	7. Serrières-Colombier-Auvernier	18,0
	8. Gorgier-Sauges	10,7
	Total	233,1
Val de Ruz	9. Dombresson	4,3
	10. Fontaines	3,3
	11.Savagnier	3,1
	Total	10,7
Val de Travers	12. Couvet	18,7
	13. Môtiers	6,5
	14. Boveresses	3,6
	15. Travers	1,5
	16. Noiraigues	4,6
	Total	34,9
Martel	17. Les Ponts-de-Martel	3,4

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Tableau 3.2. Surfaces potentielles – Récapitulatif générale

Région	Surface [ha]
Les Montagnes	181,2
Littoral-Landeron	233,1
Val-de-Ruz	10,7
Val-de-Travers	34,9
Martel	3,4
Total	463,3

Le détail des surfaces recensées figure dans les tableaux de l'annexe 3.2. Les surfaces potentielles y sont indiquées en rouge.

La surface totale intéressée par les géostructures sur le territoire du canton s'élève à environ 463 hectares, dont environ 40% dans la région des Montagnes, 50% sur le Littoral et au Landeron, 7% dans le Val-de-Travers, le reste étant réparti entre le Val-de-Ruz et les Ponts-de-Martel. Les deux grandes régions à géostructures sont indiquées en rouge sur la figure 3.23.

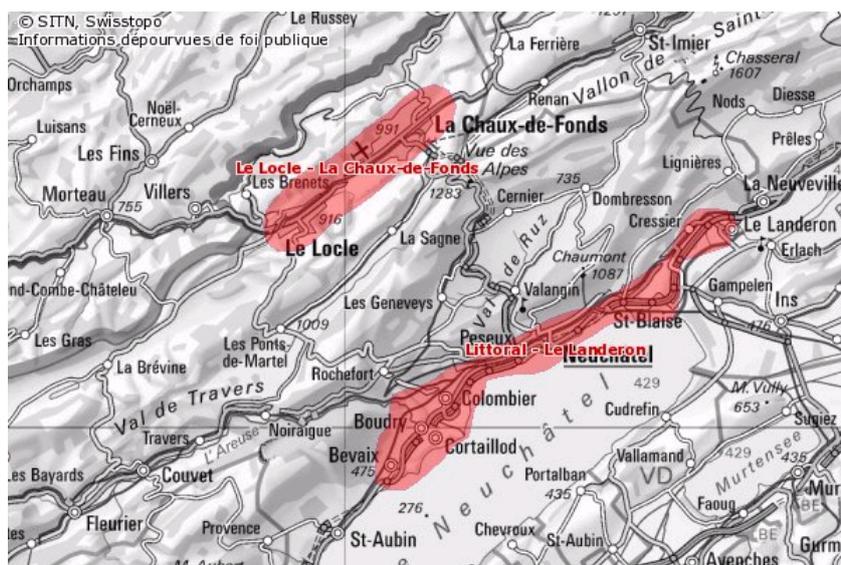


Figure 3.23. Les deux principales régions représentant 90% des surfaces potentielles à géostructures

La localisation des secteurs potentiels sur le plan cantonal est visible sur la figure 3.24 et l'annexe 3.3. Les plans à plus grande échelle dans les régions Le Locle – La Chaux-de-Fonds, Neuchâtel – Val-de-Ruz – Landeron et Val-de-Travers sont également donnés dans l'annexe 3.3.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

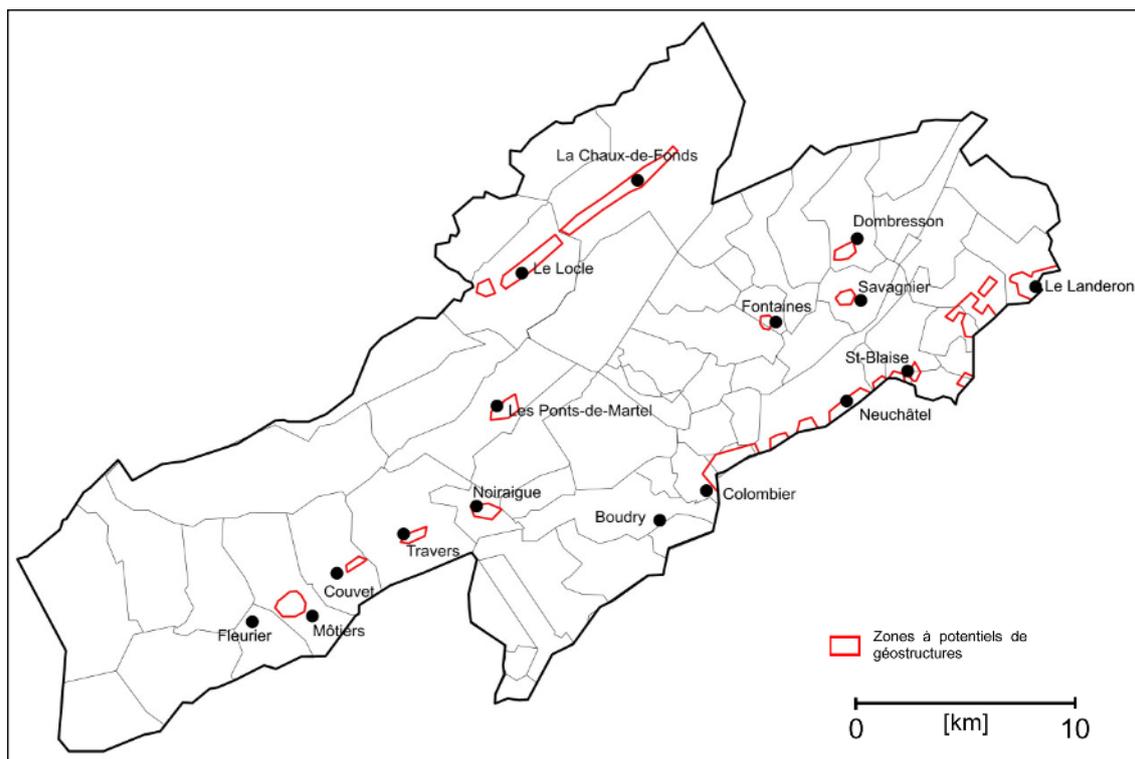


Figure 3.24. Répartition des secteurs potentiels de géostructures dans le canton

L'annexe 3.4 contient les plans de situation des surfaces potentielles dans les 16 secteurs suivants :

- Col des Roches
- Le Locle
- La Chaux-de-Fonds
- Landeron-Cornaux-Wavre
- St-Blaise
- Hauterive – La Coudre
- Neuchâtel - Monruz
- Colombier – Auvernier – Serrière
- Dombresson
- Fontaine
- Savagnier
- Couvet
- Môtier - Boveresses
- Noiraigue
- Travers
- Les Ponts-de-Martel

La figure 3.25 est un exemple des surfaces représentées sur les planches de l'annexe 3.4 dans les 16 secteurs listées ci-dessus.

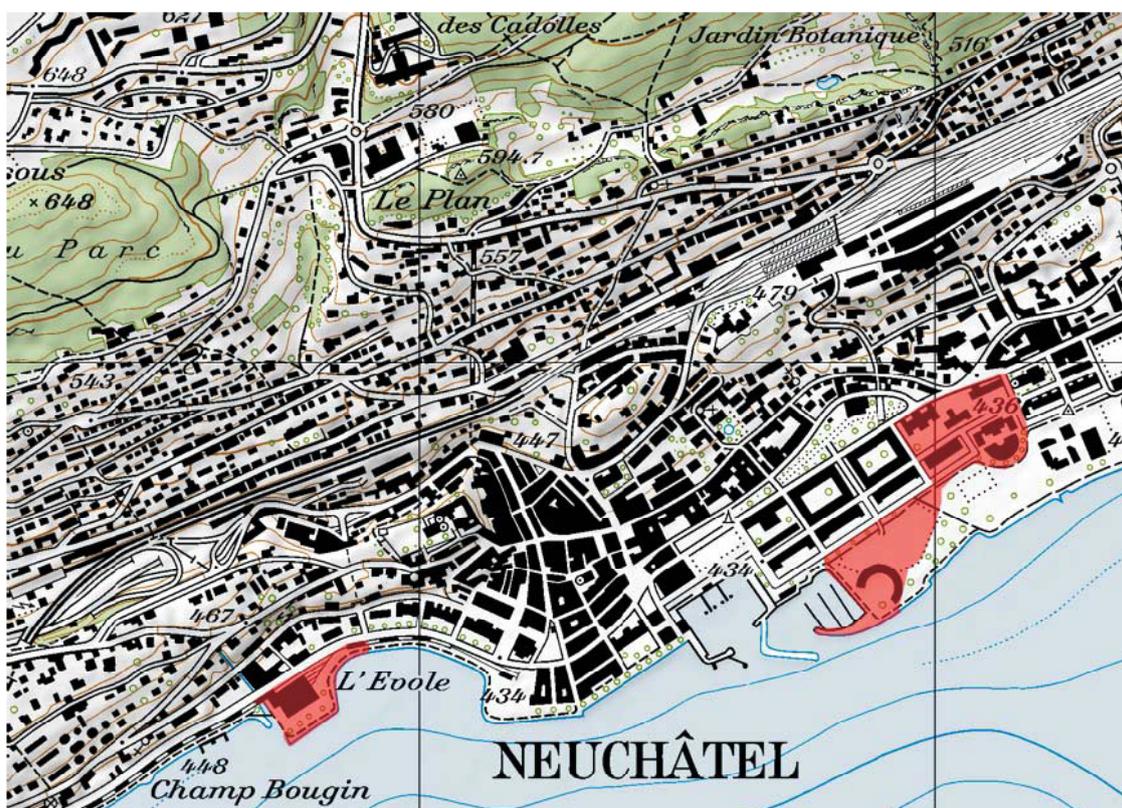


Figure 3.25. Plan de situation des surfaces potentielles (exemple)

3.4.4 Estimation du potentiel énergétique cantonal

La superficie occupée par une construction sur une parcelle dépend du taux d'occupation du sol (TOS), réglementé par les directives en matière d'aménagement du territoire. Pour les zones d'affectation retenues, le taux maximum dans le canton varie en moyenne entre 30 et 60%. Compte tenu de la répartition des surfaces (Tabl. 3.3), un TOS moyen de 45% a été déterminé pour le calcul du potentiel.

Tableau 3.3. Répartition des surfaces potentielles selon les zones de développement

Zones de développement	Répartition des surfaces potentielles (%)
ZMD zone de moyenne densité	10
ZDF zone de forte densité	3
ZC zone commerciale	2
ZAE zone d'activités économiques	3
ZI zone industrielle	60
ZM zone mixte	8
ZUP zone d'utilité publique	14
Total	100

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le potentiel énergétique d'un champ de pieux est déterminé par la longueur et la densité des pieux, ainsi que par la puissance thermique par mètre courant de pieu.

Le graphique de la figure 3.26 donne la quantité de chaleur ou de froid produite annuellement par un champ de pieux énergétiques d'une surface de 1000 m², avec un maillage de 7 x 7 mètres (24 pieux), en fonction de la longueur des pieux et de la quantité annuelle de chaleur ou de froid par mètre de pieu.

Ainsi, pour des pieux de 20 m de long et une production annuelle de 150 kWh par mètre de pieu, qui sont des valeurs moyennes, la quantité de chaleur produite annuellement est de 72 MWh.

Energie totale annuelle [MWh/an]

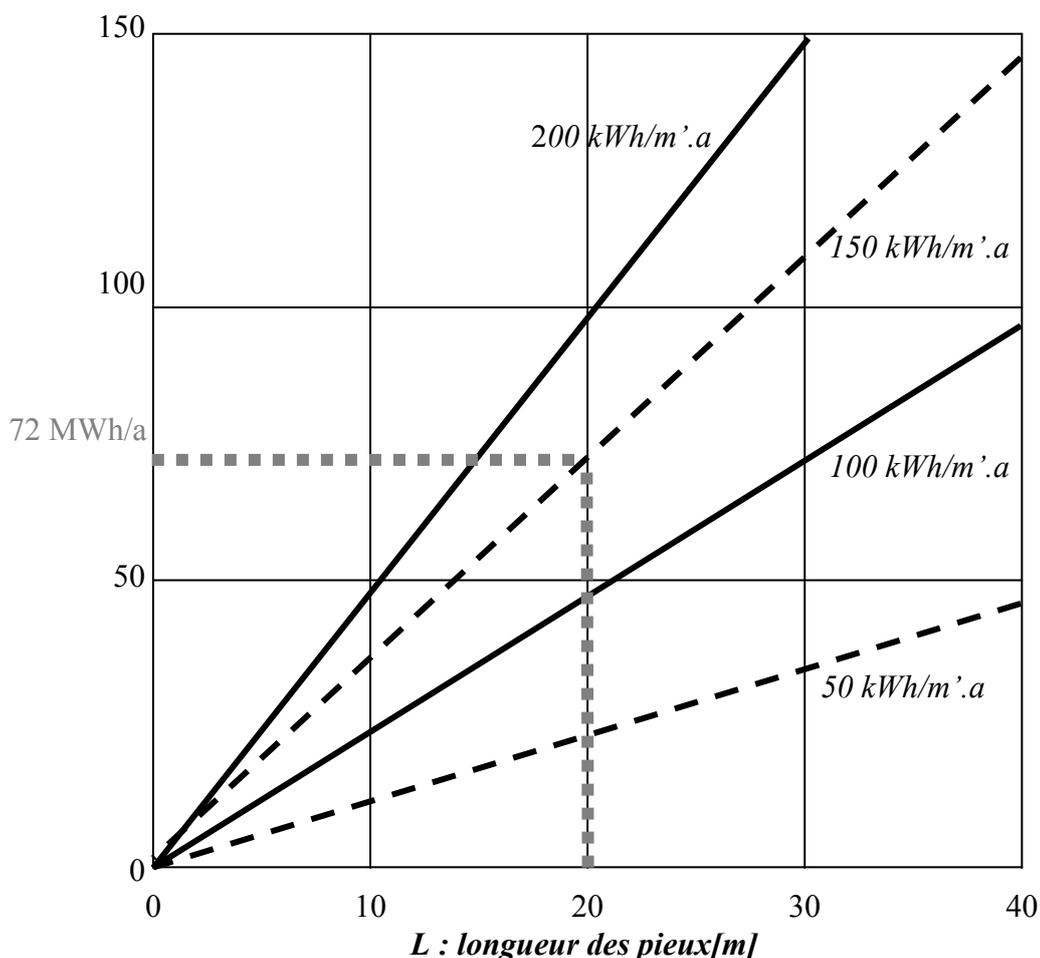


Figure 3.26. Quantité de chaleur ou de froid produite annuellement par un champ de pieux énergétiques d'une surface de 1000 m², avec un maillage de 7 x 7 mètres (24 pieux), en fonction de la longueur des pieux et de la quantité annuelle de chaleur ou de froid par mètre de pieu. Exemple :

- longueur des pieux $L = 20\text{m}$;
- chaleur annuelle par mètre de pieu : 150 kWh ;
quantité totale de chaleur produite annuellement par le champ de pieux : 72 MWh.

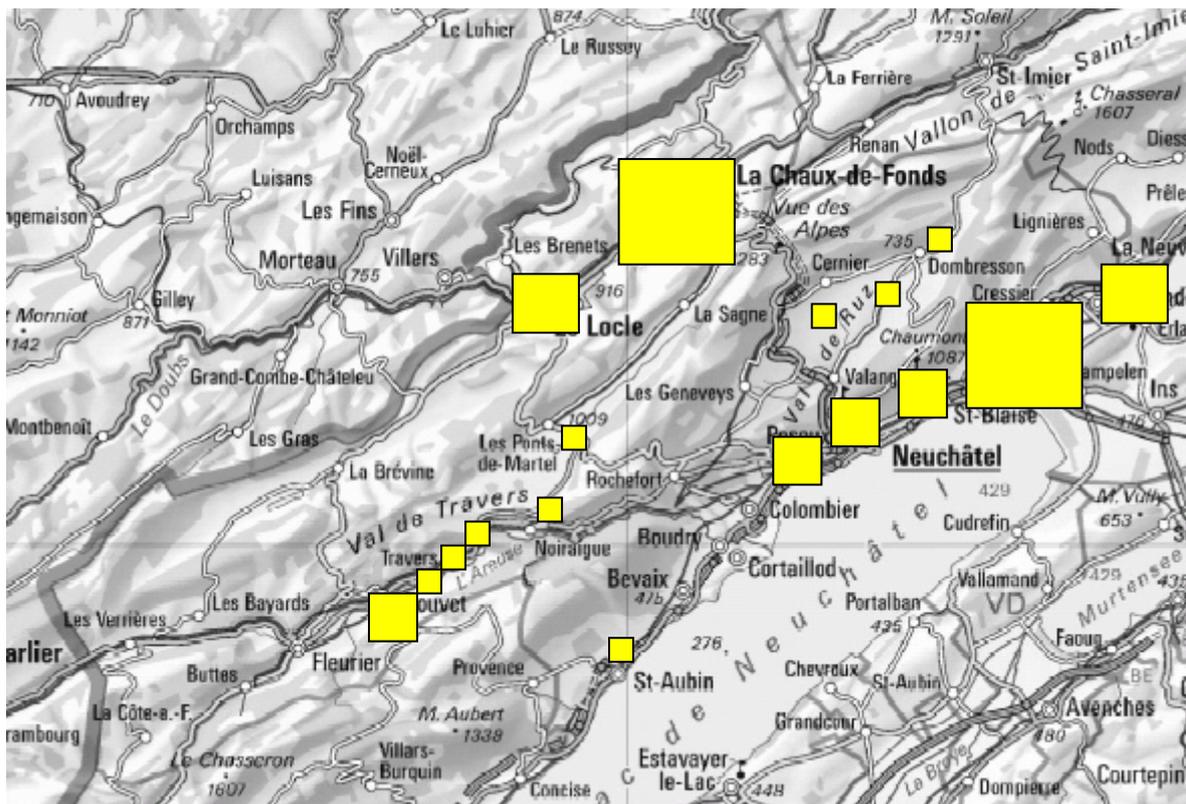
Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le tableau 3.4 récapitule les résultats des calculs du potentiel thermique des géostructures énergétiques dans les différentes zones du canton pour la totalité des surfaces identifiées. Dans la première colonne figurent les surfaces de terrains des tableaux 3.1 et 3.2, la deuxième colonne contient les surfaces de bâtiments, compte tenu du taux d'occupation du sol (TOS, admis à 45%), la dernière colonne donne les valeurs du potentiel thermique en GWh. Ces derniers chiffres sont visualisés sur la figure 3.27 qui montre, sous forme géographique, les potentiels disponibles divers secteurs du canton.

Tableau 3.4. Surfaces et potentiels thermiques des géostructures énergétique

Zone	Surface pot. de terrains [ha]	Surface pot. de bâtiments [ha]	Potentiel thermique GEN [GWh/an]
1. Le Locle	43,5	19,5	14,1
2. La Chaux-de-Fonds	137,7	62,0	44,6
3. Le Landeron	34,2	15,5	11,1
4. Cressier-Wavre	129,7	58,4	42,0
5. St.Blaise-Marin-Epagnier	15,8	7,1	5,1
6. Neuchâtel	24,9	11,2	8,1
7. Serrières-Colombier-Auvernier	18,0	8,1	5,8
8. Gorgier-Sauges	10,5	4,7	3,4
9. Dombresson	4,3	1,9	1,4
10. Fontaines	3,3	1,5	1,1
11. Savagnier	3,1	1,4	1,0
12. Couvet	18,7	8,4	6,1
13. Môtiers	6,5	2,9	2,1
14. Boveresses	3,6	1,6	1,1
15. Travers	1,5	0,7	0,5
16. Noiraigues	4,6	2,1	1,5
17. Les Ponts-de-Martel	3,4	1,5	1,1
Total	463,3	208,5	150,1

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel



LEGENDE : POTENTIEL THERMIQUE [GWh]



Figure 3.27. Répartition du potentiel thermique des géostructures sur le territoire cantonal

Le potentiel théorique sur le plan cantonal est de 150 GWh/an. On augmentera ce chiffre de 20% pour les surfaces qui auraient échappé au recensement, ce qui donne 180 GWh/an. Pour information, cette valeur représente environ le 10% des besoins actuels en chaleur du canton (chauffage et eau chaude sanitaire). Pour estimer le potentiel réel, et compte tenu de l'occupation actuelle et du rythme de construction prévisible, on admettra une croissance annuelle moyenne de 2% des constructions, et un taux d'équipement en géostructures énergétiques de 50%. Dans les hypothèses ci-dessus, les géostructures énergétiques pourraient produire dans 10 ans une quantité annuelle de chaleur de 18 GWh dans le canton de Neuchâtel.

3.4.5 Projets de développement spécifiques

L'identification et la promotion des géostructures énergétiques montre tout son intérêt dans les secteurs comportant des projets de développement prioritaires, car cela permet de mettre en évidence, d'une manière ciblée, les possibilités offertes par cette ressource.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le canton de Neuchâtel a publié en janvier 2008 la première partie, Transports et urbanisation, de son Plan directeur cantonal actualisé, réunissant les lignes d'action stratégiques et les projets de développement significatifs envisagés au cours de la prochaine décennie.

Le projet RUN (Réseau Urbain Neuchâtelois), constitue une stratégie de développement régional et territorial du canton, dans la perspective de la nouvelle politique régionale et de la politique des agglomérations.

Sa réalisation passe par la mise en place d'une structure d'association facilitant au niveau cantonal, intercantonal et transfrontalier la coordination politique, technique et financière des projets d'agglomération et de région. Outre le canton, les membres en sont les groupements de communes constitués pour les projets d'agglomération et de région, dont en particulier (Fig. 3.28) :

- le réseau des trois villes
- la communauté urbaine du Littoral
- la communauté urbaine La Chaux-de-Fonds – Le Locle
- la région de l'Entre-Deux-Lacs
- la région Val-de-Travers
- la région Centre-Jura
- la région de la Béroche
- la région du Val-de-Ruz

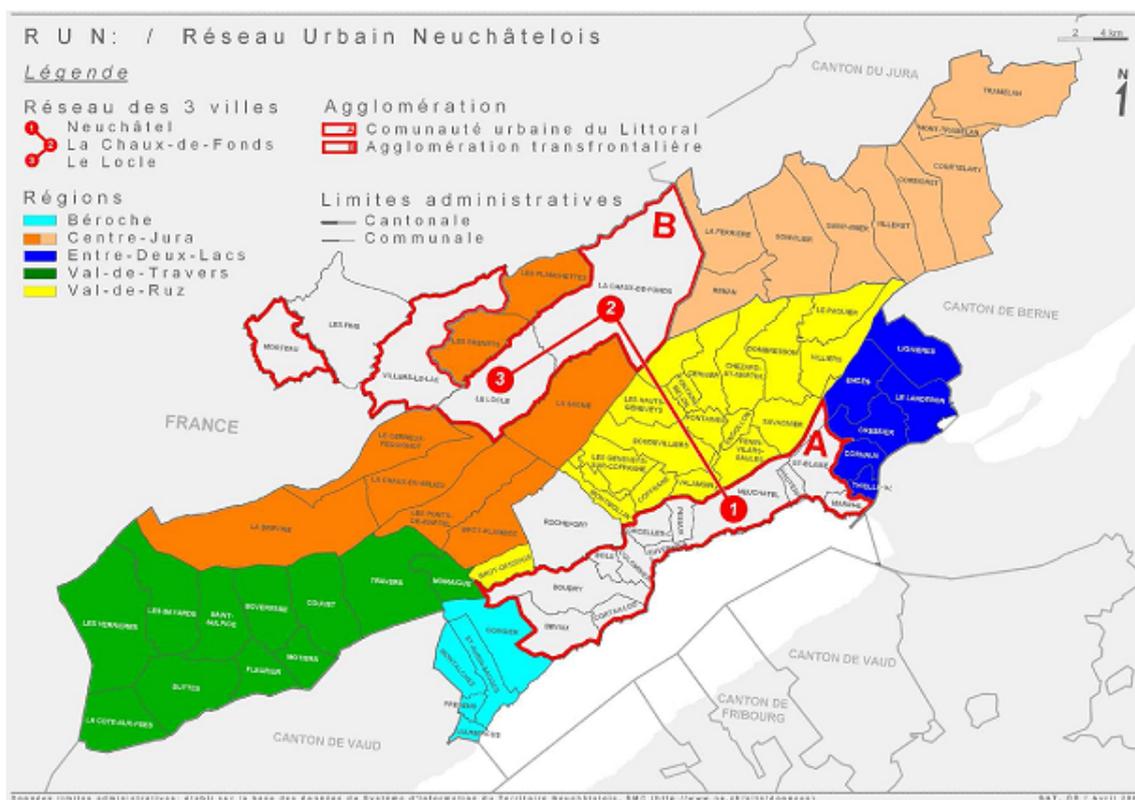


Figure 3.28. RUN Réseau urbain neuchâtelois - Répartition territoriale (Plan directeur des transports, 2007).

L'intérêt de cette organisation est de disposer d'interlocuteurs susceptibles de traiter les aspects spécifiques des divers projets, notamment en ce qui concerne les questions énergétiques. La prise

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

en compte du potentiel des géostructures énergétiques en est ainsi facilitée, comme en témoigne l'intérêt manifesté par les responsables des trois projets ci-dessous, consultés au cours de la présente étude, dont deux projets de développement régionaux et un projet de transport.

Projets de développement dans les Montagnes

Deux projets de développement prioritaire intéressants la communauté urbaine La Chaux-de-Fonds – Le Locle ont été concrétisés au cours de l'année 2007, soit le réaménagement de l'espace Le Corbusier, à la Chaux-de-Fonds et celui du Crêt-du-Locle. Ces deux secteurs se trouvent précisément dans les zones à potentiel de géostructures, comportant donc des constructions pouvant nécessiter des fondations spéciales.

Le plan spécial du projet Le Corbusier envisage la construction de bâtiments sur deux à six niveaux, destinés aux activités liées à l'espace urbain, soit l'habitation et l'activité économique, d'une surface de plus de 80'000 m². Le site se trouve dans le prolongement de la zone commerciale Coop « Les Entilles » dont les immeubles ont été construits en 2005 sur des pieux de fondation (Fig. 3.29). Les conditions géologiques étant jugées similaires sur les deux sites, des géostructures énergétiques pourraient entrer en ligne de compte aussi dans le secteur Le Corbusier. La combinaison avec une autre source de chaleur pourrait être envisagée, pour tirer profit de la capacité de stockage thermique saisonnier du système.

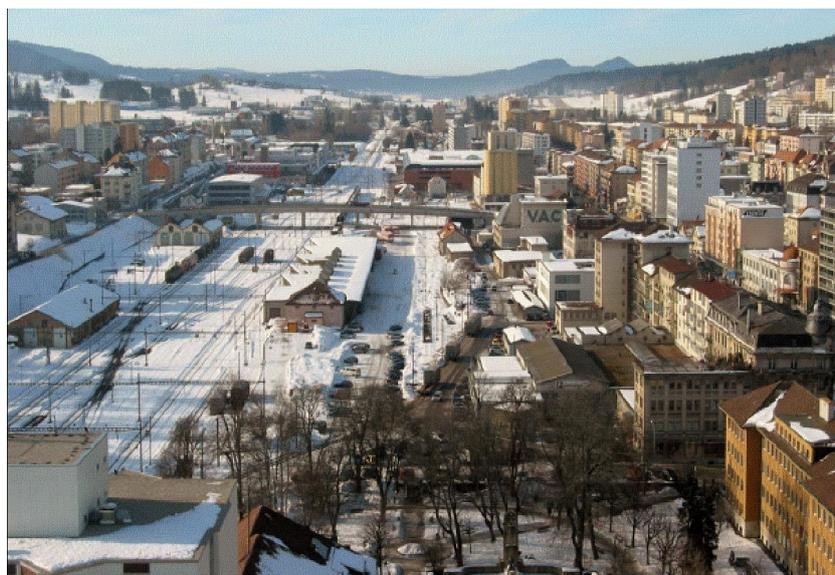


Figure 3.29. Espace Le Corbusier. Vue de la zone à aménager entre la gare, la plateforme ferroviaire, le Grand-Pont, et la rangée de bâtiments bordant l'avenue Léopold-Robert. La zone des Entilles se trouve de l'autre côté du Grand-Pont (Service d'urbanisme de la ville de la Chaux-de-Fonds, 2007).

Le projet de développement du Crêt-du-Locle, objet d'un concours international d'idées lancé en 2007, comporte l'aménagement du périmètre pour y implanter des ouvrages d'activités mixtes et de logement. Le secteur concerné est visible sur la figure 3.30. L'objectif est notamment la densification du secteur artisanal et industriel, la création d'un parc scientifique et des facilités destinées à l'industrie horlogère. Ici le type des bâtiments à construire reste à définir, mais les conditions du sous-sol peuvent localement conduire à l'adoption de fondations spéciales, comme indiqué au paragraphe ci-dessus.

Le concept d'aménagement tient compte de la raréfaction des ressources énergétiques en intégrant pleinement la notion de développement durable. Dans cet esprit, les options développement urbain

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

et raréfaction énergétiques devront être conciliées, avec un intérêt particulier à la promotion de sources d'énergies alternatives et renouvelables.

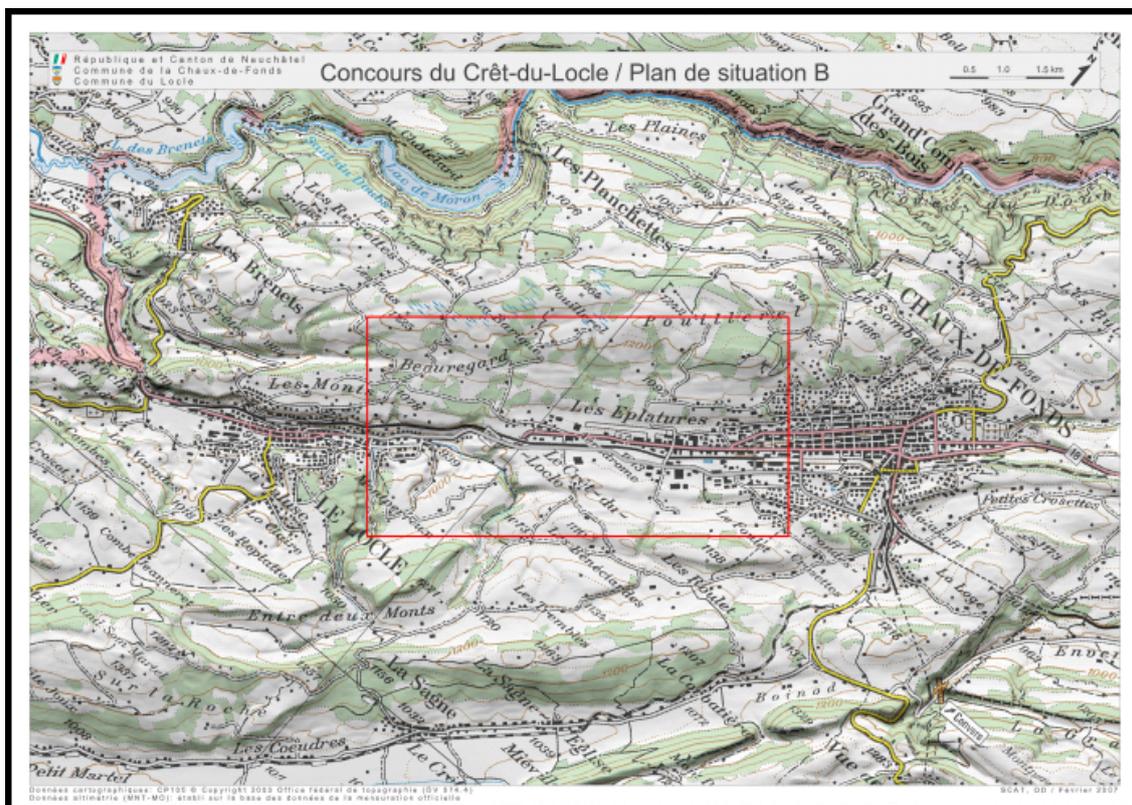


Figure 3.30. Concours du Crêt-du-Loche. Plan de situation de la zone d'aménagement.

Le potentiel énergétique de ces deux secteurs au moyen des géostructures est compris dans les chiffres du paragraphe 3.4.4. La prochaine démarche consistera à examiner leur faisabilité au niveau des études techniques et des impacts sur l'environnement.

Projet TransRUN

La mise en œuvre de la stratégie RUN passe entre autres par la réalisation du TransRUN, qui consiste en une modernisation complète de l'ensemble du réseau neuchâtelois de transports publics, avec un élément principal qui est une liaison rapide entre les Montagnes et le Littoral.

Les ouvrages liés à cette réalisation comportent de nombreux ouvrages constitués de géostructures, susceptibles d'être équipés en échangeur thermique, tel qu'exposé au point 3.2.2. Les voies de circulation souterraines ou enterrées, construites sous forme de tunnels, de cadre en béton armé, de rideaux de pieux ou d'autres ouvrages en contact avec le sous-sol peuvent être aménagés pour approvisionner en chaleur ou en froid des consommateurs proches, soit pour les besoins énergétiques propres à l'exploitant (chauffage ou refroidissement de locaux de services ou d'espaces publics, dégivrage de chaussées ou d'aiguillage de voie, etc.), soit pour desservir des consommateurs tiers du voisinage. Ces possibilités étant connues assez tôt, il est plus aisé d'en tirer profit dès la phase de planification des ouvrages. C'est l'objectif des réflexions ci-dessous, les détails de TransRUN devant être précisés au cours des années qui viennent.

La pièce maîtresse du projet est la liaison ferroviaire, presque entièrement souterraine, entre les villes de Neuchâtel et de La Chaux-de-Fonds, dans sa variante Cernier (Tracé C, Fig. 3.31). Dans

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

L'état actuel des études, le tracé comporte deux tunnels creusés respectivement sous le Mont d'Amin/Vue des Alpes et le Chaumont. Ils sont séparés dans le Val-de Ruz par un tronçon à ciel ouvert de près de 3 km.

La longueur prévue du tunnel sous le Mont d'Amin est de 5'600 mètres, le portail nord se trouve à 1'050 mètres d'altitude, le portail sud, à Cernier est à 790 m. Le tracé est en pente (env. 4,3 %) en direction de Cernier. Le tunnel sous le Chaumont est long de 5'500 mètres, les portails sont situés aux altitudes 720 et 479 m. et la pente est de 4,4 % environ en direction de Neuchâtel.

La section du tunnel prévue est un profil circulaire, probablement revêtu de voussoirs, avec un diamètre intérieur de l'ordre de 8 m.

Les ouvrages en béton formant les têtes de tunnels pourraient être équipés en échangeur thermique pour livrer de la chaleur et du froid à des consommateurs situés à proximité, en particulier à Cernier et à Neuchâtel. Il en est de même des autres ouvrages similaires du projet, dont les emplacements et les caractéristiques restent à définir.

D'autres formes d'utilisation pourraient être celles évoquées au point 3.2.2, ainsi que l'exploitation des eaux souterraines drainées par les tunnels (Wilhelm, 2006). Cette forme de valorisation, pratiquée depuis des décennies dans plusieurs tunnels suisses, dépend des conditions hydrogéologiques et géothermiques spécifiques, qui doivent faire l'objet d'investigations particulières. Le centre autoroutier d'Airolo bénéficie depuis 1979 de la chaleur véhiculée par les eaux souterraines du tunnel du St-Gothard pour le chauffage de son hall d'entretien et des ateliers. A Oberwald, dans le Haut-Valais, les eaux du tunnel de la Furka sont utilisées depuis près de 20 ans pour le chauffage d'une salle omnisport et un grand nombre d'habitation de la commune. A Frutigen, au portail nord du tunnel de base du Lötschberg, un centre de pisciculture et de serre tropicale est en voie de réalisation, grâce à l'apport calorifique des eaux du tunnel (environ 150 l/sec à 22°C). De tels centres sont à l'étude à proximité des autres portails des tunnels de base d'Alptransit.

Les possibilités d'utilisation énergétique des géostructures et des tunnels du projet TransRUN devraient faire l'objet d'une approche systématique lors de la planification des ouvrages.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

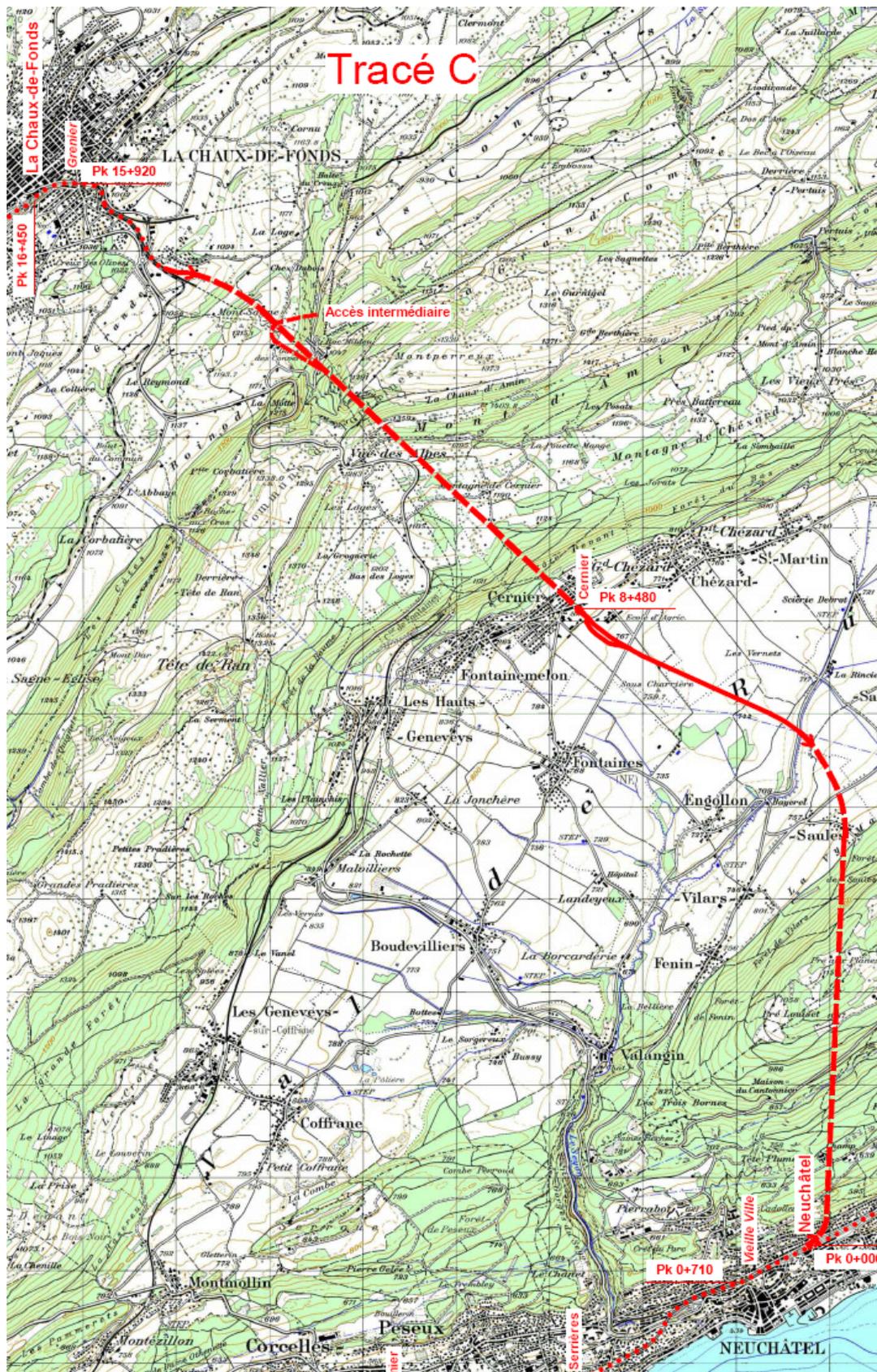


Figure 3.31. Projet TransRUN. Liaison Neuchâtel – La Chaux-de-Fonds (Variante Cernier)(Projet d’agglomération RUN, 2007).

3.5 Conclusions et recommandations

La technique des géostructures énergétiques est un développement relativement récent, mais actuellement déjà bien utilisée. Il s'agit d'une source d'énergie utilisant le potentiel calorifique du sous-sol, avant tout pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments, dans les meilleures conditions économiques, environnementale et de fonctionnement. De nombreux exemples en Suisse et à l'étranger témoignent de l'intérêt qu'il y a d'équiper en échangeur de chaleur les éléments d'une construction en contact avec le sol.

L'étude prospective a mis en évidence les régions disposant de potentiel en géostructures énergétiques dans le canton de Neuchâtel. Il s'agit essentiellement de la vallée Le Locle – La Chaux-de-Fonds et de la région du Littoral- est jusqu'au Landeron, où la présence d'un sous-sol nécessitant la mise en place de géostructures permettront d'approvisionner les constructions futures dans les zones de développement.

Le potentiel énergétique utilisable pour le chauffage et/ou le refroidissement sur le territoire cantonal a été estimé à 18 GWh/an dans 10 ans, en admettant un taux de mise en œuvre des géostructures énergétiques de 50% des nouvelles constructions, l'accroissement moyen de ces dernières étant de 2% par an.

La présente étude a été menée au niveau d'une première évaluation succincte des disponibilités. Au vu du potentiel identifié, il est recommandé de poursuivre les études et les démarches pour préciser les disponibilités en surfaces potentielles et pour approfondir les possibilités d'application avec l'ensemble des acteurs impliqués.

Cette dernière action est favorisée par la série de projets d'aménagement en plein développement, soutenus en particulier par la mise en œuvre du nouveau Plan Directeur Cantonal.

D'une façon concrète, les actions suivantes sont proposées dans le domaine des géostructures énergétiques (GEN) :

1. Diffusion des conclusions de la présente étude auprès des autorités et organismes concernés.
2. Organisation d'une campagne d'information auprès des professionnels et des promoteurs impliqués dans de tels projets.
3. Soutenir des études de faisabilité des GEN en collaboration avec les responsables des grands projets de développement.
4. Recherche de soutien financier pour promouvoir les réalisations GEN
5. Etablissement d'une réglementation en faveur des GEN.
6. Inclure le développement des GEN dans la conception cantonale de l'énergie et établir un plan d'action comprenant les mesures ad hoc décrites ci-dessus.

3.6 Références

- Adam, D., 2008. Tunnelwärmenutzung mit Absorberelementen ; 17^{ème} journée technique et d'information de la SSG, 17 septembre 2008, Hagerbach, Sargans.
- Anstett M., 2001. Pieux énergétiques du centre scolaire de Fully ; Comptes-rendus de la 12^{ème} journée technique et d'information de la SSG, 20 avril 2001, Berne.
- Bassetti, S., Rohner, E., Rybach, L. & Sellami, S., 2004. Erfolgskontrolle und Wirtschaftlichkeitsanalyse von Messkampagnen zu P&D Anlagen. Projet OFEN No 100'275. Geowatt Zurich: 34 pp.
- Bilfinger + Berger & NEK Umwelttechnik GmbH, 1997. Energiepfähle für den Neubau der Landesbank Hessen-Thüringen, Frankfurt am Main ; Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, Mannheim.
- Bonvin M. & Cordonier P., 2001. Pieux énergétiques avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure. Rapport OFEN.
- Borel J.P., 2007. Energiepfähle - ALDI Verteilzentrum mit Erdspeicher. Géothermie CH, No 43: pp. 9-10.
- Fromentin A., Pahud D., Jaquier C. & Morath M., 1997. Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs ; Rapport final, Programme de recherche : géothermie, Office fédéral de l'Energie (OFEN), Lausanne.
- Fromentin A., Pahud D., Laloui L. & Moreni M., 1999. Pieux échangeurs : conception et règles de pré-dimensionnement ; Revue française de génie civil n°6/1999, vol. 3 : pp. 387-421.
- Hubbuch M., 2001. Dock Midfield, Zürich Flughafen, Planung und Ausführung der Energiepfähle ; 12. Fachtagung und Hauptversammlung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie (SVG), 20. April 2001, Bern.
- Joliquin P., 2002. Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques. Méthodologie de détermination des zones potentielles. Diplôme d'études postgrades en géologie de l'ingénieur et de l'environnement. GEOLEP, Lausanne.
- Katzenbach R., Frithjof J., Waberseck Th. & Wagner I., 2007. Energiepfähle - Technik und Qualitätssicherung. Geoenergie Tagung Offenburg.
- Laloui L., Moreni M., Fromentin A., Pahud D. & Vulliet L., 1999. In-situ thermo-mechanical load test on a heat exchanger pile ; 4th International Conference on Deep Foundation Practice + Piletalk, 29, 30 July 1999, Singapore.
- Laloui L., Moreni M., Steinmann G., Vulliet L., Fromentin A. & Pahud D., 1999. Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques ; Rapport final, Programme géothermie, Office fédéral de l'Energie (OFEN), Lausanne.
- Laloui L. & Steinmann, G., 2005. Mini-module de chauffage pour les tests de réponse thermique du terrain. Projet OFEN No 101'189. Rapport final. LMS-EPF Lausanne.
- Laloui L. & Steinmann, G., 2007. Actualisation du Mini-module de chauffage pour tests de réponse thermique des terrains. Rapport final, OFEN, Berne: 34 pp.
- Morath, M., 2005. Erweiterung Dividella AG, Grabs - Energiepfahlanlage. Projet OFEN No 46'914. Rapport final : 36 pp.
- OFEN, 2006. L'utilisation de la chaleur terrestre. Aperçus, technologies, visions. Office fédéral de l'Energie (OFEN), Berne.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Pahud D., 2001. Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs ; 12^{ème} journée technique et d'information de la SSG, 20 avril 2001, Berne.
- Pahud D., Fromentin A. & Hubbuch M., 2001. Système de chauffage et de refroidissement avec pieux échangeurs, L'aéroport de Zurich – exemple d'approvisionnement en énergie axé sur l'avenir ; Bulletin ASE/AES 7/01, Fehraltorf.
- Pahud D., 2002. Heat Exchanger Pile Systems – Examples, design and thermal calculations. SUPSI, Canobbio.
- Pahud, D. & Hubbuch, M., 2007. Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zurich. Projet OFEN No 37'373. SUPSI, Canobbio: 93 pp.
- Pahud, D. & Hubbuch, M., 2007. Dock Midfield. Performances mesurées des pieux énergétiques. Géothermie CH, No 42: pp. 13-14.
- Preg R., 2001. Kunsthhaus Bregenz, Nutzung geothermischer Energie über Beton mit neuen Technologien ; 12. Fachtagung der Schweizerische Vereinigung für Geothermie (SVG), 20. April 2001, Bern.
- République et Canton de Neuchâtel, 2007. Un canton, Une Vision. 07.049. Rapport du Conseil d'Etat au Grand Conseil, du 26.09.2008, concernant la politique régionale, le RUN, le TransRUN et leurs conséquences.
- République et Canton de Neuchâtel, 2007. Projet d'agglomération RUN. Volet « transports et urbanisation ». Rapport du 13 décembre 2007.
- République et Canton de Neuchâtel, 2007. Plan Directeur Cantonal, Phase 1, du 19 décembre 2007.
- Rybach, L., Pahud, D. & Wilhelm, J., 2006. Energetische Geostrukturen. Die neue SIA-Dokumentation D 0190. Géothermie CH, No 40 : pp. 12-13.
- SIA, 1988. Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température, Documentation D 025 ; Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich : 91 pp.
- SIA, 2005. Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance. Documentation D 0190. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich : 99 pp.
- SSG, 2007. Géostrutures énergétiques. Fiche technique. Société Suisse pour la Géothermie (SSG) : 2 pp.
- Von der Hude N. & Kapp C., 1998. The use of heat exchanger piles as exemplified in the Main Tower building in Frankfurt am Main ; 5th Darmstadt Geotechnical Conference, 19th March 1998, Darmstadt.
- Von der Hude N. & Kapp C., 2001. Energiepfähle für Hochhäuser in Frankfurt am Main – Ausführungsbeispiele – aus der Sicht einer Spezialtiefbaufirma ; 12. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie, 20. April 2001, Bern.
- Vuataz F.-D., Bossy F., Colliard B. & Wilhelm J., 2005. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg. Géostrutures énergétiques, implantation des sondes géothermiques verticales, ressources en aquifères profonds, géothermie haute énergie. Rapport pour le Service des transports et de l'énergie, canton de Fribourg, 2 vol. 162 :90 pp.
- Wilhelm, J., 2002. De la chaleur des fondations, béton. Conférence donnée le 20 décembre 2002 au Musée d'ethnographie de Neuchâtel sous l'égide du Centre Cantonal Infoénergie.
- Wilhelm J., Bianchetti G. & Vuataz F.-D., 2003. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud. Géostrutures énergétiques, aquifères profonds, géothermie haute énergie. Rapport pour l'Etat de Vaud, projet OFEN No 46'094 : 171 pp.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Wilhelm, J. & Gorhan, H., 2003. Energiepfähle für das Musée des Confluences in Lyon. Géothermie CH, No 35 : p. 14.

Wilhelm, J., 2006. Concept de drainage des tunnels en vue d'une optimisation de l'utilisation géothermique. Rapport final. Projet OFEN No 101'292: 39 pp.

4. EXPLOITATION THERMIQUE DES NAPPES PHREATIQUES

4.1 Introduction

Contrairement au seul flux géothermique qui alimente les SGV, les ressources thermiques provenant de nappes phréatiques sont localisées aux endroits où il y a de l'eau à faible profondeur et des terrains dont la perméabilité est suffisamment élevée pour pouvoir y pomper un certain débit. L'exploitation thermique des nappes phréatiques comporte plusieurs avantages. Leur température est relativement constante tout au long de l'année et l'écoulement de l'eau entraîne un flux de chaleur constamment renouvelé. Elles sont de plus très adaptées pour rafraîchir les bâtiments durant les périodes estivales. Etant donné que les nappes phréatiques de faible profondeur sont souvent utilisées pour l'alimentation en eau potable, les installations d'exploitation thermique sont réglementées par la législation sur la protection des eaux souterraines. De plus, leur impact à long terme et à grande échelle sur les nappes d'eau souterraine n'est pas encore très bien connu.

Dans tous les cas, la ressource en nappe phréatique est locale et limitée. De plus elle est parfois difficile à exploiter. Par conséquent, il est nécessaire de faire une étude hydrogéologique de détail pour toute nouvelle installation. Il existe également un risque d'échec si le débit obtenu dans les puits de pompage est trop faible pour répondre aux besoins thermiques de l'installation.

L'exploitation thermique des nappes phréatiques est encore relativement peu utilisée en Suisse et représente à l'heure actuelle seulement 2 % des installations couplées à des pompes à chaleur. Cette ressource est principalement utilisée pour alimenter de grands bâtiments. Le but de ce chapitre est d'une part de mettre en évidence les secteurs exploitables dans le canton de Neuchâtel et d'autre part d'évaluer leur potentiel, afin d'encourager l'utilisation de cette ressource.

La réalisation d'une carte sur les possibilités d'exploitation thermique des nappes phréatiques dans le canton de Neuchâtel a pour objectif de mettre en évidence les sites où l'exploitation de l'eau souterraine pour du chauffage ou du refroidissement peut être envisagée. La carte, établie au format numérique, est destinée à renseigner d'une part les pouvoirs publics, mais aussi les acteurs privés des secteurs de l'énergie et du bâtiment. En tant que document pouvant être consulté en avant projet de toute construction ou d'assainissement énergétique, la carte établie a pour rôle de promouvoir l'utilisation de ressource géothermique. Une meilleure connaissance de la répartition et de l'utilisation de cette ressource permettra également de mieux gérer son exploitation et d'éviter les interactions entre les installations existantes et futures.

Le potentiel de ces ressources a ensuite été estimé en évaluant les deux plus grands aquifères à porosité d'interstices du canton de Neuchâtel, à savoir la nappe du delta de l'Areuse et la nappe du Val-de-Travers. A partir de ces résultats, les possibilités globales d'exploitation pour des nappes du même type ont été déterminées.

4.2 Cartographie des ressources disponibles

4.2.1 Principes retenus lors de l'établissement de la carte

Généralités

La possibilité d'exploiter la ressource thermique des nappes souterraines dépend étroitement des propriétés du sous-sol suivantes :

- Présence d'une zone saturée en eau.
- Epaisseur de la zone saturée.
- Perméabilité du terrain.
- Qualité de l'eau souterraine.

La carte a été conçue comme un outil informatif, dénuée de foi publique. Elle a pour objectif de renseigner sur la faisabilité d'un projet de captage, mais tout projet sérieux nécessitera une investigation complémentaire, même si les conditions sont indiquées comme favorables.

L'ensemble de la surface du canton a été évalué en fonction des possibilités de rencontrer une nappe phréatique exploitable à de faibles profondeurs (Fig. 4.1). Plus précisément, la ressource ciblée dans ce travail correspond aux aquifères à porosité d'interstice, le plus souvent de nature alluviale, accessibles par puits filtrant d'une profondeur maximale de 25 m. Les secteurs favorables devraient permettre d'exploiter des débits de quelques dizaines à plusieurs milliers de l/min, dans les secteurs les plus productifs. La carte ne donne cependant aucune indication sur les débits réellement exploitables. Une évaluation plus précise de la productivité de la nappe est nécessaire pour la réalisation de tout projet.

La délimitation des secteurs de la carte a été établie par la consultation des informations géologiques disponibles à l'échelle du canton en 2008. Les secteurs favorables correspondent généralement aux endroits où la présence de graviers aquifères a été démontrée par méthodes directes (forages ou sondages), et indirectes (p.ex. géophysique). A quelques exceptions près, les nappes phréatiques du canton de Neuchâtel sont très imparfaitement connues, notamment en ce qui concerne leur extension latérale. Dans le cas où les données étaient inexistantes, les secteurs potentiellement favorables ont été délimités avec un optimisme « raisonnable ».

Ressources non considérées

Les zones sourcières, résurgences naturelles ou artificielles d'eau souterraine, n'ont pas été considérées dans le cadre de cette étude. Les sources, pour autant que leur débit à l'étiage et leur température le permette, constituent également une ressource thermique très intéressante dans le canton de Neuchâtel. Ces dernières peuvent faire l'objet d'une exploitation par captage superficiel.

Une grande partie des ressources en eau potable du canton est issue des terrains calcaires à porosité de fissure (aquifères karstiques), qui constituent la très grande majorité du sous-sol neuchâtelois. La plupart des écoulements surgissent à l'air libre sous forme de sources (l'Areuse, la Serrière, la Noiraigue, le Ruau, etc.). Les écoulements karstiques sont caractérisés par une forte hétérogénéité et les secteurs perméables sont très localisés. L'exploitation de cette ressource par puits vertical nécessite la réalisation de forages de relativement grande profondeur, avec un faible pourcentage de réussite. Pour ces raisons, l'exploitation des aquifères karstique de faible et moyenne profondeur n'a pas été considérée lors de l'établissement de la carte.

4.2.2 Légende de la carte

La carte réalisée est présentée sur la figure 4.1. et dans l'annexe 4.1. Les secteurs suivants ont été délimités :

Secteur 1 - Nappe phréatique potentiellement exploitable à des fins thermiques par forage de faible profondeur

Dans ce secteur, la rencontre d'eau souterraine exploitable par forage de faible profondeur est probable, mais pas garantie. Les conditions précises d'exploitation (dimensionnement des ouvrages de captage et d'infiltration, distance du rejet) doivent être déterminées en fonction des conditions géologiques locales (débit exploitable, température de la ressource) et du régime d'exploitation.

La réalisation de forages pour l'exploitation de la nappe phréatique est soumise à autorisation et requiert l'octroi d'une concession. L'utilisateur doit s'assurer de ne pas mettre en péril le domaine construit par un abaissement excessif du niveau de la nappe et tenir compte de la présence de captages voisins (eau potable et hydrothermie). La réinfiltration dans la nappe des eaux rejetées est recommandée afin de garantir la reconstitution du stock de l'aquifère.

Secteur 2 - Présence d'une nappe phréatique exploitée pour l'alimentation en eau potable. Exploitation à des fins thermiques interdite

Dans le secteur 2, l'exploitation thermique des nappes phréatiques n'est pas envisageable. Le secteur a été défini sur la base de critères légaux et comprend les zones S de protection des captages d'eau d'intérêt public en nappes phréatiques. L'existence des zones de protection exclut légalement toute possibilité de captages privés d'eau souterraine.

Les nappes phréatiques situées en terrain à porosité d'interstice sont très souvent exploitées pour la production d'eau potable de qualité. Ces réserves en eau potable doivent être protégées en priorité. Le respect des zones de protection tel que délimitées sur la carte n'est cependant pas suffisant pour éviter toute interaction avec les captages d'eau potable publiques ou privés. Pour cette raison, les autorités se réservent le droit de refuser les concessions, dans le cas où l'installation met en péril les captages d'eau potable. Le cas échéant une étude d'impact garantissant l'absence de risque hydrogéologique peut être demandée. Lorsque l'exploitation thermique est autorisée, la réinfiltration est le plus souvent exigée afin de limiter les influences sur le débit des ouvrages existants.

Secteur 3 - En principe, pas de nappe phréatique exploitable

Le secteur correspond aux terrains peu favorables à l'implantation d'un captage d'eau souterraine. Toute possibilité de rencontrer des graviers perméables de faible extension ou des nappes phréatiques exploitables à de plus grandes profondeurs n'est toutefois pas exclue.

Captages hydrothermiques existants, avec position du captage et du rejet

Les installations existantes sont représentées sur la carte avec la position du captage et du rejet, dans le cas où les eaux sont infiltrées dans la nappe. Plusieurs catégories sont définies en fonction du mode d'utilisation : captage pour produire de la chaleur en hiver, captage pour produire du froid (freecooling et froid industriel), captage mixte (production de chaleur et de froid), et de même pour les rejets. Le recensement de la position précise de ces ouvrages doit permettre de prévenir les interactions thermiques entre installations voisines et de gérer le stock de chaleur disponible.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

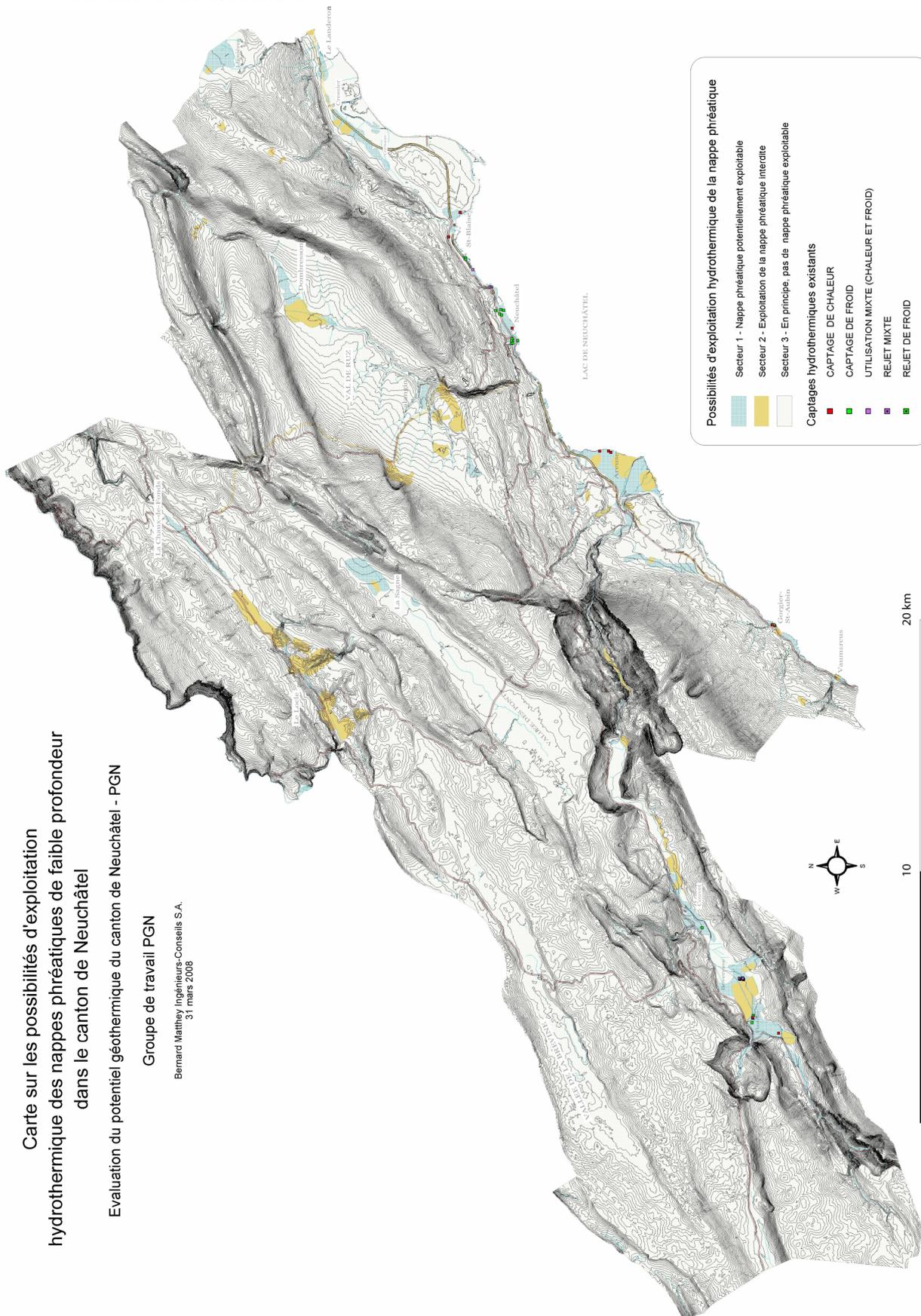


Figure 4.1. Carte des possibilités d'exploitation thermique des nappes phréatiques de faible profondeur dans le canton de Neuchâtel (voir annexe 4.1)

4.2.3 Description de la ressource disponible

Répartition de la ressource disponible

L'extension des nappes phréatiques dans le canton de Neuchâtel est limitée par rapport à d'autres cantons traversés par de grandes plaines alluviales (Valais, Berne, Soleure, Argovie, Zurich,...). Comme la plupart des nappes phréatiques du canton sont déjà utilisées comme ressource en eau potable, les secteurs favorables à leur exploitation thermique sont restreints.

La surface totale des nappes phréatiques exploitables (secteur 1) est de 14.1 km², soit un peu moins de 2% de la surface du canton. Les ressources sont localisées principalement :

- Dans l'axe des synclinaux du Jura où une nappe alluviale a pu se constituer (Nappe du Val de Travers, nappe libre des Prés-Royer à Dombresson). La nappe captive des Prés-Royer n'a pas été considérée comme une ressource exploitable, en raison du risque que cela représente pour les captages existants. La limite de la nappe artésienne a donc été répertoriée en secteur 2.
- En bordure des synclinaux, sur les cônes alluviaux de petits affluents (delta du Sucre et Bois de Croix à Couvet, nappe du Bied à Môtiers, nappe du Marais à La Sagne).
- En région littorale, sur les deltas alluviaux des affluents du lac (Nappe du delta de l'Areuse, nappe du Seyon à Neuchâtel, nappes de Vaumarcus et de St-Aubin).
- En bordure du lac de Neuchâtel. Les nappes périlacustres, constituées de moraine remaniées (Est de Neuchâtel), de remblais perméables et d'anciens cônes de déjection (Monruz) sont également des ressources intéressantes.
- Dans la région de Cornaux, Cressier et Le Landeron, constitués par endroits de moraines graveleuses et d'alluvions grossières.
- Dans les secteurs constitués de graviers fluvioglaciaires (nappe d'Archessus à Bevaix, nappe de Lignièrès, nappes de l'ouest du Val de Ruz). Les nappes de Bussy, le Sorgereux, Bottes et Paulière (communes de Coffrane, Boudevilliers et Valangin), n'ont pas été classées comme ressources exploitables, car le risque de porter atteinte aux captages d'eau potable bordant les aquifères a été jugé trop important.
- Haut du canton. Au Locle, l'exploitation par forage de l'aquifère à double porosité de l'Oehningien n'a pas été jugée très adéquate, étant donné qu'il s'agit d'une zone sourcière de grande extension exploitée pour l'eau potable. Quelques secteurs favorables ont été indiqués au centre-ville, dans des secteurs où l'on rencontre des graviers tardi-glaciaires et dans l'Oehningien en charge. A La Chaux-de-Fonds, des possibilités de captage dans les craies lacustres de l'Oehningien existent, même si le potentiel de la ressource est très mal connu.
- Les vallées de la Brévine et des Ponts, à l'exception de la région de La Sagne, sont dépourvues de nappes phréatiques exploitables.

Synthèse des principales caractéristiques des nappes phréatiques

Une synthèse des caractéristiques des principales nappes phréatiques du canton a été établie (Annexe 4.2). Elle fournit des indications sur les propriétés hydrauliques des nappes et leur localisation (profondeur, épaisseur moyenne). Le résumé a été établi sur la base de la bibliographie consultée pour l'établissement de la carte (c.f. 4.7). Les valeurs fournies par cette synthèse doivent être considérées comme indicatives. En raison de la forte variabilité des terrains et de leurs propriétés, les valeurs fournies ne sont pas directement utilisables pour le dimensionnement précis des installations.

Adéquation de la ressource avec le milieu construit

Sur le Littoral et dans le Val-de-Travers, la ressource est généralement localisée à proximité du milieu construit, là où la demande thermique existe. On peut citer le cas des villes de Neuchâtel, Hauterive, Areuse, Fleurier, Boveresse, Couvet, Dombresson, Cornaux, Cressier et Le Landeron. Ces secteurs ont un fort potentiel de développement de l'exploitation de l'énergie thermique de la nappe. D'autres secteurs riches en eau souterraine ont une position plus marginale par rapport aux utilisateurs potentiels (Lignières, La Sagne, Les Brenets).

En milieu urbain, les ressources en eau souterraine destinées à la production d'eau potable sont souvent délaissées en raison de dégradations possibles et observées de la qualité de l'eau (mauvaise bactériologie, pollutions industrielles, ...). Les eaux souterraines destinées à l'usage thermique sont moins vulnérables à l'influence des pollutions urbaines. Dans ces secteurs, l'exploitation thermique de la nappe n'entre donc pas en concurrence avec la production d'eau potable.

Un rabattement excessif du niveau de la nappe en milieu construit peut conduire à une modification des propriétés mécaniques du terrain et, pour les cas les plus problématiques, à un affaissement des constructions. Les exploitants des puits de captage sont responsables des dégradations provoquées par l'abaissement du niveau de la nappe.

D'autres secteurs sont plus particulièrement sensibles à l'abaissement du niveau de l'eau souterraine, notamment en présence de tourbe qui est sujette au tassement si elle est dénoyée. A notre connaissance, les principaux secteurs où l'on trouve localement des niveaux tourbeux et où il faut prendre garde à ces phénomènes sont les suivants (liste non exhaustive) :

- Région de l'Entre-deux-Lacs (de St-Blaise au Landeron)
- Région de La Sagne
- Centre-ville du Locle

Qualité des eaux

Les paramètres à examiner en priorité lorsqu'on envisage l'exploitation thermique des eaux souterraines sont la température et la stabilité chimique de l'eau pompée (potentiel d'incrustation ou de corrosion).

Température

La température annuelle moyenne des nappes souterraines du canton de Neuchâtel est comprise entre 7.5 °C (Jura) et 13 °C (Littoral). Les températures minimales et maximales, qui sont décalées de quelques mois par rapport à la température de l'air, sont également fournies à titre indicatif (Tab.4.1). Les résultats confirment que la température des nappes est favorable à l'exploitation thermique car elle montre peu de variations saisonnières. Les températures minimales des eaux de la nappe sont rarement inférieures à 6 °C, alors que les valeurs maximales ne dépassent que rarement 15°C. Dans la pratique, même si la température des eaux pompées est généralement proche de ces valeurs indicatives, il faut prendre garde aux influences locales des eaux de surface (cours d'eau ou lac), qui peuvent conduire à un abaissement - respectivement une augmentation - significatif de la température de la nappe, avec pour conséquence une réduction de l'énergie exploitable, voire une impossibilité de produire de la chaleur ou du froid.

Chimie des eaux

On observe parfois la présence d'eaux réactives, peu oxygénées et chargées en fer et manganèse dissous, qui ont un fort pouvoir incrustant. Le captage de ces eaux peut mettre en péril l'installation

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

de pompage si aucune précaution n'est prise au niveau de l'exploitation et des installations techniques (échangeurs, filtres, type de pompe, système de circulation,...). La rencontre de ce type d'eaux n'est pas exceptionnelle dans le canton de Neuchâtel. On peut les rencontrer en bordure du lac (Neuchâtel, Jeunes-Rives), au front du delta de l'Areuse, dans les nappes de St-Aubin, du Landeron et de Cornaux, ainsi qu'à Boveresse.

4.2.4 Installations existantes

Un recensement des captages hydrothermiques existants a été effectué sur la base de la liste des concessions hydrothermiques mise à disposition par le Bureau de l'économie des eaux de l'Etat de Neuchâtel et par la consultation de documents bibliographiques.

Les résultats confirment que cette forme d'exploitation de la chaleur du sous sol est à l'heure actuelle très peu développée, avec un nombre total de 28 installations recensées (Fig. 4.1 ; Tabl 4.1). Celles-ci sont localisées principalement sur le Littoral (centre-ville de Neuchâtel, Hauterive, St-Blaise, Colombier et Gorgier), ainsi que dans le Val-de-Travers (Fleurier, Boveresse et Couvet).

Les installations sont de puissance modeste, avec des débits de concession de 16 à 1'300 l/min (moyenne 220 l/min). Même si les débits de concession n'atteignent probablement pas les débits réellement prélevés, l'énergie soutirée pour la production de chaleur et de froid est estimée à 4'400 MWh/an. Les nappes sont actuellement exploitées principalement pour la production de froid (3'500 MWh/an), très supérieure au prélèvement total de chaleur (900 MWh/an).

Parmi les installations connues, seule une faible proportion du débit prélevé est rejetée dans la nappe (14%), ce qui représente une infiltration annuelle de 300 MWh_{froid}.

Tableau 4.1. Installations thermiques fonctionnant par captage dans la nappe phréatique. Débits prélevés et énergie exploitée dans le canton de Neuchâtel.

<i>Installations</i>	<i>Nb</i>	Débit total exploité (débit de concession)	Energie totale fournie par la nappe souterraine (estimation)	Débit réinfiltré dans la nappe souterraine
		l/min	MWh/an	l/min
Production de chaleur uniquement	12	910	250	180
Production de froid uniquement	12	5980	3200	0
Production de chaleur et de froid	4	1150	950	970
Nombre total en fonction (2007)	28	8'040	4'400	1'150

4.2.5 Conclusions

L'extension des nappes phréatiques de faible profondeur exploitables à des fins thermiques est limitée dans le canton de Neuchâtel. La carte jointe, qui vise à encourager l'implantation de nouvelles installations, permet de localiser rapidement les endroits potentiellement favorables.

Les nappes phréatiques potentiellement exploitables sont souvent localisées en zones urbaines et villageoises (Neuchâtel, Areuse, Fleurier, Le Landeron, ...), en adéquation avec la demande potentielle de chaleur et de froid. Un avantage de l'exploitation thermique des nappes souterraines est que les puissances fournies peuvent être largement supérieures à celles d'autres formes d'exploitation géothermique de faible profondeur (p.ex. sondes géothermiques verticales). Dans les secteurs où la profondeur prescrite pour les sondes géothermiques verticales est limitée pour des raisons géologiques, comme en Ville de Neuchâtel et dans le Val-de-Travers, les nappes phréatiques constituent bien souvent une alternative intéressante et à bon rendement pour l'alimentation de pompes à chaleur ou pour la production de froid.

La carte des possibilités d'exploitation thermique des nappes phréatiques dans le canton de Neuchâtel contribue à une meilleure gestion de la chaleur et du froid des nappes phréatiques. Le nombre d'exploitations thermiques est amené à se développer et, lors de l'octroi de concessions, il s'agira de veiller au respect de l'équilibre thermique et hydraulique des nappes phréatiques. Dans bien des cas, une utilisation combinée de la chaleur et du froid permet de garantir un équilibre thermique annuel. D'autre part, la réinfiltration des eaux rejetées devrait être la règle, afin de ne pas perturber l'équilibre hydraulique du milieu souterrain. Dans cette optique de gestion durable, il est important de connaître précisément les caractéristiques des ouvrages réalisés (dimensions et position des ouvrages de captage et de rejet) et de leur mode d'exploitation (débit d'exploitation pratiqué, type de rejet, quantité de chaleur rejetée).

4.3 Dimensionnement des installations thermiques sur nappes phréatiques

4.3.1 Installations et systèmes

Description des systèmes

L'exploitation de la chaleur des nappes phréatiques est considérée comme une utilisation directe de la chaleur géothermique, puisque l'eau souterraine transmet sa chaleur au fluide de travail de la PAC, sans passer par l'intermédiaire d'un autre fluide caloporteur, comme dans le cas des sondes géothermiques verticales.

L'eau souterraine est pompée à l'aide d'un ou de plusieurs puits de prélèvement, son énergie thermique est extraite et transmise à la pompe à chaleur qui abaisse sa température de quelques degrés. Afin de maintenir le bilan hydrogéologique de l'aquifère constant, l'eau est en général réinjectée dans l'aquifère à l'aide d'un puits de restitution ou d'une tranchée d'infiltration (Fig. 4.2). Pour éviter un court-circuit thermique, le puits de restitution doit être positionné à l'aval et à une distance suffisante du puits de prélèvement.

Le rendement des systèmes d'exploitation de l'eau souterraine est meilleur que celui des SGV, d'une part parce qu'il s'agit d'une utilisation directe de la chaleur et d'autre part parce que la température de la source ne diminue pas au cours de l'exploitation comme c'est le cas pour une SGV. Ceci se traduit par un coefficient de performance (COP) des pompes à chaleur eau-eau élevé, de 5 par rapport à celui des PAC sol-eau qui est de l'ordre de 4, ce qui correspond à une économie de 30 % d'énergie électrique par an.

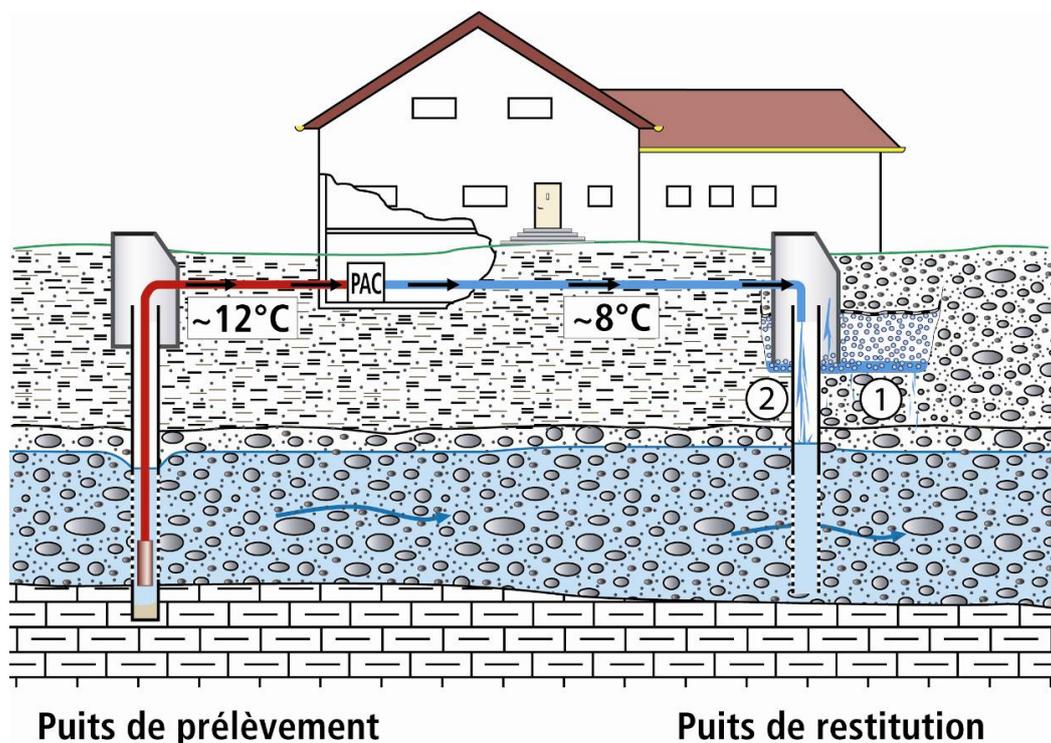


Figure 4.2. Schéma d'une installation d'exploitation de la chaleur d'une nappe phréatique avec restitution de l'eau dans un forage d'injection (2) ou un puit perdu (1) (Eberhard und Partner AG, 2005).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Sur le plateau suisse, la température des nappes phréatiques peu profondes est de l'ordre de 10 à 15 °C et varie peu au cours de l'année d'une part à cause de l'inertie thermique du sous-sol, mais également grâce à la couche de sédiments de couverture qui constitue une isolation entre la nappe et l'atmosphère. La température des nappes peu profondes enregistre les variations saisonnières de températures mais de manière atténuée et décalée de quelques mois par rapport à la surface. Ces variations sont plus perceptibles lorsque la couche de couverture de surface est peu épaisse ou très poreuse.

Les installations d'exploitation de la chaleur des nappes peuvent être utilisées pour rafraîchir les bâtiments en été en transmettant le froid de la nappe directement au fluide de circulation du système de chauffage. En cas de besoins importants, un refroidissement des bâtiments encore plus efficace, à l'aide d'une PAC réversible est également réalisable.

Dans le cas où la perméabilité de l'aquifère est faible, il peut être nécessaire ou avantageux de mettre en place une installation réversible avec stockage de chaleur aux puits, permettant d'atteindre un équilibre d'exploitation. Dans ce cas, les puits servent alternativement de puits de pompage et de puits d'injection. Un puits « chaud », si possible positionné à l'amont est utilisé comme puits de pompage en hiver pour apporter la chaleur de la nappe à la PAC, l'eau refroidie étant réinjectée dans un puits « froid », si possible à l'aval. En été, c'est le puits « froid » qui est utilisé comme puits de pompage et fournit le froid injecté pendant l'hiver pour rafraîchir les bâtiments et l'eau chaude est réinjectée dans le puits « chaud ». Un stock thermique est ainsi constitué dans le sous-sol. Un équilibre thermique annuel doit être atteint pour que le l'installation fonctionne correctement. Ceci permet une recharge des terrains et de la nappe et une exploitation durable à long terme de l'installation. Par contre, une telle utilisation nécessite un dimensionnement des puits pour qu'ils puissent être utilisés à la fois comme puits de pompage et comme puits d'injection. Dans la suite du chapitre, ce type d'installation a été appelée « doublet réversible ».

Un document très complet sous forme d'un guide technique sur le thème des installations de pompes à chaleur sur aquifères a été publié au début de 2008 par les éditions du BRGM (Lemale & Gourmez, 2008). Il est orienté sur le principe des pompes à chaleur et le fonctionnement général de ce type d'installations, les caractéristiques des aquifères superficiels, la mise en œuvre d'une installation PAC sur aquifère et finalement la maintenance, les aspects économiques et de l'environnement, ainsi que le montage administratif, qui concerne évidemment les conditions en France.

Dimensionnement des installations

Selon les régions, les nappes phréatiques représentent une ressource localisée et dont l'exploitation dépend énormément des caractéristiques hydrogéologiques, comme le gradient hydraulique et la perméabilité. Une expertise hydrogéologique indispensable lors de la réalisation d'une exploitation de la chaleur des nappes et l'exécution d'au moins deux puits, rendent l'investissement de départ plus important que pour une SGV. Pour cette raison et parce que la ressource est locale, ces systèmes sont installés moins fréquemment que les SGV et souvent pour de grandes constructions ou des groupes de bâtiments.

Le débit d'eau à prélever de l'aquifère dépend de la puissance thermique extraite de l'aquifère (P_{eau}), de la différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie de la PAC (ΔT) et de la capacité calorifique volumique de l'eau ($C_{V(eau)}$), selon la formule ci-dessous :

$$Q = \frac{P_{eau}}{\Delta T \cdot C_{V(eau)}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le débit dépend linéairement de la puissance thermique extraite de l'aquifère. Dans le cas de l'exploitation de chaleur des nappes, le débit est en général calculé à partir d'un ΔT de 4 °C.

Le dimensionnement de l'installation doit être adapté afin de ne pas causer un rabattement trop élevé au puits. Si la perméabilité de l'aquifère est trop faible, il peut être nécessaire d'installer plusieurs puits afin de diminuer le rabattement. Ceci permet également de diminuer la vitesse de circulation dans le puits et d'éviter une trop grande turbidité de l'eau ou un apport trop important d'eau froide depuis la surface, à partir d'une rivière ou d'un lac qui serait situé à proximité de l'installation.

Le puits de réinjection doit se trouver à une distance suffisante du puits de pompage afin qu'il n'y ait pas d'interactions entre les deux. Lors d'une utilisation en doublet réversible, il faut augmenter la distance assez grande entre les puits afin d'éviter un percement thermique, c'est-à-dire que le stock de chaud formé à l'amont atteigne le stock de froid constitué à l'aval. Dans ce cas, la distance minimale nécessaire se calcule à partir de la vitesse réelle de l'eau souterraine (V , en m/s).

$$V = \frac{K \cdot i}{\varphi} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

où K est la perméabilité du milieu [m/s], i est le gradient hydraulique de la nappe et φ la porosité du milieu. Le front du panache thermique se déplace plus lentement que l'eau souterraine, sa vitesse (V_{th} , en m/s) est diminuée d'un facteur R , appelé retard thermique :

$$V_{th} = \frac{V}{R} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Le retard thermique dépend de la porosité du milieu, φ et des capacités calorifiques de l'eau et de l'aquifère ($C_{V(eau)}$ et $C_{V(sol)}$ en MJ/m³/kg) :

$$R = 1 + \frac{C_{V(sol)}}{C_{V(eau)}} \cdot \frac{(1 - \varphi)}{\varphi} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

La valeur du retard thermique est en général comprise entre 2 et 5 pour des aquifères à porosité d'interstices.

Les doublets réversibles sont en général installés lorsque l'écoulement ou la perméabilité de l'aquifère sont trop faibles pour permettre une utilisation simple. Dans ce cas, en plus de la vitesse de l'eau souterraine, l'épaisseur de la couche de couverture a une influence sur le rendement thermique du système. Si elle est épaisse, elle forme une bonne isolation avec l'air ambiant, ce qui augmente la capacité de stockage du sous-sol (Courtois et al. 2007).

Les installations d'exploitation de chaleur des nappes phréatiques refroidissent localement moins le terrain que les sondes géothermiques verticales, puisque leur influence est évacuée au fur et à mesure par l'écoulement d'eau souterraine. Il s'agit dans ce cas d'atteindre un équilibre annuel entre le prélèvement de chaleur et le renouvellement, principalement dans le cas d'un stockage de chaleur et d'une utilisation en doublet réversible.

Risques environnementaux

Il existe un risque de pollution de l'aquifère, puisqu'il faut réaliser des forages et que l'eau souterraine est utilisée directement puis rejetée dans la nappe. Par conséquent, ces installations sont interdites en zones de protection S1, S2 et S3, ainsi que dans les périmètres de protection des eaux

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

souterraines. Partout ailleurs, la température de la nappe ne doit pas être globalement modifiée de plus de 3 °C à 100 m de l'installation (OFEV, 2004). Cette limite de variation doit tenir compte de toutes les autres installations qui se trouvent à proximité, c'est pourquoi il est très important d'avoir une gestion globale des systèmes d'exploitation de l'eau souterraine.

Suivant la qualité de l'eau, il peut arriver que des minéraux précipitent lorsque l'eau se trouve en contact avec l'air ambiant. Dans ce cas, il peut être nécessaire de faire circuler l'eau en circuit fermé. Si l'eau est chargée en particules fines, il est également possible de placer un filtre à la sortie des puits de pompage afin de retenir le maximum de particules et d'éviter ainsi d'encrasser les conduites et l'échangeur de chaleur, ou de colmater localement l'aquifère lors de la réinjection.

4.3.2 Méthodes d'évaluation du potentiel d'exploitation thermique des nappes phréatiques

Simulations

L'objectif du chapitre est d'évaluer les ressources en chaleur des nappes phréatiques du canton de Neuchâtel. Les méthodes utilisées dans ce chapitre sont assez différentes de celles utilisées pour les sondes géothermiques verticales. Effectivement, dans le cas des nappes phréatiques, la ressource est localisée en quelques endroits particuliers, au contraire des SGV pour lesquelles la ressource est théoriquement disponible partout.

Par conséquent, l'étude a tout d'abord été ciblée sur la nappe du delta de l'Areuse et la nappe du Val-de-Travers. Il s'agit des nappes peu profondes les plus importantes du canton de Neuchâtel, qui ne sont pas recouvertes sur toute leur surface par des zones de protection des eaux. Une synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de ces nappes a été réalisée. Ces caractéristiques ont été utilisées pour exécuter des simulations avec le logiciel GED et pour mettre en évidence les possibilités d'exploitation globale possibles de ces nappes à l'aide d'un ou de plusieurs groupes de puits. Les résultats obtenus pour ces deux aquifères ont permis de mettre en évidence les caractéristiques hydrogéologiques des milieux qui avaient le plus d'influence sur l'exploitation thermique. Sur cette base, une synthèse des possibilités d'exploitation en fonction des caractéristiques hydrogéologiques a été réalisée.

Description du logiciel utilisé

Les simulations de ce chapitre ont été réalisées à l'aide de la version 1.0 (2006) du logiciel Groundwater Energy Designer (GED) qui a été développé par l'entreprise Colenco Power Engineering avec le soutien de l'Office fédéral de l'énergie (Colenco Power Engineering, 2006). Ce logiciel reprend les principes utilisés par des logiciels de simulation d'écoulements plus complexes, tels que Feflow ou Tough2, mais les simplifie à l'aide de solutions analytiques. Il a été développé pour pouvoir être utilisé rapidement par une large gamme d'utilisateurs, sur la base d'un minimum de données techniques et hydrogéologiques. Il permet ainsi d'effectuer des simulations rapides de cas simples, pouvant donner une bonne appréciation du type d'installation à prévoir et de son impact sur l'environnement lors d'un avant-projet d'implantation. La figure 4.3 schématise les données que le logiciel GED utilise lors d'une simulation.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

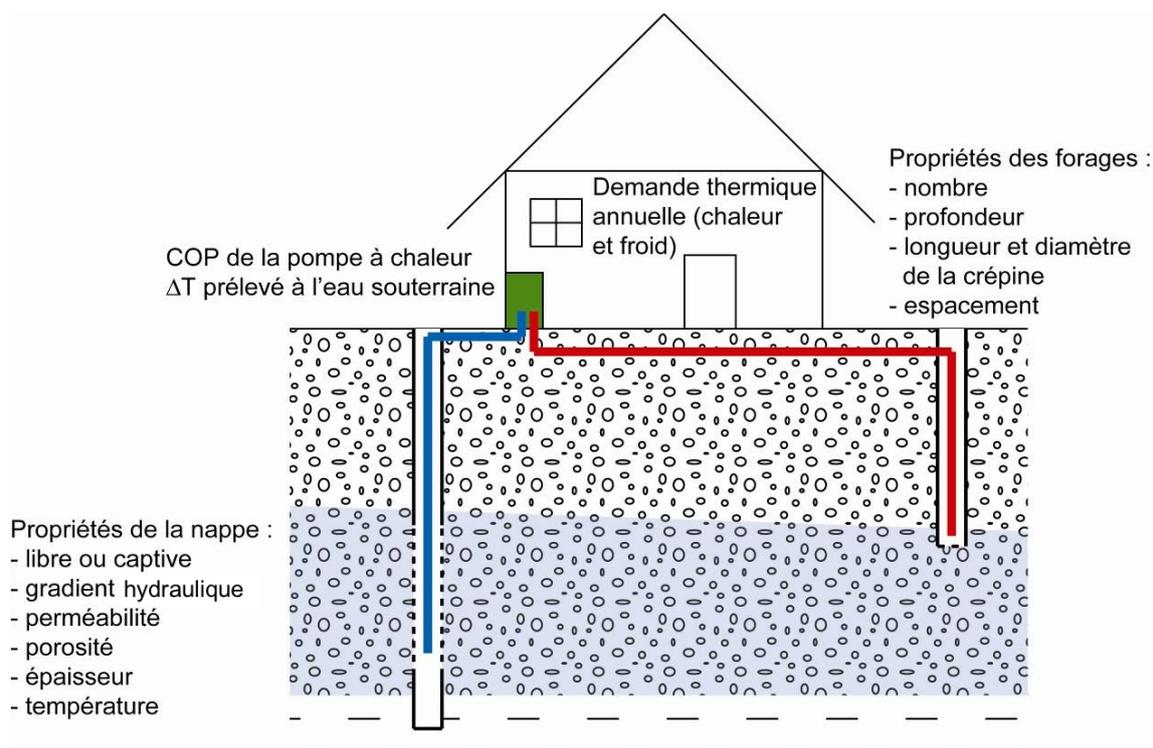


Figure 4.3. Paramètres pris en compte par le logiciel GED lors d'une simulation.

Le logiciel calcule la puissance thermique nécessaire de la PAC selon la demande thermique annuelle choisie par l'utilisateur, sur la base de 1800 heures de fonctionnement par an. A partir de la puissance thermique, il détermine le débit à soutirer de la nappe au moyen de l'équation 4.1. Sur la base des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, il fournit également une distance minimale à respecter entre le puits de pompage et celui d'injection et entre deux puits de pompage ou d'injection dans les cas où il y a plusieurs groupes de puits. Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère déterminent l'extension du panache thermique. La perméabilité détermine principalement sa taille, tandis que le gradient hydraulique a surtout une influence sur son extension dans le sens de l'écoulement.

L'utilisateur du logiciel a le choix de donner des valeurs pour la configuration de l'installation, comme le nombre et la profondeur des forages, la longueur et le diamètre de la zone crépinée. Il peut également laisser le logiciel optimiser ces valeurs selon les caractéristiques de l'aquifère. Le résultat de la simulation est donné sous forme d'un plan, comprenant les emplacements du ou des puits de pompage et de réinjection choisis par l'utilisateur et les isothermes des différences de températures par rapport à l'état initial de la nappe.

Lors d'une simulation avec GED, il faut tenir compte des limites du logiciel qui peuvent faire varier le résultat significativement par rapport au cas réel. En effet, GED se base sur des paramètres de l'aquifère homogènes et constants dans le temps et dans l'espace et ne tient pas compte de ses limites latérales, des recharges et des exutoires.

D'autre part, GED permet de prendre en compte une demande de rafraîchissement l'été. Dans ce cas, il calcule une demande thermique annuelle moyenne sur la base de la demande en chaud de l'hiver et de la demande en froid de l'été. Il ne permet par contre pas de simuler une utilisation des puits en doublet réversible. Le nombre maximal de puits accepté est de dix puits de pompage et dix puits de réinjection.

4.3.3 Présentation et interprétation des résultats

Cas particulier au canton de Neuchâtel : nappe de l'Areuse et nappe du Val-de-Travers

Nappe de l'Areuse

CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES

Les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de l'Areuse ont été synthétisées à partir des études de Mdaghri & Bouzelboudjen (1999) et de Pochon & Müller (1998).

Le delta de l'Areuse montre une succession de sédiments très hétérogènes, déposés par l'Areuse dans ses chenaux successifs et sur ses plaines d'inondation. Il est constitué de sable et de gravier sableux entrecoupés de lentilles limoneuses et argileuses. Les perméabilités varient fortement suivant les endroits, entre 10^{-2} et 10^{-6} m/s. A la base, l'aquifère est limité par une couche de moraine argilo-limoneuse peu perméable. La nappe de l'Areuse est globalement libre, mais peut avoir un caractère captif selon les endroits, lié à la présence des lentilles limoneuses (Fig. 4.4). L'épaisseur totale des graviers perméables augmente vers le lac et varie entre 10 et 40 m. La nappe est recouverte par une couche d'environ 2 m de terre végétale.

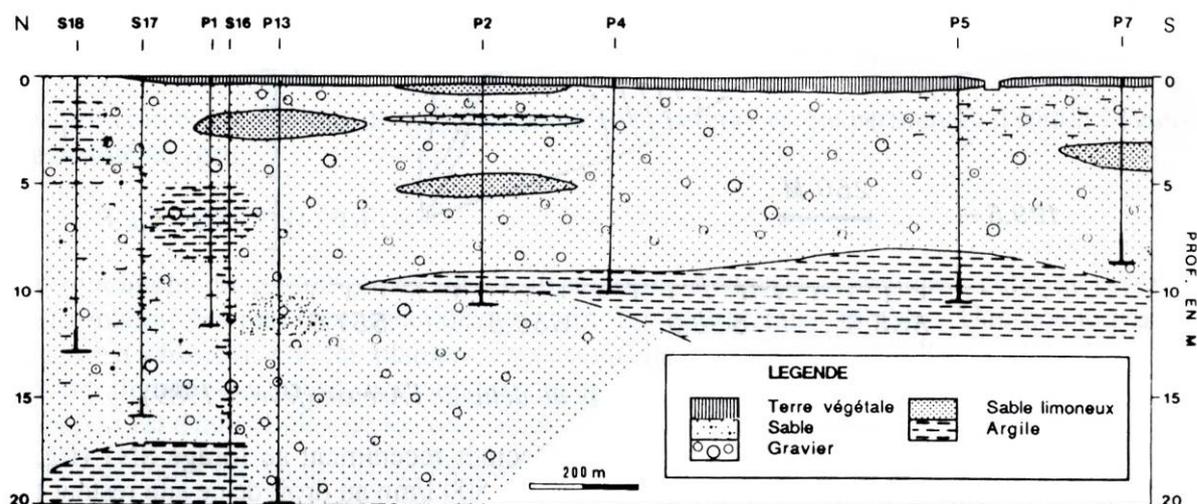


Figure 4.4. Coupe des sédiments de la plaine de l'Areuse (Mdaghri & Bouzelboudjen, 1999)

La recharge de l'aquifère s'effectue par les précipitations, mais également par le nord et le nord-ouest, depuis les dépôts fluvioglaciaires déposés lors de la glaciation du Würm. Une faible part de l'alimentation de l'aquifère provient de l'Areuse. Le lac constitue l'exutoire de la nappe, les eaux souterraines s'écoulent par conséquent vers l'est ou le sud-est. Le reste des limites de l'aquifère, constituées d'éboulis et de moraines, sont imperméables (Fig. 4.5).

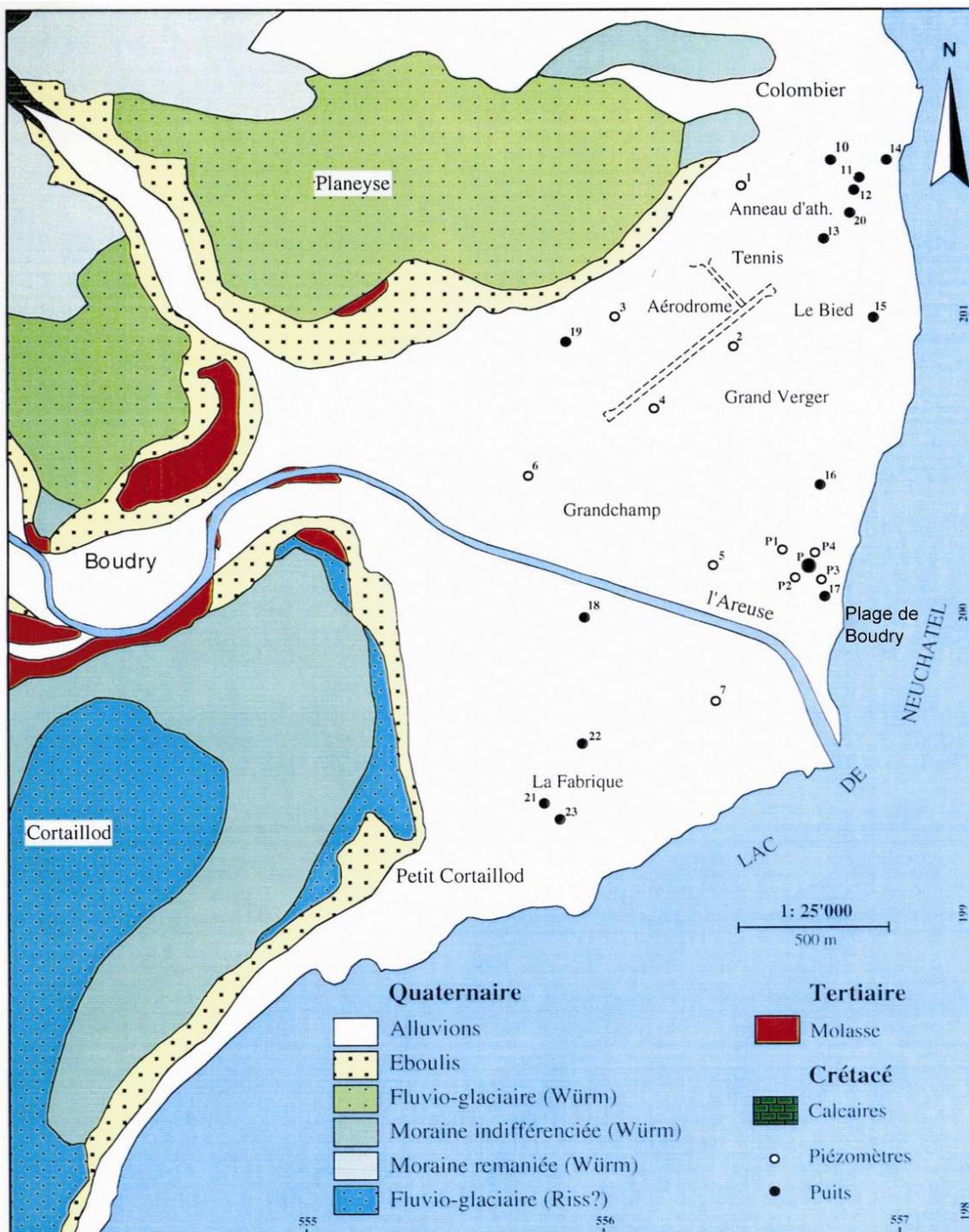


Figure 4.5. Géologie de la plaine de l'Areuse (Pochon & Müller, 1998).

En basses eaux, le niveau piézométrique de la nappe de l'Areuse se trouve entre 5 et 6 m en dessous de la surface du terrain et les gradients hydrauliques observés sont de l'ordre de 0.5 à 1 %. La température moyenne annuelle de l'eau est de l'ordre de 11 °C.

En surface, le delta de l'Areuse est occupé aux deux tiers par des parcelles agricoles. Le reste est réparti entre des zones industrielles, des zones habitables et de la forêt. Trois puits exploitent cette nappe pour l'alimentation en eau potable : dans la partie est, au puits P, au sud à « La Fabrique » et

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

au nord à proximité du point 13 (Fig. 4.5). Des zones de protection S1 à S3 s'étendent autour de ces points.

Plusieurs campagnes de mesures des résistivités apparentes ont été réalisées dans la plaine de l'Areuse, dans le but de mettre en évidence les zones les plus perméables. La figure 4.6 présente une synthèse de ces mesures. Entre 6 et 26 m, l'aquifère montre effectivement une forte variation des résistivités qui peuvent être très élevées (zones rouges, bonnes perméabilités) ou très faibles (zones bleues, faibles perméabilités). En dessous de 25 m de profondeur, le substrat argileux imperméable est rencontré presque partout, excepté au bord du lac, où les épaisseurs de sable et de gravier sont un peu plus importantes.

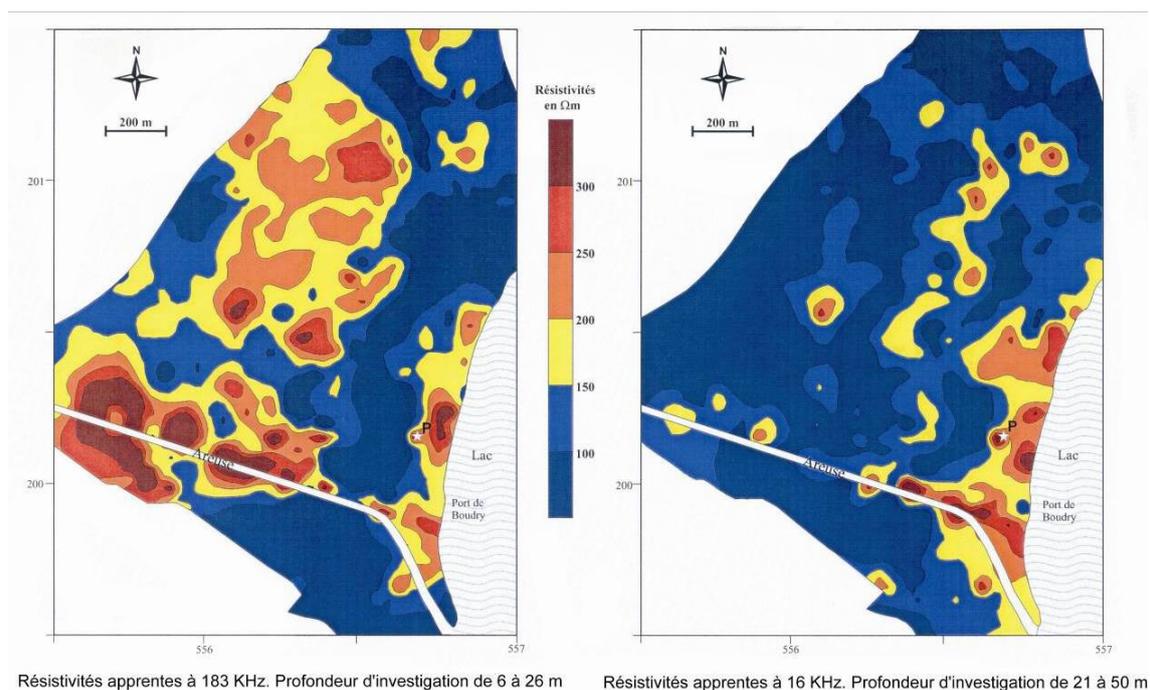


Figure 4.6. Cartes des résistivités apparentes dans la plaine de l'Areuse (Pochon & Müller, 1998).

Afin de schématiser les différentes conditions de perméabilité que l'on peut rencontrer dans la plaine de l'Areuse, l'aquifère a été séparé entre des zones à perméabilité élevée (10^{-3} m/s), moyenne (10^{-4} m/s) et faible (10^{-5} m/s), pour lesquelles le gradient hydraulique a également été varié entre 0.5 et 1 %. Le tableau 4.2 synthétise les paramètres utilisés pour les simulations.

Tableau 4.2. Synthèse des paramètres utilisés pour la simulation des possibilités d'exploitation de chaleur de la nappe de l'Areuse.

Paramètres	Valeur
Différence de temp. entre entrée et sortie de la PAC	4 °C
COP	5
Gradient hydraulique	0.5 à 1.0 %
Perméabilité	10^{-3} à 10^{-5} m/s
Température moyenne de la nappe	11 °C
Profondeur d'eau souterraine (basses eaux)	5 m
Profondeur du mur de l'aquifère	20 m
Durée d'exploitation	30 ans

RESULTATS

1. Zones à faible perméabilité (10^{-5} m/s) et faibles résistivités apparentes (50 à 150 kHz).

A cause de la faible perméabilité, le rabattement induit au puits est rapidement très élevé. Dans le cas où le gradient est de 0.5 %, c'est le rabattement qui limite la puissance thermique maximale qui peut être fournie à l'aide d'un nombre puits de pompage donné. Elle varie entre 20 kW (débit moyen annuel de 12 l/min) s'il n'y a qu'un seul puits à 120 kW (débit moyen annuel de 71 l/min) pour cinq puits. La distance à respecter entre les puits de pompage et les puits d'injection est assez élevée dans ce cas, ce qui nécessite d'avoir beaucoup de place à disposition pour une installation (Fig. 4.7).

Dans le cas où le gradient est un peu plus élevé, de l'ordre de 1 %, la puissance maximale est limitée par l'extension du panache thermique. Il est possible d'exploiter environ 15 kW (débit moyen annuel de 9 l/min) avec un seul puits de pompage et 70 kW (débit moyen annuel de 41 l/min) avec cinq puits de pompage avant que la limite de variation de température autorisée de 3 °C n'atteigne 100 m. Dans le cas des cinq puits, ceux-ci doivent être séparés d'au moins 70 m, et une distance d'au minimum 90 m doit être respectée entre les puits d'injection et les puits de pompage.

Le potentiel d'exploitation est faible dans ces zones, limité soit par le rabattement aux puits soit par l'extension du panache thermique. De plus, à cause de la faible perméabilité, l'influence des puits se propage loin dans l'aquifère. La distance à respecter entre les puits est par conséquent élevée, ce qui nécessite d'avoir une grande surface à disposition pour une implantation. Si une installation simple n'est pas envisageable, un doublet réversible peut être installé dans ces zones à faibles perméabilités, les vitesses du front du panache thermique étant comprises entre environ 2 et 5 m/an.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

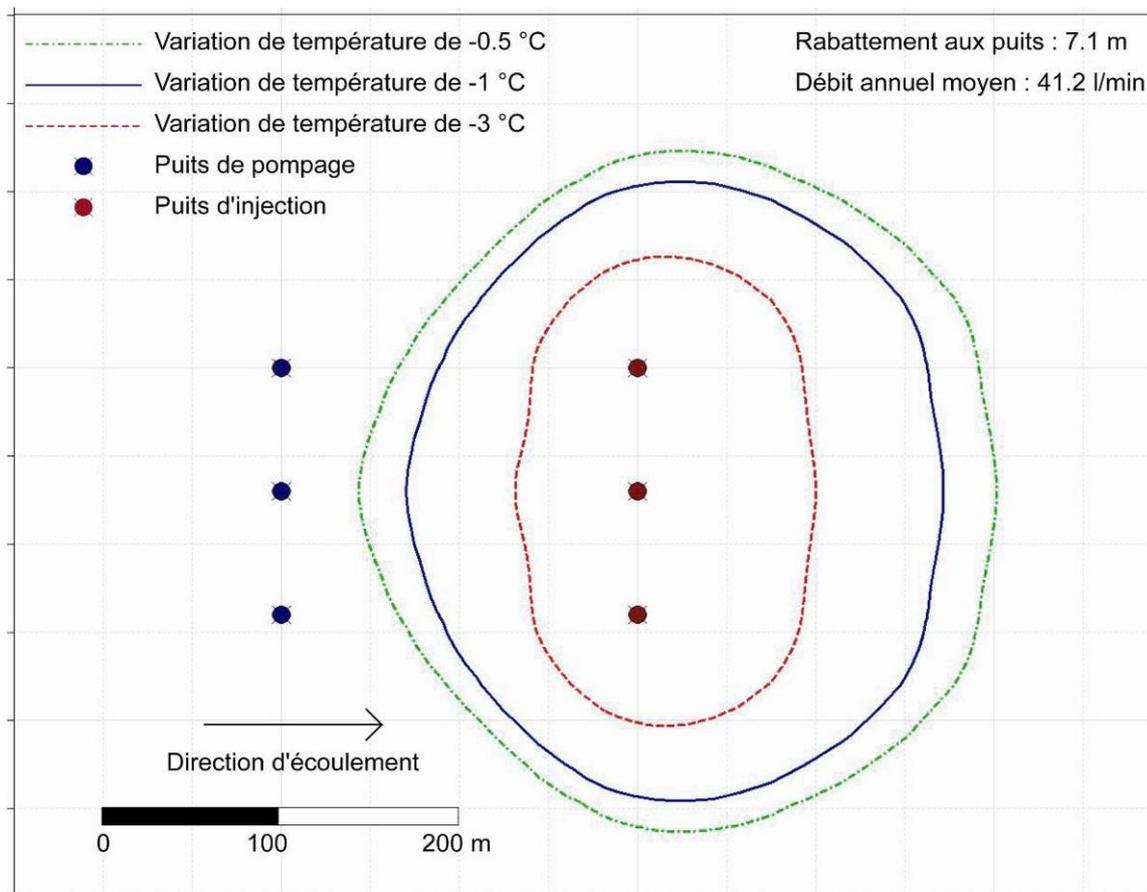


Figure 4.7. Isothermes de variation de température pour trois puits pompages fournissant une puissance thermique de 70 kW pendant 30 ans. La nappe phréatique a une perméabilité de 10^{-5} m/s et un gradient de 0.5 %.

2. Zones à perméabilité moyenne (10^{-4} m/s) et résistivités apparentes moyennes (150 à 250 kHz).

Le potentiel d'exploitation est meilleur que dans le cas précédent. La perméabilité étant plus élevée, le rabattement aux puits reste modéré. Par conséquent, c'est l'extension du panache thermique qui détermine la limite de chaleur exploitable avec un nombre de puits de pompage donné (Fig. 4.8). Si le gradient est élevé (1 %), il est possible d'exploiter entre 40 kW (débit moyen annuel de 24 l/min) avec un seul puits de pompage et 240 kW (débit moyen annuel de 142 l/min) avec cinq puits de pompages séparés de 70 m. Dans ce cas, la distance à respecter entre les puits de pompage et les puits d'injection est d'environ 100 m. Si le gradient est plus faible (0.5 %), la puissance exploitable est comprise entre 25 kW (débit moyen annuel de 15 l/min) pour un seul puits de pompage et 145 kW (débit moyen annuel de 85 l/min) pour cinq puits séparés de 70 m. La distance entre les puits de pompage et les puits de restitution doit être de 50 m environ.

Ces zones ont un bon potentiel d'exploitation. A cause des perméabilités moyennes, des doublets réversibles doivent parfois être installés pour parvenir à un équilibre thermique. Les vitesses de déplacement du front du panache thermique sont comprises entre environ 20 et 50 m/an.

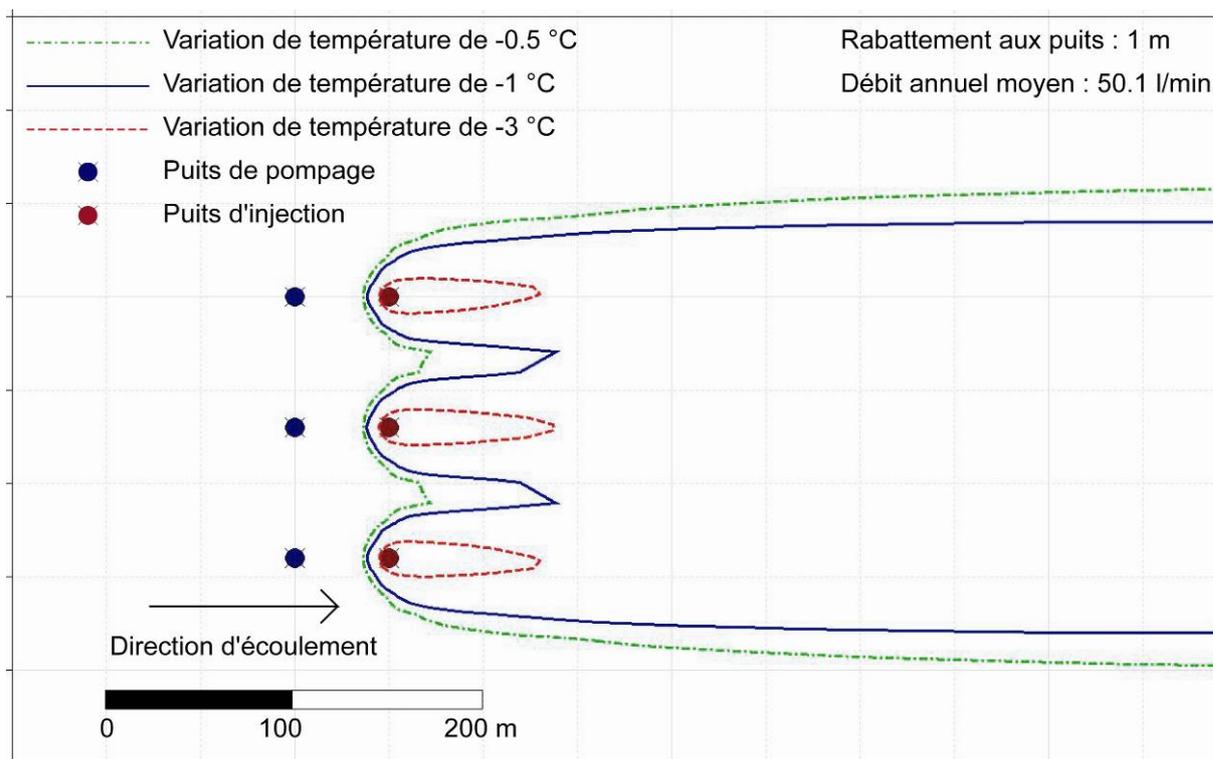


Figure 4.8. Isothermes de variation de température pour trois puits de pompage fournissant une puissance thermique de 85 kW pendant 30 ans. La perméabilité de la nappe phréatique est de 10^{-4} m/s et son gradient de 0.5 %.

3. Zones à perméabilités élevées (10^{-3} m/s) et fortes résistivités apparentes (250 à 350 kHz).

Dans ces zones, les possibilités d'exploitation ne sont pas limitées par le rabattement induit aux puits et pratiquement pas par l'extension du panache thermique (Fig. 4.9). Si le gradient est élevé (1 %), il est possible d'exploiter plus de 250 kW (débit moyen annuel de 147 l/min) avec un seul puits de pompage. Lorsque le gradient est un peu plus faible (0.5 %), un puits de pompage permet d'exploiter jusqu'à 115 kW (débit moyen annuel de 68 l/min) avant que la variation de 3 °C n'atteigne 100 m. Dans ce cas, deux puits de pompage permettent d'exploiter jusqu'à plus de 250 kW (débit annuel moyen de 147 l/min).

Ces zones sont très adaptées pour alimenter des grandes exploitations, il n'est en général pas nécessaire et inutile d'y installer des doublets réversibles. Les vitesses du front du panache thermique sont élevées, comprises entre environ 200 et 500 m/an et les stocks thermiques sont trop rapidement évacués par le flux.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

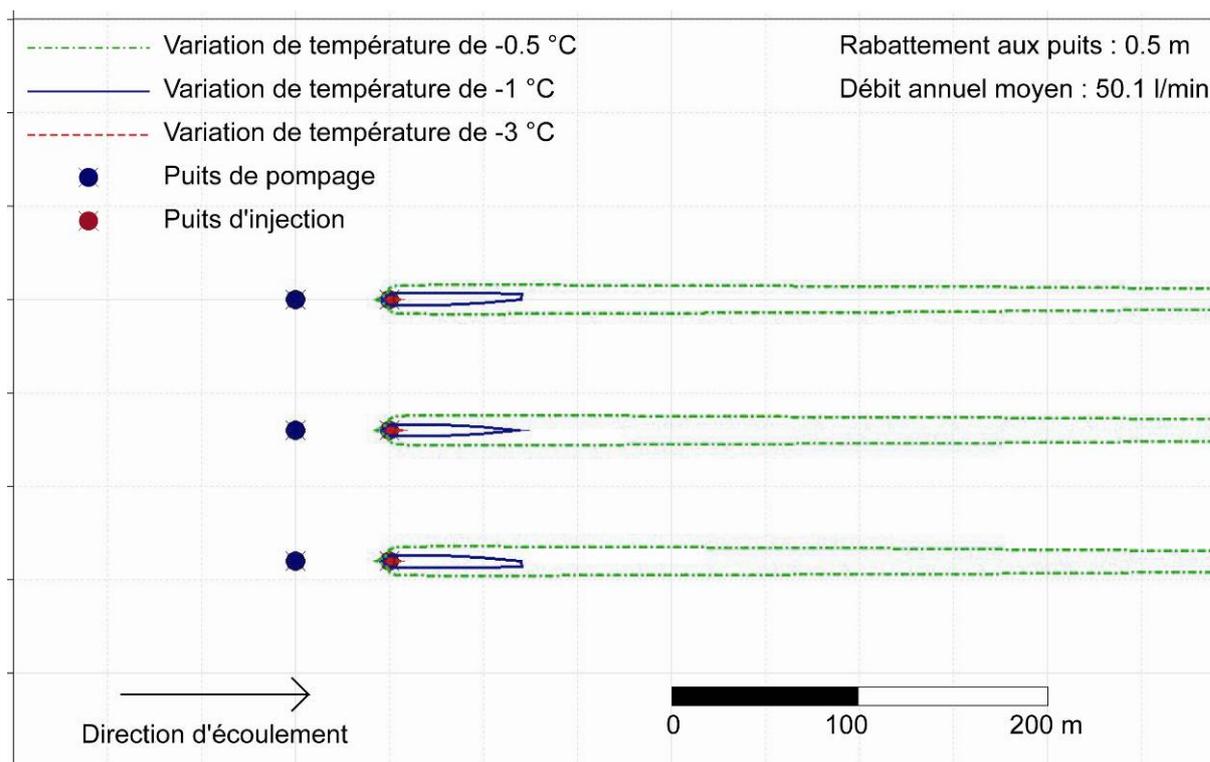


Figure 4.9. Isothermes de variation de température pour trois puits de pompage fournissant une puissance thermique de 85 kW pendant 30 ans. La perméabilité de la nappe phréatique est de 10^{-3} m/s et son gradient de 0.5 %.

SYNTHESE

La nappe du delta de l'Areuse offre un bon potentiel d'exploitation thermique, là où les perméabilités sont moyennes à bonnes. Les zones où la perméabilité est moyenne (10^{-4} m/s) sont adaptées pour une utilisation en doublet réversible et la formation de stocks de chaleur lorsque l'utilisation simple n'est pas possible. La quantité de chaleur exploitable est limitée principalement par l'extension du panache thermique. Les zones où la perméabilité est élevée (10^{-3} m/s) permettent d'exploiter une grande quantité de chaleur sans impact significatif sur la température de la nappe. Les installations en doublet réversible sont inutiles dans ces zones, parce que les stocks thermiques sont trop rapidement évacués par le flux d'eau souterraine. En revanche, dans les zones où la perméabilité est faible (10^{-5} m/s) le potentiel d'exploitation est très vite limité par le rabattement au puits et par l'extension du panache thermique. Ces installations ne sont pas très rentables, d'une part parce qu'elles nécessitent beaucoup d'espace étant donné que la distance à respecter entre le captage et le rejet est grande et d'autre part parce qu'elles fournissent peu de chaleur.

Trois puits exploitent la nappe de l'Areuse pour l'alimentation en eau potable. D'une part, les zones de protection des eaux de ces captages recouvrent une partie de la surface de l'aquifère et d'autre part, la majorité de la surface est occupée par des parcelles agricoles et de la forêt. Il y a peu de bâtiments sur place susceptibles d'avoir besoin de la ressource thermique de la nappe de l'Areuse. Cet aquifère serait par conséquent particulièrement adapté à l'implantation d'une grande installation dans une des zones plus productives (perméabilité de 10^{-3} ou 10^{-4} m/s), qui pourrait être reliée à un réseau de chauffage à distance permettant d'alimenter plusieurs bâtiments.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Ces simulations ont été réalisées en prenant en compte une exploitation de la nappe pour le prélèvement de chaleur uniquement, ce qui constitue le cas d'exploitation le plus défavorable lors d'une utilisation simple des puits, sans doublet réversible. Le prélèvement du froid de la nappe en été permet de diminuer la taille du panache thermique. Dans ce cas, le logiciel calcule un nouveau besoin d'énergie annuel, en pondérant la demande en chaud par la demande en froid. Ceci est mis en évidence par la figure 4.10, qui montre les isothermes de variation de température d'une installation semblable à celle de la figure 4.8, mais avec une demande en froid l'été équivalente à la moitié de la demande thermique en chaud annuelle.

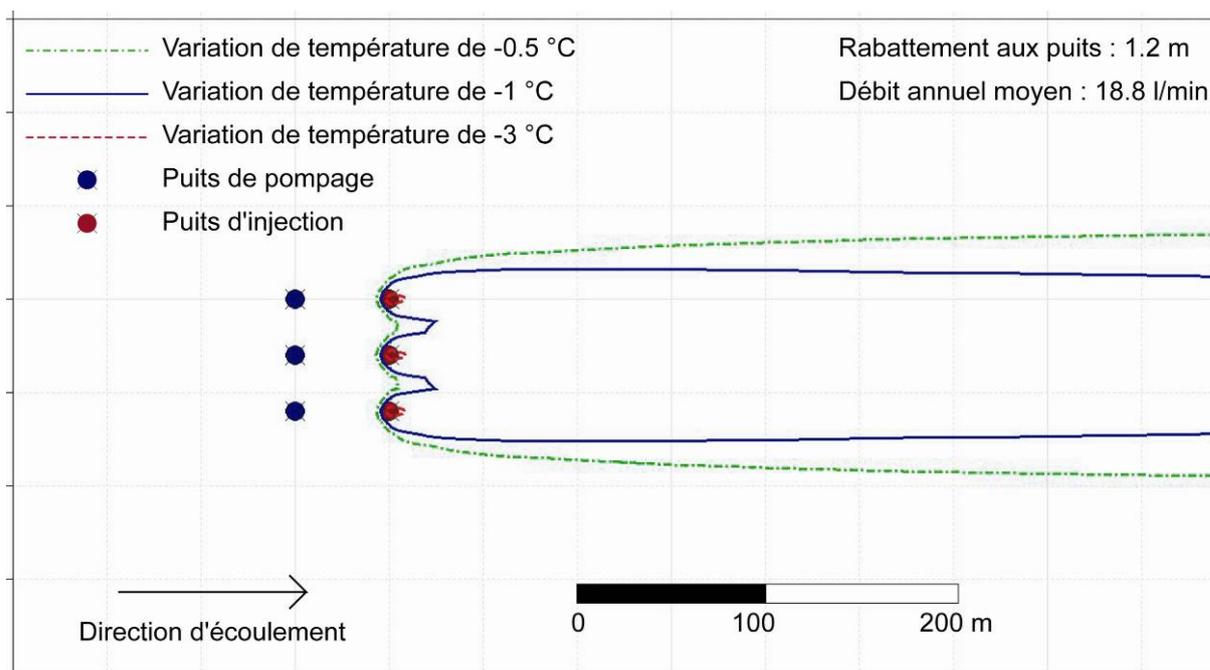


Figure 4.10. Isothermes de variation de température pour trois puits de pompage fournissant une puissance thermique de 85 kW pendant 30 ans (153'000 kWh/an) de chaleur et la moitié de froid (76'500 kWh/an). La perméabilité de la nappe est de 10^{-4} m/s et son gradient de 0.5 %.

Nappe du Val-de-Travers

CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES

Les caractéristiques de la nappe du Val-de-Travers ont été synthétisées à partir des travaux de Cornaz (1995) et de Badertscher (2001).

L'aquifère du Val-de-Travers est constitué de dépôts alluviaux graveleux et sableux déposés par deux rivières, Le Buttes et l'Areuse. Ces sédiments de bonne perméabilité ($5 \cdot 10^{-3}$ m/s) reposent sur des limons lacustres imperméables et contiennent une nappe libre, d'une profondeur de l'ordre de 8 m en moyenne. Les bords de l'aquifère sont limités par des calcaires au nord et par de la molasse peu perméable au sud.

Les recharges de l'aquifère s'effectuent par les précipitations, mais également par les exutoires karstiques qui se situent sur les flancs de la vallée. Une faible alimentation provient des rivières de l'Areuse et de la Vieille-Areuse, tandis que les contacts avec la Molasse sont imperméables. Les eaux s'écoulent en direction de l'est suivant un gradient hydraulique de 0.5 %, vers un aquifère à plus faible perméabilité. Le débit de la nappe diminue vers l'est à cause de nombreux drainages et des puits d'exploitation pour l'alimentation en eau potable de la commune de Fleurier.

La surface de la nappe est recouverte en partie de parcelles agricoles à l'est, et par le village de Fleurier à l'ouest. Des zones de protection des eaux s'étendent au nord-est de la nappe. Le tableau 4.3 synthétise les paramètres utilisés pour les simulations.

Tableau 4.3. Synthèse des paramètres utilisés pour la simulation des possibilités d'exploitation de chaleur de la nappe du Val-de-Travers.

Paramètres	Valeur
Différence de temp. entre entrée et sortie de la PAC	4 °C
COP	5
Gradient hydraulique	0.5 %
Perméabilité	$5 \cdot 10^{-3}$ m/s
Température de la nappe	10 °C
Niveau d'eau souterraine (basses eaux)	2 m
Profondeur du mur de l'aquifère	8 m
Durée d'exploitation	30 ans

RESULTATS

Les caractéristiques de la nappe du Val-de-Travers sont semblables à celles des zones productives de la nappe de l'Areuse, si ce n'est qu'elle est nettement moins profonde. Les bonnes perméabilités permettent de pomper de grands débits, sans que le rabattement au puits soit trop important. L'épaisseur de l'aquifère ne constitue donc pas une limite à l'exploitation dans ce cas. De plus, le panache thermique est rapidement évacué par l'écoulement d'eau souterraine, ce qui permet de prélever beaucoup de chaleur sans avoir un impact sur la température de la nappe. Une puissance élevée, supérieure à 250 kW (débit moyen annuel de 147 l/min) peut être prélevée en théorie à l'aide d'un seul puits de pompage, sans que la variation de température de 3 °C atteigne 100 m ou que le rabattement au puits soit trop important.

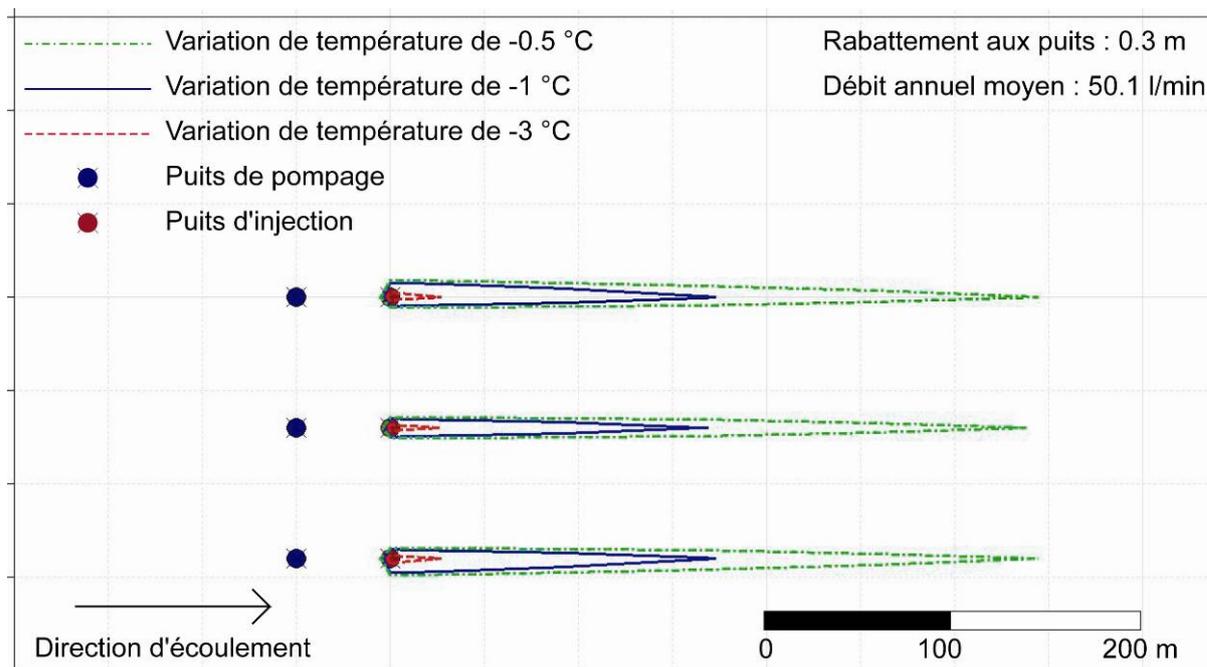


Figure 4.11. Isothermes de variation de température pour trois groupes de puits fournissant une puissance thermique de 85 kW pendant 30 ans. La perméabilité de la nappe phréatique est de $5 \cdot 10^{-3}$ m/s et son gradient de 0.5 %

Cette nappe peut fournir suffisamment d'énergie pour alimenter une grande installation. Par conséquent, il est inutile d'y installer un doublet réversible d'autant plus que la vitesse du front du panache thermique est supérieure à 1000 m/an. D'autre part, sa situation géographique est intéressante puisqu'elle est en partie recouverte par le village de Fleurier et se trouve ainsi à proximité des besoins en énergie thermique.

EXEMPLE D'EXPLOITATION DE LA CHALEUR DES NAPPES PHREATIQUES AU VAL-DE-TRAVERS

Le nouveau dépôt des Transports Régionaux Neuchâtelois (TRN) a été construit en 2003 à l'ouest du village de Fleurier. Il contient un dépôt principal, un atelier de quatre voies dont une prévue pour la réparation et une pour le lavage des trains ainsi que des locaux annexes (atelier, soudure, entrée, vestiaires, bureaux, cafétéria et WC). Le tout constitue un bâtiment de 31'000 m³ SIA, avec une surface de planchers de 4'500 m² et une emprise au sol de 3'350 m². Le dépôt principal est chauffé à une température de 10 °C, l'atelier à 16 °C par un système de chauffage au sol et d'aérothermes et les locaux à 20 °C, par chauffage au sol uniquement. Les besoins thermiques annuels sont estimés à 105'000 kWh/an.

L'énergie thermique de chauffage est fournie en partie par une pompe à chaleur, alimentée en énergie électrique par un moteur de couplage chaleur force (CCF) au gaz naturel. La PAC fournit 52 kW thermiques dont 38 environ proviennent de la nappe phréatique. Le moteur CCF fournit également une partie de l'énergie thermique nécessaire. Le complément thermique est assuré par une chaudière à condensation à gaz, qui peut également assurer la totalité de la demande thermique en cas de panne. Le système est couplé à un accumulateur tampon de chaleur de 1500 litres qui permet d'espacer les enclenchements et les déclenchements du système. L'eau chaude sanitaire est produite à l'aide d'un boiler fonctionnant avec une pompe à chaleur air-eau indépendante.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Cette solution de chauffage et de production d'eau chaude permet d'économiser la moitié du carburant qui serait consommé par une chaudière standard, pour répondre aux mêmes besoins thermiques.

L'eau de la nappe phréatique est utilisée pour alimenter la PAC, mais également pour le lavage des trains et pour les WC. Le débit nécessaire maximal est de 170 l/min qui sont transmis et refroidis par la PAC et de 150 l/min qui sont utilisés directement pour le lavage et les WC, ce qui constitue un maximum de 320 l/min d'eau nécessaire. Trois puits de pompage de 7 à 9 m de profondeur ont été installés dans la nappe, au nord du dépôt. Ces puits sont crépinés sur une hauteur de 3, 2.7 et 1.8 m respectivement. Le fait d'avoir trois puits permet de diminuer la vitesse de l'eau à l'entrée des crépines et ainsi de limiter l'apport de particules fines (limon et sable). Un filtre a été installé à la sortie des puits, pour retenir le reste de particules fines et les hydroxydes de fer présents dans l'eau de la nappe et souvent liés aux particules fines. La perméabilité moyenne observée aux puits est de l'ordre de $3.5 \cdot 10^{-3}$ m/s. L'eau utilisée pour alimenter la PAC est rejetée après refroidissement avec les eaux pluviales dans un puits perdu à 100 m à l'aval de l'installation. Les eaux usées des WC et du lavage des trains sont acheminées vers la canalisation communale et traitées à la STEP.

Cette installation a été simulée avec le logiciel GED pour estimer son impact thermique sur la nappe phréatique. Les paramètres utilisés sont détaillés dans le tableau 4.4.

La demande thermique annuelle prise en considération lors de la simulation correspond à celle qui est fournie uniquement par la pompe à chaleur. La demande thermique annuelle du projet est plus élevée et est complétée à l'aide de la chaleur fournie par le CCF et la chaudière d'appoint.

Le diamètre des puits et le rabattement sont des paramètres calculés directement par GED. C'est pour cette raison qu'ils diffèrent entre la simulation et le cas réel. Pour la perméabilité, le niveau piézométrique, la profondeur des puits, la longueur de la crépine et la température de la nappe, le logiciel GED demande une valeur unique. Une moyenne des valeurs obtenues dans le cas réel a été effectuée pour obtenir la valeur de la simulation. Par défaut, le logiciel prévoit autant de puits de réinjection que de puits de pompage. Dans ce cas, les trois puits de réinjection ont été espacés d'un mètre pour que la situation soit la plus proche possible de la réalité où il n'y en a qu'un.

Les figures 4.12 et 4.13 montrent l'extension du panache thermique créé par l'installation du dépôt des TRN, simulée par GED sur la base des données du tableau 4.3 et pour une durée d'exploitation de respectivement 10 et 30 ans.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Tableau 4.4. Paramètres utilisés pour la simulation de l'installation d'exploitation thermique de la nappe pour le dépôt des TRN à Fleurier.

Paramètres	Valeurs considérées ou choisies par GED	Données du projet
Demande thermique annuelle [kWh/an]	93'600 (PAC)	105'000 (totale)
Puissance de la PAC [kW]	52	
Température prélevée à l'eau de la nappe [°C]	3	
COP de la PAC	4	
Débit maximal prélevé pour la PAC [l/min]	186	170
Débit moyen annuel prélevé pour la PAC [l/min]	38	-
Gradient hydraulique [%]	0.5	-
Perméabilité [10^{-3} m/s]	3.5	4.48, 4.35 et 1.8
Porosité [%]	15	-
Niveau piézométrique [m]	1.7	1.95, 1.6 et 1.56
Base de la nappe [m]	7.7	7.90, 7.65
Nombre de puits de pompage	3	
Nombre de puits de réinjection	3	1
Distance entre puits de pompage [m]	7	
Distance entre la production et la restitution [m]	100	
Profondeur des puits [m]	8.5	9, 9 et 7
Longueur de la crépine [m]	2.5	3, 2.7 et 1.8
Diamètre de la crépine [mm]	155	
Diamètre des puits [mm]	388	225
Rabattement estimé par puits [m]	0.4	0.12
Température de la nappe [°C]	9	7 à 11

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

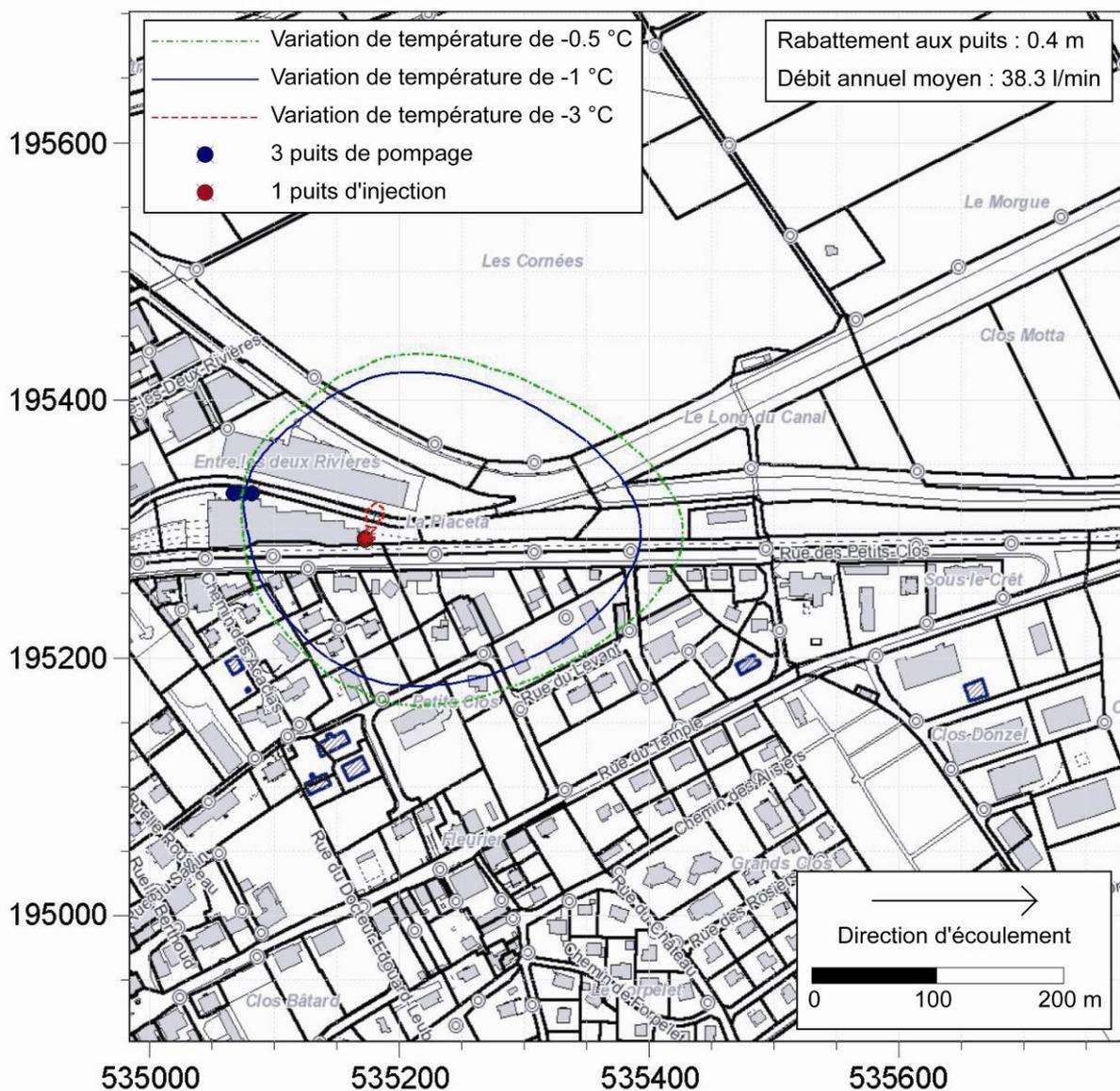


Figure 4.12. Résultat de la simulation avec GED de l'exploitation de chaleur de la nappe phréatique pour le dépôt des TRN à Fleurier, pour une période d'exploitation de 10 ans.

Cette simulation ne tient pas compte de la présence des deux rivières (Le Fleurier et l'Areuse), ni des limites latérales de l'aquifère, qui influencent les écoulements d'eau souterraine et la forme du panache thermique. Il s'agit d'une simulation donnant une bonne idée globale de la situation, mais qui diffère probablement un peu du cas réel d'exploitation. Il est vraisemblable que l'extension du panache thermique soit plus réduite dans la réalité que dans le modèle.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

aquifères peu profonds du canton, l'épaisseur peut varier entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres, tandis que le gradient hydraulique est plus constant et se situe généralement entre 0.5 et 1 %.

Plusieurs cas généraux ont été simulés en faisant varier ces trois paramètres de la manière suivante :

- perméabilité de 10^{-3} , 10^{-4} et 10^{-5} m/s ;
- épaisseur de 5, 10 et 15 m ;
- gradient hydraulique de 0.5 et 1 %.

Pour chacun de ces cas, des installations de 50, 100 et 200 kW ont été simulées, sur une période de 30 ans. Leur emprise a été estimée en mesurant la distance latérale et longitudinale à laquelle la différence de température de l'eau par rapport à l'état initial est inférieure à 1°C, depuis le ou les puits de réinjection de l'eau. L'exploitation a été jugée impossible lorsque plus de 5 puits sont nécessaires pour éviter que la zone, où la différence de température est supérieure à 3°C par rapport à l'état, ne dépasse 100 m. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.5.

Il s'agit d'une estimation très générale des possibilités d'exploitation des nappes phréatiques du canton de Neuchâtel, puisqu'elle ne tient pas compte des limites de l'aquifère, ni des recharges par les précipitations ou par d'autres formations géologiques. De plus, cette estimation est basée sur une utilisation de l'installation pour le chauffage uniquement, ce qui ne constitue pas le cas le plus favorable.

Ce tableau met en évidence la grande influence de la perméabilité sur les possibilités d'exploitation thermique d'une nappe phréatique. Si la perméabilité est suffisamment élevée (10^{-3} m/s), il est toujours possible d'exploiter beaucoup d'énergie. Plusieurs puits de pompage sont parfois nécessaires lorsque l'épaisseur de l'aquifère ou son gradient hydrauliques sont faibles. L'influence de l'installation est particulièrement perceptible à l'aval, mais très peu latéralement.

Lorsque la perméabilité est moyenne (10^{-4} m/s), de grandes quantités d'énergie sont encore exploitables. Dans ce cas, l'épaisseur et le gradient hydraulique ont plus d'influence et peuvent limiter les possibilités d'exploitation s'ils sont trop faibles. Il est important de noter que dans ce cas, le potentiel est sous-estimé, puisque les simulations tiennent compte d'une utilisation pour le chauffage uniquement. Des quantités plus importantes d'énergie peuvent être exploitées dans ces gammes de perméabilité si une utilisation estivale de la nappe phréatique ou un stockage thermique par une utilisation en doublet réversible sont réalisés. L'influence des installations s'étend surtout vers l'aval, mais également latéralement.

Lorsque la perméabilité est faible (10^{-5} m/s), les possibilités d'exploitation sont très limitées, à cause du rabattement induit aux puits de pompage et de l'extension du panache thermique. Il n'est souvent pas possible de prélever de grandes quantités d'énergie du sous-sol et la surface d'influence est en général assez importante.

Tableau 4.5. Surface d'emprise d'une installation d'exploitation de la chaleur de la nappe phréatique, en fonction de la perméabilité, de l'épaisseur et du gradient hydraulique de l'aquifère, ainsi que de la puissance thermique installée.

Pth [kW]	E [m]	Nb	D P-I [m]	D P-P [m]	DLong [m]	DLat [m]	S [m ²]	Pth/S [W/m ²]
Perméabilité de 10⁻³ m/s, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique ~ 1000 m/an								
50	5	2	20	10	5000	40	200'000	0.25
	10	1	20	-	1200	20	24'000	2.08
	15	1	20	-	500	15	7500	6.67
100	5	3	20	20	8500	80	680'000	0.15
	10	2	20	20	4200	45	189'000	0.53
	15	1	20	-	2000	30	60'000	1.67
200	5	4	20	25	10000	145	1'450'000	0.14
	10	3	20	25	8500	80	680'000	0.29
	15	2	20	25	7000	55	385'000	0.52
Perméabilité de 10⁻³ m/s, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique ~ 2000 m/an								
50	5	1	20	-	2100	20	42'000	1.19
	10	1	20	-	490	11	5390	9.28
	15	1	20	-	115	6	690	72.46
100	5	2	20	10	9000	40	360'000	0.28
	10	1	20	-	2100	20	42'000	2.38
	15	1	20	-	900	14	12'600	7.94
200	5	3	20	25	17000	80	1'360'000	0.15
	10	2	20	20	8500	45	382'500	0.52
	15	1	20	-	3900	24	93'600	2.14
Perméabilité de 10⁻⁴ m/s, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique ~ 100 m/an								
50	5	5	100	75	950	410	389'500	0.13
	10	4	50	30	1000	170	170'000	0.29
	15	3	50	25	950	120	114'000	0.44
100	5							
	10	5	100	75	950	410	389'500	0.26
	15	5	50	50	950	260	247'000	0.40
200	5							
	10							
	15							

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

P_{th}^* [kW]	E [m]	Nb	D P-I [m]	D P-P [m]	D _{Long} [m]	D _{Lat} [m]	S [m ²]	Pth/S [W/m ²]
Perméabilité de 10⁻⁴ m/s, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique ~ 200 m/an								
50	5	8	50	25	2000	170	340'000	0.15
	10	3	50	25	1800	100	180'000	0.28
	15	2	50	25	1600	65	104'000	0.48
100	5							
	10	4	50	30	2000	170	340'000	0.29
	15	3	50	25	1900	120	228'000	0.44
200	5							
	10							
	15	5	50	50	1900	270	513'000	0.39
Perméabilité de 10⁻⁵ m/s, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique ~ 10 m/an								
50	5							
	10							
	15	5	100	75	230	460	105'800	0.47
100	5							
	10							
	15	5	100	50	280	600	168'000	0.60
200	5							
	10							
	15							
Perméabilité de 10⁻⁵ m/s, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique ~ 20 m/an								
50	5							
	10							
	15	5	50	75	250	410	102'500	0.49
100	5							
	10							
	15							
200	5							
	10							
	15							

P_{th} : puissance thermique de la pompe à chaleur installée [kW]

E : épaisseur de l'aquifère [m]

Nb : nombre de doublets

D P – I : distance entre le puits de pompage et le puits de réinjection [m]

D P – P : distance entre deux doubles [m]

D_{Long} : distance longitudinale d'influence de l'installation [m]

D_{Lat} : distance latérale d'influence de l'installation [m]

S : surface d'influence de l'installation [m]

4.4 Synthèse et conclusions

Contrairement à la chaleur des roches du sous-sol qui est exploitable sur la quasi-totalité de la surface du canton, les réservoirs thermiques constitués par les nappes phréatiques de faible profondeur sont très localisés. Avant l'implantation d'une installation, la ressource doit faire l'objet d'une étude détaillée, afin d'estimer ses caractéristiques hydrogéologiques et thermiques qui permettront de déterminer si l'installation est envisageable et quelle est la meilleure configuration possible. Pour cette raison, l'investissement de départ est plus élevé que dans le cas des sondes géothermiques simples et les installations d'exploitation de la chaleur des nappes sont en général réalisées pour des groupes de maisons ou des grands bâtiments.

Une estimation globale des ressources thermiques des nappes phréatiques du canton de Neuchâtel a été réalisée dans cette étude. Elle donne le cadre et les possibilités d'exploitation des nappes, mais ne fournit pas d'informations spécifiques. Celles-ci doivent être impérativement déterminées par une étude locale lors de chaque projet.

Les simulations ont montré que les deux principales influences sur l'environnement liées à l'exploitation thermique d'une nappe phréatique sont le rabattement induit dans la nappe et l'extension du panache thermique qui dépendent principalement des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, notamment de la perméabilité, du gradient hydraulique et de l'épaisseur de la zone saturée.

Le rabattement est évidemment déterminé par le débit d'eau à prélever de l'aquifère et par les caractéristiques techniques de l'installation. Pour un débit fixé, le rabattement est plus important si la perméabilité ou si l'épaisseur de l'aquifère diminuent. Pour diminuer le rabattement, il est possible d'installer plusieurs groupes de puits à la place d'un seul.

La configuration de l'installation permet d'optimiser le rabattement pour une situation donnée ce qui permet également de limiter la vitesse de l'eau dans les puits et les recharges de l'aquifère par les eaux de surface.

L'extension du panache thermique est déterminée par la puissance extraite du sous-sol, mais surtout par la perméabilité et le gradient hydraulique de l'aquifère. La perméabilité du terrain détermine la taille du panache : plus elle est faible, plus le panache sera étendu. Quant au gradient hydraulique, il étire le panache dans la direction de l'écoulement d'eau souterraine. L'extension du panache thermique doit être limitée, pour ne pas causer une variation de plus de 3 °C à 100 m de l'installation, selon les directives de l'OFEV (OFEV, 2004).

Dans le canton de Neuchâtel, les deux principales nappes phréatiques de faible profondeur sont la nappe du delta de l'Areuse et la nappe du Val-de-Travers. La nappe de l'Areuse montre une très forte hétérogénéité, avec des perméabilités qui varient entre 10^{-2} et 10^{-6} m/s. Son épaisseur moyenne est de 15 m et son gradient hydraulique de l'ordre de 0.5 à 1 %. Ceci permet de distinguer trois cas d'exploitation :

1. Les zones où les perméabilités sont faibles (10^{-6} à 10^{-5} m/s) ne permettent pas une utilisation rentable de la chaleur de l'aquifère. Les rabattements aux puits et l'extension du panache thermique sont importants et les puits doivent être très espacés, ce qui demande une surface d'implantation importante.
2. Dans les zones où les perméabilités sont moyennes (10^{-4} m/s), la configuration de l'installation doit être adaptée pour limiter le rabattement. Les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine sont encore relativement faibles, ce qui rend ces zones particulièrement adaptées au stockage de chaleur par une installation des puits en doublet réversible.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

3. Là où les perméabilités sont élevées (10^{-3} à 10^{-2} m/s), le rabattement dans les puits reste toujours restreint. Ces zones permettent d'exploiter de grandes quantités de chaleur par une utilisation simple.

La nappe du Val-de-Travers est un peu plus homogène. Les perméabilités observées sont de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, le gradient hydraulique est de 0.5 % et l'épaisseur de l'aquifère est généralement inférieure à 10 m. Cette perméabilité très élevée permet, comme dans le cas 3 de la nappe de l'Areuse d'exploiter de grandes quantités de chaleur, mais pas de réaliser un stockage thermique à l'aide d'un doublet réversible, à cause des vitesses d'écoulement trop élevées.

Cette étude a permis de montrer que les possibilités d'exploitation des nappes phréatiques peuvent être déterminées de manière globale sur la base de la perméabilité (K), de l'épaisseur (e) de l'aquifère et du gradient hydraulique (i).

Lorsque K est faible (10^{-5} à 10^{-6} m/s), les conditions sont peu favorables pour une exploitation thermique. Si K est un peu plus élevé, de l'ordre de 10^{-4} m/s, mais que l'épaisseur de l'aquifère est trop faible, seules de faibles puissances peuvent être extraites de l'aquifère. Si l'épaisseur de la zone saturée est suffisamment importante, la limite d'exploitation est donnée par le gradient hydraulique, qui détermine l'extension du panache thermique, mais également la possibilité d'installer un doublet réversible. Pour les perméabilités élevées (10^{-3} à 10^{-2} m/s), une faible épaisseur d'aquifère suffit pour exploiter de grandes quantités d'énergie. Au-delà d'une certaine valeur, l'épaisseur ne limite donc plus les possibilités d'exploitation. Pour cette gamme de perméabilités, le gradient hydraulique détermine l'extension du panache thermique. Ces perméabilités ne sont en général pas adaptées pour l'installation d'un doublet réversible car l'écoulement de l'eau souterraine est trop rapide.

Ces relations sont schématisées sur la figure 4.14. Sur ce diagramme, il faut tenir compte du fait que l'influence déterminante de la perméabilité est due principalement à son domaine de variabilité. Effectivement pour des aquifères peu profonds à porosité d'interstices, la perméabilité peut varier sur plus de cinq ordres de grandeur, alors que l'épaisseur de l'aquifère et le gradient hydraulique ne varient en général que sur un ordre de grandeur.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

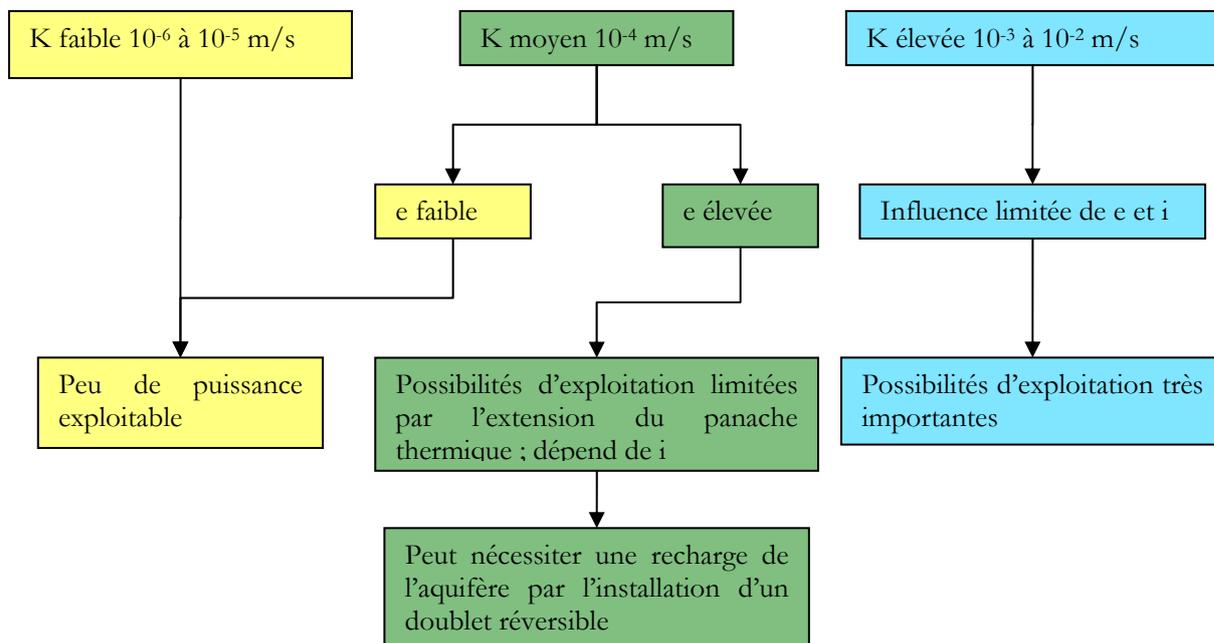


Figure 4.14. Influences de la perméabilité (K), de l'épaisseur de l'aquifère (e) et du gradient hydraulique (i) sur les possibilités d'exploitation d'une nappe phréatique de faible profondeur.

4.5 Références

- Aeschlimann-Adatte N. & Butty I., 1990. Etude de l'impact sur les eaux souterraines dans les secteurs N0, N1. 1ers éléments. Les eaux souterraines. Rap. Int. Chyn, 14p., 4ann., 2pl. hors-texte (janvier 1990).
- Aragno P.-O., 1999. Quelques remarques concernant le pompage de l'eau dans l'aquifère bordant le lac, au nord du nouveau parking du Port. Service des Eaux et Gaz, Travaux Publics, Neuchâtel.
- Aragno P.-O., 2000. Bref aperçu du sous-sol des Jeunes-Rives dans le cadre des études pour l'aménagement du site de l'artéplage (Expo 02) de Neuchâtel. Laboratoire des eaux et de l'environnement, Neuchâtel.
- Atesa, 1995. Commune de Coffrane. Zone d'extraction de matériaux - Projet de modification. Von Arx SA et U. Brechbühler.
- Badertscher C., 2001. Synthèse des travaux existants et modélisation de la nappe alluviale du Val-de-Travers (région de la Binrée et des Cornées). Travail de diplôme du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 36 pp, non publié.
- BMICSA, 1981. Chaleur de l'environnement : ressources exploitables dans le canton de Neuchâtel. Rapport du 20 mai 1981. Département des Travaux publics, Service des ponts et chaussées :53 p.
- BMICSA, 1983. Ville du Locle.Surveillance de la nappe souterraine. Rapport sur les sondages et le système d'observation mis en place.
- BMICSA, 1987. Ville du Locle.Surveillance de la nappe souterraine. Interprétation des résultats des observations des nappes quaternaires et tertiaires pour les années 1983 à 1986.
- BMICSA, 1989. Sources Hauterive à Valangin. Délimitation des zones de protection des captages appartenant à la commune d'Hauterive à Valangin.
- BMICSA, 1991. Paroisse civile de Coffrane, des Geneveys-sur-Coffrane et commune de Boudevilliers. Délimitation des zones de protection de la nappe de Paulière à Coffrane.
- BMICSA, 1992. CFF Colombier-voie de dépassement. Notice d'impact hydrologique et hydrogéologique. Rapport intermédiaire du 30 juin 1992.
- BMICSA, 1992. Commune d'Enges. Délimitation des zones de protection des captages d'Enges, de la métairie d'Enges et de Lordel. Rapport commune d'Enges. 33 p.
- BMICSA, 1992. Commune de Cornaux. Délimitation des zones de protection de la source de la Prévôtée et de la nappe des Nageux. Rapport commune de Cornaux : 38 p.
- BMICSA, 1992. Commune de Fleurier. Recherche d'eau de consommation dans la nappe des Sugis-La Binrée. Rapport hydrogéologique.
- BMICSA, 1992. Commune de la Sagne. Délimitation des zones de protection de la source de Marmoud et de la nappe du Marais
- BMICSA, 1993. Détermination des zones de protection des captages de Valangin. Puits du Sorgereux et source des Huitains du haut.
- BMICSA, 1996. Commune de Cortaillod. Détermination des zones de protection du puits de la Tertillère.
- BMICSA, 2002. Immeubles Sous les vignes, Saint-Blaise, commentaire touchant à la nature des terrains et aux affaissements constatés. Rapport d'expertise.
- BMICSA, 2002. Dépôt TRN. La Piasseta. Fleurier. Recherche d'eau complémentaire sur le site. Implantation des trois puits. Descriptif des travaux et résultats. Rapport du 12 juin 2002.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- BMICSA, 2005. Agrandissement du magasin Coop à Colombier - Neuchâtel. Impact résiduel des travaux sur le débit des sources des Fontaines de Colombier. Rapport Final.
- BMICSA, 2005. Solution énergétique originale au Val-de-Travers. Domotech, 4 : pp 22-24.
- BMICSA, 2006. ETEL SA. Captage d'eau souterraine pour l'alimentation d'une pompe à chaleur et le rafraîchissement des locaux. Rapport non publié.
- BMICSA, 2007. Carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sol par sondes géothermiques verticales sur le territoire du canton de Neuchâtel. Carte avec notice : 18 p. Département de la gestion du territoire du canton de Neuchâtel.
- Blant D. & Tâche E., 1994. Essai de traçage des eaux souterraines: Complément à la délimitation des zones de protection S du puits communal du Rafour, St.-Aubin - Sauges (NE) : 5 p.
- Blant D., 1993. Rail 2000, amélioration Grandson-Boudry, Trace 820, Lot NE, secteur N1: Rapport sur les eaux souterraines : 12 p.
- Blant D., 1995. Commune de Vaumarcus (NE), puits de pompage communal à Vers la Rive. Délimitation des zones de protection S du puits. Rapport complémentaire (redéfinition des zones S2 et S3) : 11 p.
- Belloni S. & Zwahlen F., 2005. (1) Zone de la Maladière : données hydrogéologiques. Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN), Neuchâtel. Inédit.
- Bieler G., 1986. Rapport sur la recherche d'eau potable par prospection géophysique pour la commune de Buttes.
- Bieler G. & Turberg P., 1999. Commune de Môtiers. PGEE. Délimitation des zones potentielles d'infiltration par cartographie géophysique RMT.
- Borreguero M., 2001. Délimitation des zones de protection des captages communaux des Verrières.
- Borreguero M., 2003. Révision des zones de protection des captages communaux de Gorgier.
- Burger A., 1959. Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. Thèse, Université de Neuchâtel.
- Burger A., 1980. Etude de l'effet de l'épandage des boues d'épuration sur la nappe d'eau souterraine de la plaine d'Areuse. Rapp. CHYN.
- Burger A., 1988. Commune du Locle. Zones de protection des captages d'eau potable de la ville. Rapport général.
- Burger A., 1987. Commune du Landeron. Zones de protection du puits des Novalis.
- Burger A., 1991. Rapport sur l'essai de colorations multiples dans l'Oehningien du synclinal du Locle et de La-Chaux-de-Fonds.
- Burger A. & Schaer, J.-P., 1996. La vallée du Locle – oasis jurassienne. Cahiers de l'Institut neuchâtelois, nouvelle série.
- Celio M. & Zwahlen F., 1999. Commune de Saint-Aubin-Sauges. Forage de reconnaissance pour le nouveau puits de captage. Rapport hydrogéologique.
- CHYN, 1970. Etude géologique et hydrogéologique du sous-sol de la gare de triage de Cornaux (NE).
- CHYN, 1973. Délimitation des zones de protection du puits de Cornaux (sud de la gare CFF).
- Colenco Power Engineering SA :Poppei J., Mayer G. & Schwarz R., 2006. Groudwater Energy Designer (GED). Outil de dimensionnement d'installations de chauffage ou de rafraîchissement sur eau de nappe. Manuel de l'utilisateur : 20 pp.
- Cornaz S., 1995. Hydrogéologie de la nappe de Fleurier, Môtiers et Boveresse (Neuchâtel, Suisse). Dipl. postgrade CHYN : 55 p.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Decorvet R., 1989. Etude hydrogéologique entre les villages de Vaumarcus et de St Aubin (NE) et étude d'impact d'un futur tunnel CFF. Dipl. 3ème Cycle CHYN : 48 p.
- De Cérenville Géotechnique, 1985. Projet de construction d'une salle omnisports, rue Pierre-à-Mazel, Neuchâtel : rapport sur les études géotechniques. De Cérenville Géotechnique S.A., Lausanne.
- De Cérenville Géotechnique, 1994. STEP de Neuchâtel. Relevé de 2 forages effectués du 22.07.94 au 28.07.94. De Cérenville Géotechnique S.A, Neuchâtel.
- De Cérenville Géotechnique, 1998. Halles de gymnastique, rue du Littoral, Neuchâtel : rapport géotechnique. De Cérenville Géotechnique S.A, Neuchâtel.
- De Cérenville Géotechnique, 2003. Complexe La Maladière, Neuchâtel : logs des sondages 2003 et profils géotechniques schématisés. De Cérenville Géotechnique S.A, Neuchâtel.
- GIA, Neuchâtel, 1990. Etude de l'impact sur l'environnement de la route nationale 5, tronçon Treytel-Areuse. Rapport de synthèse, 2^e étape.
- Gobbo-Butty I., 1990. Etude hydrogéologique de la région Areuse-Bevaix dans le cadre du projet RN5. Dipl. 3ème cycle CHYN : 53p.
- Gretillat P.A. & Zwahlen F., 1987. Prospection géophysique à Vaumarcus (recherche d'eau). Rapport CHYN.
- HYDRAP J. Bertrand, 1991. Puits de la nappe libre des Prés-Royer s.st. (Puits Cernier, Swissboring, Chévard-St-Martin 1 et 2, Dombresson). Délimitation des zones de protection. Plan et règlement des zones. Avec 9 annexes. SIPRE.
- HYDRAP J. Bertrand, 1991. Puits de Savagnier. Délimitation des zones de protection. Plan et règlement des zones, avec 8 annexes.
- Lavanchy J.-M., 1987. Commune d'Enges, Puits de Lordel. Détermination du débit d'exploitation et délimitation des zones de protection.
- Lemale J. & Gourmez D. (eds), 2008, Guide technique Pompe à chaleur géothermique sur aquifère. Conception et mise en œuvre. Ed. du BRGM. Collect. Scientifique et technique : 72pp.
- Mathey B., Menjoz A. & Saugy B., 1974. Modification du champ des températures de la nappe souterraine sous une raffinerie de pétrole. Mémoires de l'Ass. Int. Des Hydrogéologues Tome X.1 : pp 94-99
- Mathey B., 1976. Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon. Thèse, université de Neuchâtel.
- Matthey B. & Donner P., 1985. Evaluation du potentiel thermique des cours d'eau du canton de Neuchâtel. Bulletin de l'Arpea, n°130 : pp 39-62.
- Matthey B & Bieler G., 1990. Commune de Môtiers. Délimitation des zones de protection des sources et captages.
- Matthey B. & Bieler G., 1994. Etude hydrogéologique de la nappe des Cornées (Fleurier-Môtiers-Boveresse) pour la délimitation des zones de protection des captages.
- Mdaghri & Bouzelboudjen M., 1991. Hydrogéologie de la plaine de l'Areuse. Bull du CHYN : 10 pp 99-106.
- Müller I., 1986. Rapport sur la recherche d'eau potable par prospection géophysique pour la Commune de Noiraigue (NE). Rapp. CHYN.
- Nissille J.-C. & Tacher L., 1989. Délimitation des zones de protection du puits communal du Rafour : 25 p.
- Pasquier F., 2005. Délimitation des zones de protection S du puits de Bois de Croix.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Pochon A. & Müller I., 1998. Hydrogéologie de la plaine de l'Areuse. Rapport de synthèses. Rapport int. CHYN. n°1347, non publié : 11pp.
- Rieben C., 1986. Etude des ressources en eaux souterraines de la région des Brenets (Jura Neuchâtelois), Mémoire inédit, CHYN : 42 p.
- Schopfer & Karakas, 1967. Sondages et étude géotechnique du centre scolaire secondaire de Colombier et environs.
- Schindler B., 1988. Commune de Cressier. Zone de protection des captages. Etude hydrogéologique.
- Thierrin J., 1987. Zones de protection du puits de captage de la Brévine. Rapport du CHYN.
- Travaux Publics de la Ville de Neuchâtel, 1974. Carte au 1 :5000 des remblayages des rives de Neuchâtel 1960-1970. Texte et légende associés.
- Tripet J.-P., 1966. Vallée de la Sagne. Etude géoélectrique. Rapport S.I. la Chaux-de-Fonds.
- Zwahlen F. & Blant, D., 1997. Route Nationale Suisse N5. rapport de synthèse.

Cartes géologiques et hydrogéologiques

- Bourquin Ph. et al., 1968. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1144 Val-de-Ruz (n°51), avec notice explicative. Swisstopo.
- Bourquin Ph. et al., 1946. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1124 Les Bois (n°15), avec notice explicative. Swisstopo.
- Burkhard M., 2002. Carte géologique SIG 1:25'000, feuille 1163 Travers. Carte provisoire pour l'Atlas géologique de la Suisse. Inédit.
- Jordi H.A. et al., 2006. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1183 Grandson (n°114). Swisstopo.
- Kiraly L., 1973. Carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel au 1:50'000, avec notice explicative. Supplément du Bull. Soc. neuch. sci. nat. 96. Département des travaux publics du canton de Neuchâtel.
- Meia J. & Becker F., 1976. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1164 Neuchâtel (n°67), avec notice explicative. Swisstopo.
- Mühletaler C., 1930. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1162 Les Verrières (n°2), avec notice explicative. Swisstopo.
- Pasquier F. et al., 2006. Carte hydrogéologique de la Suisse 1:100'000, feuille n° 8 Vallorbe-Léman nord. Commission géotechnique suisse.
- Pochon A. & Müller I., 1998. Hydrogéologie de la plaine de l'Areuse. Rapport de synthèse. Rapport interne du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel n°1347, non publié, 11 pp.
- Rickenbach E., 1925. Carte géologique au 1:25'000 de la région du Val-de-Travers. Bull. Soc. neuch. sci. nat., Tome L.
- Rigassi D. & Jaccard, M., 1994. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1182 Ste-Croix (n°95), avec notice explicative. Swisstopo.
- Rollier L. & Favre, J., 1910. Carte géologique des environs du Locle et de La Chaux-de-Fonds. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse. Carte spéciale N°59. Commission géologique suisse.
- Schär U. et al., 1971. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1145 Bieler See (n°60), avec notice explicative. Swisstopo.

Forages répertoriés et données diverses

Département des travaux publics du canton de Neuchâtel, Service des ponts et chaussées. Forages de reconnaissance liés à la réalisation des routes cantonales. 780 forages avec description géologique.

Département de la gestion du territoire, 2007. Forages répertoriés à l'échelle du canton. 223 forages avec descriptif.

Département de la gestion du territoire, 2007. Forages pour la pose de sondes géothermiques verticales répertoriés à l'échelle du canton. 138 forages avec descriptif.

Département de la gestion du territoire, 2008. Stations cantonales surveillance de la qualité des eaux souterraines. Données moyennes, minimales et maximales de température à 10 stations représentatives.

Université de Neuchâtel, 2000. Base de donnée SIG du Val-de-Travers. 136 forages répertoriés avec descriptif.

5. RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS

5.1. Introduction

Le canton de Neuchâtel ne compte aucun site connu d'émergence d'eau thermique (>25°C) et aucun forage n'exploite actuellement une ressource profonde. Le rapport mandaté il y a plus de 20 ans par l'OFEN, sur la recherche d'un site favorable à l'exploitation d'un gisement géothermique sur le littoral neuchâtelois n'a malheureusement donné aucune suite en termes de réalisation (Matthey, 1986). Pour répondre aux nouveaux objectifs énergétiques du canton et afin de palier à un manque certain d'informations, l'évaluation des ressources géothermiques en aquifères profonds (APR) présentée ici, constitue une approche préliminaire globale et minimale. Elle est uniquement basée sur les données à disposition, très lacunaires à l'échelle du canton. Malgré quelques interprétations de la géologie profonde (Sommaruga, 1997) liées aux explorations pétrolières et à la réinterprétation des lignes sismiques dans le cadre de recherches scientifiques, aucune vision géothermique ou hydrogéologique n'avait été jusqu'alors considérée dans ces projets.

La complexité de la géologie du canton de Neuchâtel a dicté la méthode de travail suivante :

- Caractérisation des aquifères recherchés particulièrement en terme de débit et de température.
- Identification des formations géologiques potentielles correspondant à ces caractéristiques.
- Localisation de ces formations par l'élaboration de dix coupes géologiques permettant d'obtenir une image relativement complète de la structure du sous-sol neuchâtelois.
- Application d'un gradient géothermique aux coupes afin de déterminer les lieux sous lesquels les formations potentielles sont susceptibles d'atteindre une température suffisante.
- Combinaison de ces zones APR potentielles avec les zones potentielles de distribution de chaleur.

5.2. Concept technique général

5.2.1. Exploitation des aquifères profonds

Définitions

L'exploitation des aquifères profonds (mentionnés après APR) vise à capter et à mettre en valeur l'énergie thermique des réserves naturelles d'eau chaude emmagasinées dans des couches perméables profondes. Les bains thermaux sont certainement la forme la plus ancienne d'exploitation de l'énergie géothermique des APR. A la faveur de fractures dans la croûte terrestre ou de structures géologiques favorables, l'eau chaude profonde remonte parfois à la surface sous forme de sources thermales et peut aussi être exploitée avec des captages peu profonds. Avec le développement des techniques de forage utilisées pour la prospection des gisements pétroliers, on a au cours du 20^{ème} siècle approfondi les puits accédant à une circulation profonde connue, ce qui a permis d'en augmenter le débit et la température des eaux captées. Par la suite, l'exploitation par forages a permis aussi d'atteindre des APR dont on ne connaissait pas d'exutoires en surface et de les exploiter à diverses fins de chauffage.

Par définition et de manière arbitraire, on limitera les ressources des APR du canton de Neuchâtel à un domaine de profondeur compris entre 450 et 2000 m. En considérant un gradient géothermique moyen de 3° C/100 m, la profondeur de 450 m permet d'atteindre des températures de l'ordre de 20° C alors qu'elles seront d'environ 70° C à 2000 m. Des températures supérieures peuvent parfois être rencontrées dans les milieux fissurés encore plus profonds si des remontées d'eau chaude sont interceptées par un forage. Le but d'une opération géothermique en APR est donc de capter de l'eau au sein d'aquifères suffisamment perméables et chauds pour en permettre une exploitation économiquement rentable.

Modes d'exploitation

Si les eaux souterraines profondes ne sont que faiblement minéralisées (moins de 2 g/l) et non sulfurées, il est envisageable d'obtenir l'autorisation d'évacuer l'eau refroidie après extraction thermique dans le réseau hydrographique de surface (OFEN 1998). Un seul puits de production (singlet) suffira alors. En général, l'eau est extraite du puits grâce à une pompe électrique immergée placée dans le forage. La profondeur de la pompe dépend du rabattement maximal du niveau d'eau dans le puits lors des phases de pompage, mais elle n'excède que rarement 200 m. La pompe et tous les éléments de la colonne de pompage sont en acier inox ou d'autres alliages spéciaux pour résister à la corrosion de l'eau géothermale.

Si l'eau est trop salée ou contient du sulfure, un second forage (puits d'injection) est alors nécessaire pour refouler l'eau refroidie dans l'aquifère profond et éviter ainsi tout impact sur l'environnement. Ce mode de fonctionnement est appelé doublet géothermique (Fig. 5.1). Un forage de production amène l'eau chaude à la surface au moyen de la pompe immergée, vers un échangeur de chaleur permettant de transmettre l'énergie géothermique à un circuit secondaire, ce qui évite les problèmes de corrosion et de dépôt dans les conduites du réseau de chauffage par l'eau géothermale. En cas de température insuffisante, une pompe à chaleur (PAC) peut être utilisée afin de soutirer encore plus d'énergie à l'eau. Une pompe de circulation alimente ensuite les utilisateurs par une conduite isolée de chauffage à distance. L'eau refroidie est enfin restituée à l'aquifère profond par un forage d'injection. A titre indicatif, les températures de production peuvent se situer entre 30 et plus de 100° C en tête de puits et entre 20 et 70° C pour l'eau réinjectée, selon le type d'aquifère et d'installation technique.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Les niveaux de températures nécessaires à l'exploitation d'un système de chauffage varient sensiblement selon le type de bâtiments, et la valorisation de la chaleur géothermique d'un aquifère doit évidemment tenir compte de ce paramètre :

- Immeubles datant d'avant 1980 et chauffés par radiateurs : $> 60^{\circ}\text{C}$
- Immeubles datant d'après 1980 et chauffés par radiateurs : $> 50^{\circ}\text{C}$
- Immeubles chauffés par chauffage de sol : 40°C
- Immeubles chauffés par ventilation : 35°C
- Immeubles MINERGIE : 30°C .

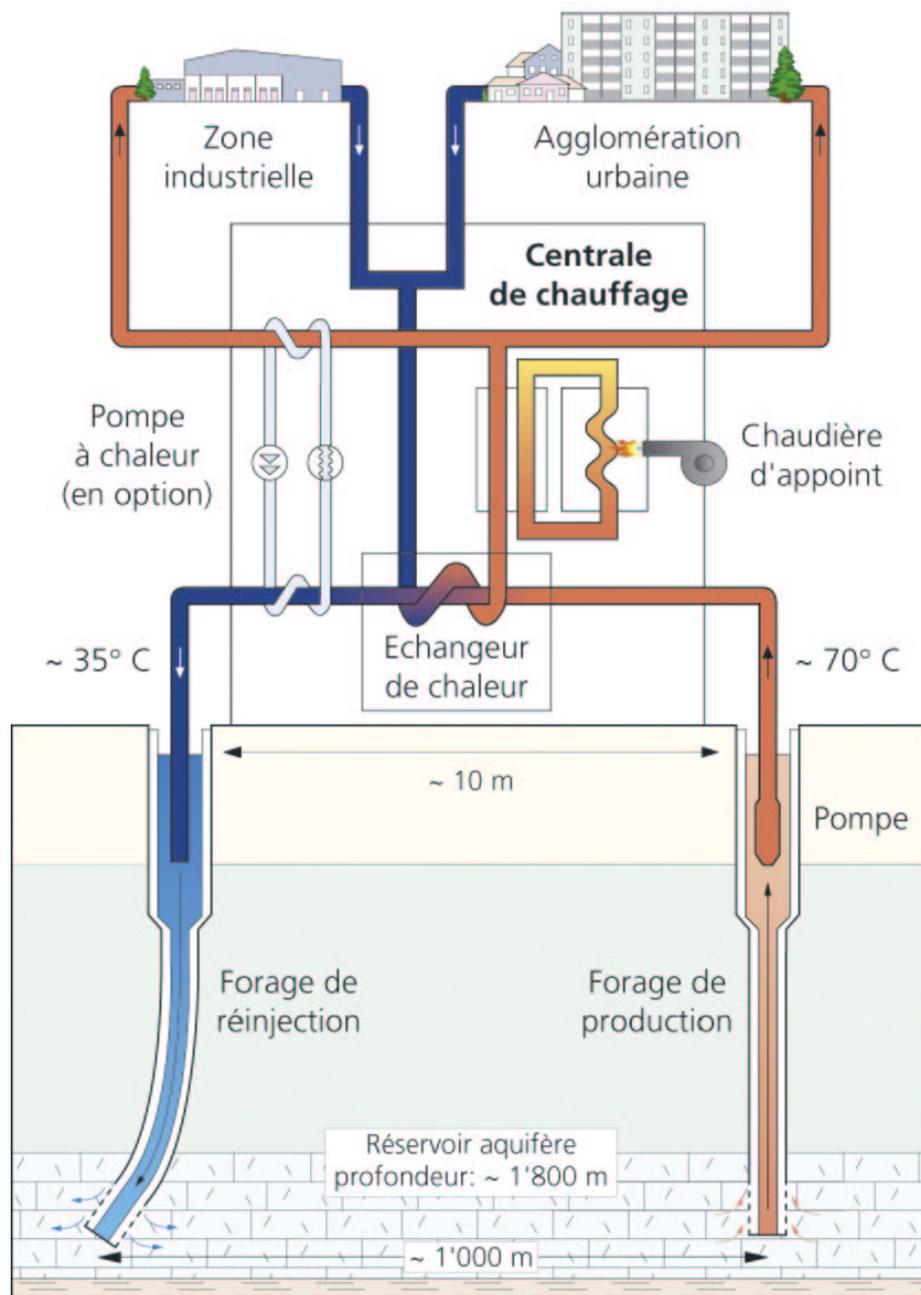


Figure 5.1. Schéma d'un doublet géothermique (Graphique : S. Cattin, 2002).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Afin d'éviter un court-circuit thermique provoqué par une circulation trop rapide dans l'aquifère entre le forage de pompage et le forage d'injection (refroidissement de l'eau pompée), la base des puits doit se situer à une distance suffisante, généralement de l'ordre de 1 km. Depuis les premières réalisations géothermiques, la typologie des doublets a évolué. Si dans les années 1970 on utilisait généralement des puits verticaux espacés en surface, depuis les années 1980 on réalise les deux forages à partir d'une plate-forme commune à quelques mètres l'un de l'autre et l'on atteint l'espacement voulu en profondeur grâce à une déviation d'un ou des deux forages.

5.2.2. Opérations géothermiques APR

Phases de réalisation

Le schéma directeur pour une opération géothermique APR comprend en principe cinq phases distinctes (OFEN 1992) :

1. Etudes préliminaires

Elles doivent permettre de fournir au promoteur des indications de base quant à la faisabilité du projet. Les indications suivantes sont à fournir : objectifs géologiques et aquifères visés, identification des utilisateurs potentiels et de leurs besoins énergétiques, évaluation du potentiel géothermique à comparer aux besoins énergétiques, estimation préliminaire de l'ensemble des investissements, plan de situation général. Le coût de cette phase est estimé selon l'importance du projet à un montant de l'ordre de 10'000 à 30'000 CHF.

2. Avant-projet

Il doit permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- Obtenir des indications détaillées sur la géologie, les aquifères visés et le potentiel géothermique attendu (débit et température de l'eau).
- Réaliser une phase d'exploration aux moyens des méthodes géologiques, géophysiques et hydrogéologiques.
- Déterminer les caractéristiques techniques du forage et les coûts relatifs.
- Définir de manière plus précise les besoins en chaleur des utilisateurs potentiels et préparer un concept de chauffage.
- Réaliser une étude paramétrique pour évaluer le montant des investissements et le coût spécifique de la chaleur fournie en fonction du débit (et de la température) qu'il sera possible d'obtenir.

Les coûts de cette phase peuvent varier entre 0.1 et 0.5 Mio CHF, voire d'avantage s'il y a lieu d'effectuer une campagne de sismique ou des forages de reconnaissance.

3. Réalisation du (des) forage(s)

Dans cette phase, il y a un risque d'échec non négligeable selon l'état des connaissances du sous-sol profond. Cette phase prévoit la mise en place du chantier, la perforation, les tests de pompage, l'équipement du forage et la réalisation des essais de production. En cas de débit insuffisant, des essais de stimulation (chimique ou/et fracturation hydraulique) devront encore être réalisés. En fonction des résultats et du chimisme de l'eau, on décidera s'il faut encore réaliser un deuxième forage pour réinjecter l'eau dans l'aquifère profond. L'investissement est important, de l'ordre de 1

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Mio CHF pour un puits de 500 m équipé (tubages et crépines) et de l'ordre de 6 Mio CHF pour un doublet avec deux puits de 1'500 m équipés (y.c. suivi hydrogéologique).

4. Etude détaillée du projet d'utilisation

Lorsque la productivité du puits est connue ainsi que le potentiel géothermique, on planifie la réalisation de la centrale géothermique et l'on détermine avec précision son enveloppe budgétaire. Dans cette phase, diverses options doivent être prises en compte pour optimiser la rentabilité des installations : utilisation directe des eaux uniquement avec des échangeurs de chaleur et des pompes de circulation, mise en place de PAC et éventuellement d'une centrale de cogénération chaleur-force, valorisation en cascade thermique de la ressource, utilisation du réseau de distribution de chaleur existant ou création d'un nouveau réseau.

5. Réalisation de la centrale et du réseau de chauffage

Après la réalisation des installations de surface, on entre dans la phase d'exploitation de la ressource géothermique. Durant deux ans au moins, un suivi des paramètres d'exploitation peut être demandé et pris en charge par des fonds publics. Il est possible ainsi de mesurer avec précision les performances des diverses installations et, au besoin, d'en améliorer le concept pour optimiser la valorisation du potentiel géothermique.

Chantier et aspects environnementaux

L'installation du chantier dure de 2 à 3 semaines. Pour économiser la surface du terrain occupé en zone urbaine, l'ensemble des installations peut s'organiser sur une plate-forme rectangulaire de taille fortement réduite par rapport à celle d'un chantier en pleine nature (Fig. 5.2). La profondeur du forage détermine aussi les dimensions de la plate-forme. A titre d'exemple, elles étaient de 50 x 70 m pour le chantier de Riehen (forage en milieu urbain de 1'547 m) et de 25 x 25 m à Lavey-les-Bains (forage en pleine nature d'une profondeur de 595 m).

Du point de vue environnemental, un effort particulier doit être consenti pour la protection de la nappe phréatique. L'ensemble des équipements est installé sur un radier rigoureusement étanche (revêtement en asphalte), présentant une légère déclivité pour l'écoulement des eaux (Fehlmann Travaux Hydrauliques S.A., 1992). Celles-ci sont dirigées vers des séparateurs d'huiles, qui doivent être périodiquement contrôlés et vidangés par une entreprise spécialisée.

Il faut aussi éviter que les boues de forage, chargées de différents produits chimiques, puissent polluer le sous-sol. Maintenues en circulation entre le forage et les installations de traitement en surface, ces boues transitent par des bassins et des tamiseurs où elles sont débarrassées des débris de roche. Les résidus solides sont déchargés dans des bassins de décantation (bourbiers) pourvus d'un revêtement étanche. Les fluides subissent un traitement adéquat (décantation, floculation, etc.) avant d'être évacués dans les canalisations d'eaux usées ou rejetées dans les bourbiers. Ces derniers sont régulièrement vidangés par des entreprises spécialisées.

Si le site de forage se trouve à proximité de zones habitées, il faudra apporter un soin particulier à la protection phonique. Les installations doivent être entourées d'une paroi ou d'une digue antibruit d'au moins 5 m de haut, doublée si nécessaire par une seconde enceinte phonique autour de la plate-forme de forage (Wilhelm, 1995). L'emplacement des baraques de chantier peut contribuer à l'effet d'écran phonique. En outre, les machines doivent être isolées individuellement et des amortisseurs de choc positionnés aux endroits clés.

Ces mesures de protection peuvent représenter jusqu'à 20 % du coût total d'un chantier de forage. A titre indicatif, quelques coûts de chantiers sont cités dans le tableau 5.1.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Tableau 5.1. : Exemples de coûts d'installation des chantiers

Chantier	Année	Coût en CHF	Remarques
Bulle	1992	18'000.-	Forage vertical de 800 m en zone rurale
Lavey-les-Bains	1997	88'000.-	Forage dévié de 595 m en zone rurale
Riehen	1988	1'032'000.-	Doublet vertical (1547 et 1247m) avec une distance en surface de 1 km : deux chantiers de forage indépendants en milieu urbain
Yverdon-les-Bains	1998	133'000.-	Forage dévié de 1479m dans le parc du Centre thermal



Figure 5.2. Exemples de chantiers de forages géothermiques. A gauche, celui du forage de Reinach (profondeur 1793 m), muni d'une protection phonique. A droite, le chantier du forage P600 de Lavey-les-Bains, situé en pleine nature. La photo du bas montre l'emprise au sol du puits géothermique en exploitation. Outre la cave de forage et le radier asphalté, un treuil pour ressortir la pompe immergée a été laissé sur place (Weber, 1990 et Bianchetti, 2002).

Techniques de perforation et tests hydrauliques

Les techniques de forages géothermiques dérivent directement de celles utilisées en recherche pétrolière. La plupart des forages géothermiques sont effectués en principe selon la méthode « rotary » à l'aide d'une tour de forage. On perce le rocher à l'aide d'un trépan qui le désagrège en petits débris (cuttings). Le trépan est animé d'un mouvement de rotation à l'aide de tiges métalliques creuses vissées au fur et à mesure de l'avancement. Par l'intérieur de ces tiges, on injecte en permanence une boue de forage permettant de refroidir l'outil, de remonter les cuttings en surface, d'éviter l'effondrement des parois du trou et de contenir d'éventuelles venues d'eau sous pression en jouant sur la densité de la boue.

L'inclinaison et la trajectoire d'un forage peuvent être progressivement modifiées, dans des limites de rayon de courbure imposées par la souplesse et l'élasticité du train de tiges en dosant les vitesses de rotation et les pressions sur l'outil. Cette technique n'entraîne pas de surcoûts. Une autre méthode consiste à utiliser une pièce coudée spéciale et une turbine à boue qui, posée au fond du forage, permettra de le poursuivre avec un certain angle. La déviation du forage permet par exemple d'éloigner la base des forages dans le cas d'un doublet ou de recouper un maximum de fractures aquifères subverticales. Ce type d'opération est très coûteux (jusqu'à CHF 20'000 par jour) et peut durer 1 à 2 semaines. Il peut représenter ainsi jusqu'à 10 % du budget total du forage.

Lorsque le forage a traversé la zone aquifère à exploiter, des essais de pompage de plusieurs jours, voire semaines, sont entrepris afin d'évaluer la productivité du puits et de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux. Des diagraphies géophysiques doivent aussi être réalisées afin de mettre en évidence les différentes arrivées d'eau et leurs caractéristiques (débit, température et minéralisation). Ces tests permettront enfin de définir la complétion à installer et, dans le cas d'un doublet, les conditions du futur puits de réinjection.

L'ensemble des travaux de perforation et des tests hydrauliques peut prendre entre 2 et 6 mois selon la profondeur du forage et la durée des essais de production. Le suivi de ces travaux doit être réalisé par un bureau spécialisé, qui prendra soin de reporter et d'interpréter avec soin toutes les données acquises dans un rapport technique de fin de forage (Fig. 5.3).

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

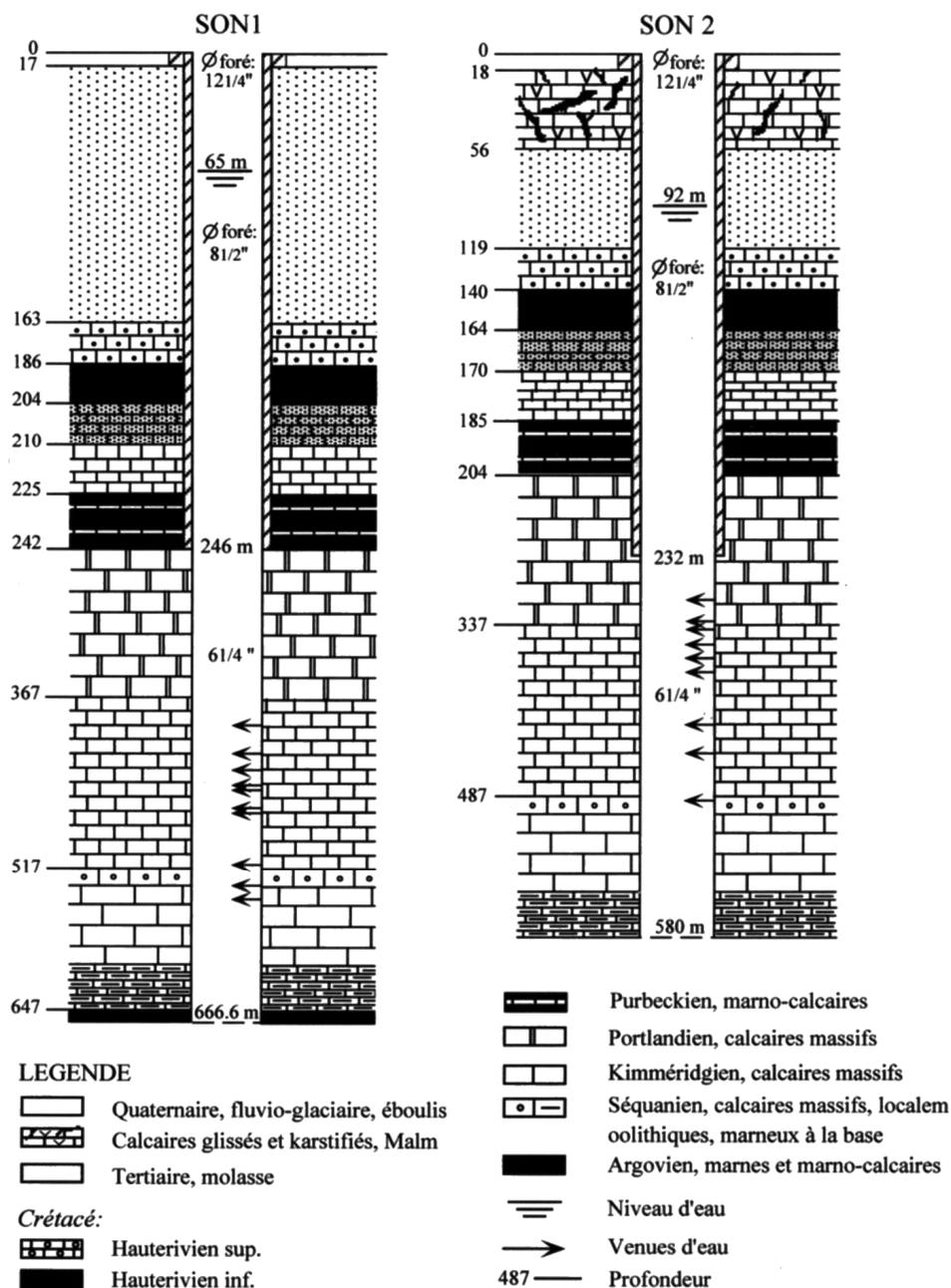


Figure 5.3. Exemple de coupes lithologiques pour deux puits de pompage à Sonvilier, Haut-vallon de St-Imier (Rieben, 1999).

De 1987 à 1998, tous les forages géothermiques couverts par la garantie du risque géologique, ont été réalisés dans l'optique d'obtenir directement un puits de production de diamètre standard, ce qui a évidemment entraîné des coûts importants pour les forages qui ont rencontré un échec. Selon les profondeurs recherchées, il serait avantageux de procéder d'abord à un forage dit d'exploration géothermique, de faible diamètre appelé slimhole (Vuataz, 1997) afin de reconnaître la ressource potentielle. Les économies par rapport à un forage traditionnel au rotary sont de l'ordre de 25 à 50 % selon le site, le type, le nombre et la profondeur des forages. La question essentielle est la capacité du forage slimhole à devenir ensuite un forage de production, dans le cas où un aquifère profond serait atteint. Des études expérimentales montrent que pour un débit de l'ordre de 1'000 l/min (= 17 l/s ou 60 m³/h), un diamètre de la zone productive de l'ordre de 90 à 130 mm serait suffisant.

Équipement des forages géothermiques et exploitation par pompage

Sur une profondeur de 10 à 30 m environ, un avant-puits avec tubage technique en acier (diamètre entre 40 et 50 cm) est mis en place puis cimenté entre le terrain et le tube, au début du percement pour protéger le trou des terrains meubles de surface. Ensuite, le forage se poursuit par étapes, avec des trépan et un diamètre de plus en plus réduits. A chaque étape, les parois de la zone en trou nu sont consolidées par la mise en place d'un tubage en acier noir et par l'injection de ciment dans l'espace annulaire. La partie terminale du forage, censée capter les eaux souterraines, est laissée en trou nu si la tenue des parois est bonne. Dans le cas contraire, elle est équipée avec des crépines (Fig. 5.4).

Localisée dans le chemisage (tubage plein), la chambre de pompage doit être suffisamment profonde pour permettre un rabattement important du niveau d'eau et doit avoir un diamètre correspondant au débit que l'on va pomper et donc à la pompe à installer. A titre indicatif, les diamètres minimums en fonction de plusieurs débits de pompage sont donnés dans le tableau 5.2. Le dimensionnement de la pompe d'exploitation se base sur les résultats des tests hydrauliques (production de l'aquifère). Pour un bon fonctionnement des pompes immergées, il est préférable que l'inclinaison de la chambre de pompage ne dépasse pas 10 à 15° par rapport à la verticale.

La consommation électrique des pompes immergées dépend de leur puissance, qui est directement proportionnelle au débit souhaité et à la hauteur manométrique. A titre indicatif, quelques puissances en fonction du débit et de cette hauteur sont données dans le tableau 5.2. Etant donné que les débits d'eau thermique sont modulés en fonction de la demande énergétique, il est possible d'optimiser la consommation électrique en installant des variateurs de fréquence, qui permettent de réduire la vitesse de rotation du moteur des pompes immergées lorsque la demande de débit diminue.

Tableau 5.2. Diamètre minimum de la chambre de pompage en fonction des débits d'exploitation. La puissance du moteur est donnée en fonction de deux hauteurs manométriques H (d'après le catalogue Grundfos).

Débits de pompage		Ø chambre de pompage		Puissance pompe	
[l/min]	[l/s]	["]	[mm]	H= 50 m [kW]	H=100 m [kW]
400-800	7-13	7	~180	6-11	11-22
800-1500	13-25	10	~250	11-22	22-45
1500-2500	25-42	12	~300	22-45	45-75
2500-4500	45-75	14	~350	45-90	75-185

En raison de la température relativement élevée des eaux géothermales, il faut surdimensionner le moteur des pompes immergées, ce qui permettra d'en assurer le refroidissement. Pour obtenir une bonne longévité des pompes, il est préférable de les laisser tourner en continu, plutôt que de les enclencher et les déclencher en fonction de la demande de débit. Pour terminer, une attention particulière doit être apportée aux chutes de tension du réseau, qui peuvent causer une surchauffe du moteur des pompes et entraîner des dégâts importants.

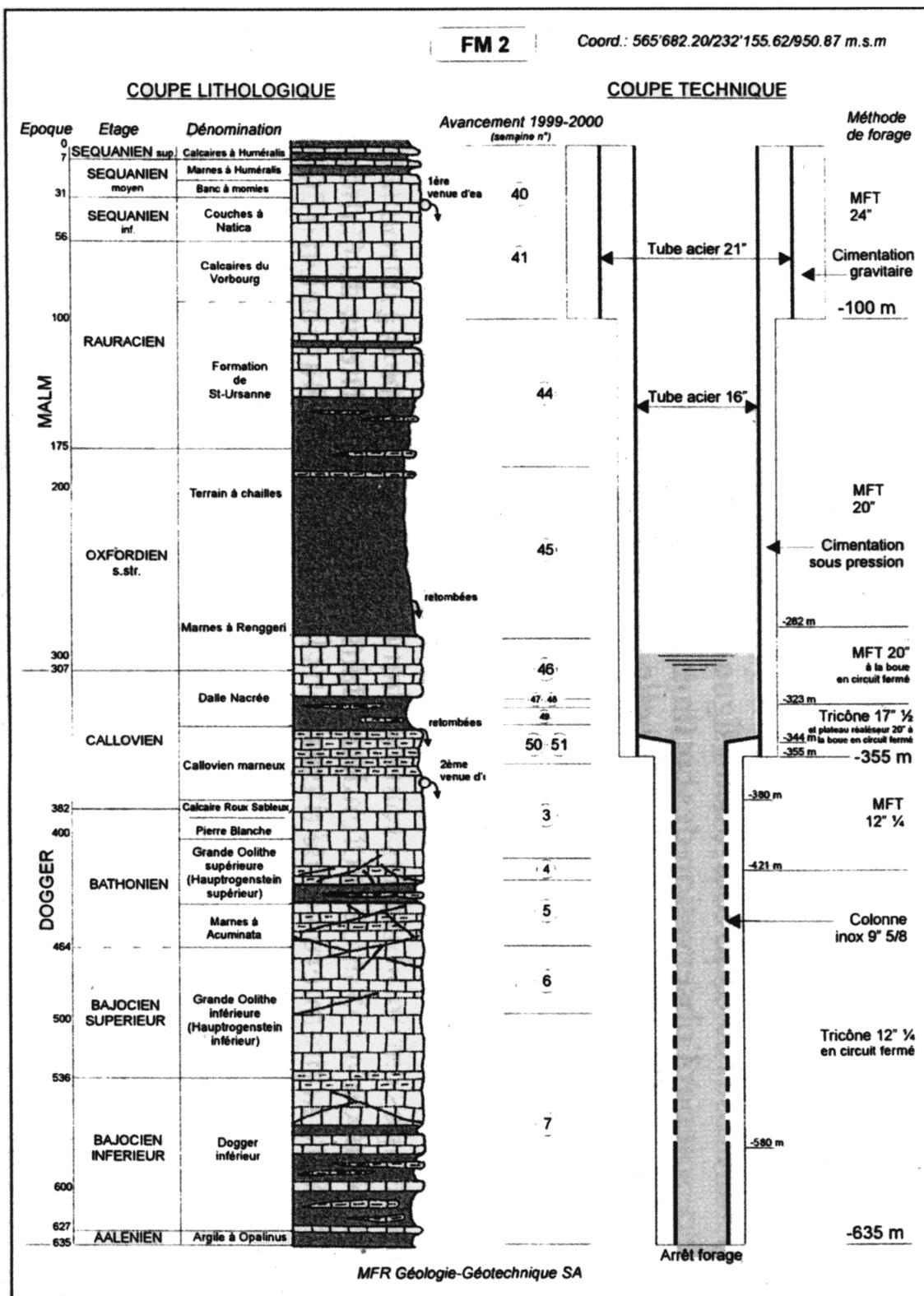


Figure 5.4. Exemple de coupe technique et lithologique pour le puits de pompage FM2 à Muriaux, Franches Montagnes (Hessenauer & al., 2001)

Potentiel géothermique, utilisateurs et besoins énergétiques

Le potentiel géothermique $Q_{\text{géo}}$ d'un forage représente la puissance thermique maximale pouvant être fournie par l'eau chaude en tête de puits. Elle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (OFEN 1992) :

$$Q_{\text{géo}} = 4.18 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot (T_s - T_r) \text{ en MWth}$$

avec D = débit en l/s ; T_s = température de la source (°C); T_r = température de rejet (°C)

La température de rejet est fixée en fonction du mode d'utilisation prévu de la chaleur, par exemple de 5 à 20°C en cas de recours à des pompes à chaleur, autrement 30 à 60°C selon le type d'installation et la saison.

A titre indicatif, pour des forages géothermiques exploités actuellement en Suisse, les puissances thermiques en tête de puits calculées avec un refroidissement théorique à 10 °C varient entre 0.2 MWth (Kloten) et 5.5 MWth (Lavey-les-Bains). La plupart des opérations géothermiques sont utilisées essentiellement pour des bains thermaux ou des quartiers d'habitations. La seule qui alimente actuellement un réseau de chauffage urbain de vastes dimensions est celle de Riehen à Bâle (apport par la géothermie : 4.4 MWth).

Avant la réalisation d'un forage géothermique, il s'agit d'identifier les utilisateurs potentiels de la chaleur et d'estimer leurs besoins énergétiques pour évaluer de quelle manière le potentiel géothermique pourrait correspondre leurs besoins. Une fois le forage réalisé, un ajustement se fera sur la base du débit et de la température disponibles. L'évaluation succincte des besoins peut se faire de différentes manières (OFEN 1992). Une approche rapide consiste à estimer le volume des différents bâtiments. Pour évaluer le besoin global en puissance thermique, on utilisera alors une puissance de 30 W/m³ pour les habitations datant de plus de 5 ans et 20 W/m³ pour les logements neufs. Dans un deuxième temps, une étude technico-économique détaillée sera nécessaire.

Si on utilise une pompe à chaleur (PAC) pour relever le niveau de température de la source, la puissance disponible à la sortie de la PAC sera fonction de la puissance géothermique et du coefficient de performance (COP) de la PAC. Ainsi, en prenant comme exemple un forage de 700 m qui délivre un débit de 12 l/s avec une température de l'eau thermique de 30 °C et un rejet à 10 °C, l'apport de la géothermie est de 1 MWth. la puissance totale disponible dépendra du coefficient de performance de la PAC.

Coûts et aspects économiques

On constate par expérience que les coûts des forages géothermiques profonds augmentent presque de manière exponentielle en fonction de la profondeur. Depuis quelques années, l'envolée des prix de l'acier et du pétrole ont créé un fort renchérissement du prix des forages profonds. D'autre part, le marché des plateformes de forages pétroliers, aussi utilisées pour atteindre les aquifères profonds, est très tendu et les délais sont longs. Ce sont surtout les machines de forage permettant d'aller au-delà de 2000 m qui sont concernées par ces problèmes. Sur la base d'évaluations récentes, le tableau 5.3 permet d'estimer de manière approximative le coût probable de nouveaux forages géothermiques en Suisse.

Tableau 5.3. Coût estimé d'un forage géothermique de production vertical réalisé en Suisse et complètement équipé, estimé sur la base de quotations de plusieurs entreprises (Geothermal Explorers, 2008).

Profondeur du forage (m)	Coût moyen estimé d'un forage (Mio CHF)
500	1.2 ± 0.1
1000	2.5 ± 0.2
1500	3.7 ± 0.4
2000	6.4 ± 0.6
2500	9.2 ± 1.0

Pour le transport de l'eau thermique, l'utilisation de conduites flexibles et isolées en polyéthylène réticulé (PE-X), protégées par un revêtement en polyéthylène à basse densité (PE-LD), en broches de plusieurs centaines de mètres, permet d'abaisser nettement les coûts de mise en place. Ce système a fait ses preuves à Lavey-les-Bains.

Dans le cadre du projet AGEPP de développement de la géothermie à Lavey (VD) visant à produire électricité et chaleur, une évaluation économique a permis de décomposer le coût de la chaleur en prenant un prix de revient à l'introduction chez les usagers de 0.08 CHF/kWh :

- 0.03 CHF/kWh pour le réseau de transport (conduites principales sans raccordement des bâtiments).
- 0.03 CHF/kWh pour les conduites de raccordement et les introductions dans les bâtiments.
- 0.02 CHF/kWh de marge minimale de valorisation de la chaleur.

Le projet de réseau de chaleur prévoit plusieurs types de consommateurs avec des distances et des densités d'habitation très variables, ce qui implique des investissements et des frais d'exploitation différents (St. Maurice, Lavey-Village, Armasuisse, Lavey-les-Bains).

Une comparaison avec d'autres types de chauffage (gaz, mazout, réseau de chauffage à distance dans différentes villes) donne un prix de la chaleur moyen de 0.11 Fr./kWh, à l'exception du CAD des Services industriels de Lausanne qui offre un coût de 0.09 Fr./kWh.

Un prix de vente de 0.10 à 0.11 Fr./kWh rendrait le chauffage à distance du projet AGEPP encore attractif par rapport aux énergies fossiles avec l'avantage d'une stabilité de prix indéniable en regard de l'évolution du prix du mazout et du gaz et de l'introduction de la taxe sur le CO₂ (AGEPP 2007).

Un projet de doublet géothermique profond lié à une installation de chauffage géothermique est une opération de longue haleine, dont la totalité entre le début de la prospection et la mise en route du réseau peut prendre une dizaine d'années. Cependant, certains cas ont démontré que 4 à 6 ans sont suffisants, si la planification du projet est optimale (Tabl. 5.4). D'autre part, la répartition des coûts montre que les travaux souterrains (exploration et forages) atteignent toujours des montants nettement moins importants que la réalisation du CAD. Dans le cas de Riem en Bavière, où les forages étaient très profonds (3.3 km), ce poste n'a représenté que 33% du projet total.

Tableau 5.4. Calendrier de réalisation et répartition des coûts d'investissement d'un doublet géothermique profond pour un réseau de chauffage à distance : exemple de l'installation de Riem dans la région munichoise (Bavière)

Activité	Date	Répartition des coûts d'investissement	%
Début de la planification pour l'exploration géothermique	15.05.2002	2 forages profonds (incl. Etude et exploration)	33
Décision du site de forage	31.01.2003	Pompes, échangeurs de chaleur	6
Attribution du contrat de forage	18.03.2003	Centrale de chauffage	22
Début du 1 ^{er} forage	18.06.2003	Réseau de distribution de chaleur	39
Fin du 1 ^{er} forage dévié (3.3 km)	28.07.2003	Total	100
Début du 2 ^e forage	20.08.2003		
Fin du 2 ^e forage dévié (3.2 km)	15.10.2003		
Commande de la pompe submersible	5.03.2004		
Installation et test de la pompe submersible	27.09.2004		
Début du test de pompage de longue durée	8.11.2004		
Autorisation de l'exploitation commerciale	28.02.2006		

5.2.3. Développements aquifères profonds à l'étranger et en Suisse

France

Le développement de la géothermie française a pris son envol lors des deux crises de l'énergie des années 1970, avec une importante activité entre 1978 et 1987. Actuellement, quelques 60 centrales géothermiques sont en fonction, dont la moitié se trouve dans le Bassin parisien (Ile-de-France) et l'autre moitié principalement dans le Bassin aquitainien (sud-ouest)(Laplaige et al. 2005, ADEME-BRGM, 2004). Elles sont utilisées essentiellement pour du chauffage urbain de quartiers résidentiels. Souvent le fluide géothermal d'origine profonde est fortement salé (env. 30 g/l) et ne peut être rejeté en surface après son usage calorifique. C'est pourquoi, toutes les installations géothermiques du Bassin parisien sont basées sur le principe du doublet. En 2006, la puissance totale installée était de 300 MWth ce qui permettait de chauffer près de 170000 équivalents logements.

Plus aucun forage n'a été réalisé depuis pendant près de 20 ans, principalement en raison du coût très bas des énergies fossiles et d'une TVA beaucoup plus élevée pour la géothermie que pour les combustibles fossiles. Depuis 1986, 19 centrales géothermiques ont été fermées dans le Bassin parisien, pour des raisons économiques et financières, mais aussi pour des problèmes techniques dus à la corrosion des conduites par les des eaux géothermales. Actuellement, de nouveaux projets

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

sont en cours, notamment dans le Bassin parisien en raison du coût des combustibles fossiles et d'une nouvelle politique énergétique.

Exemple d'un doublet géothermique à Fresnes

La centrale géothermique de Fresnes en (Val-de-Marne, Ile-de-France) comporte un doublet de forages déviés d'une profondeur de 1800 m dans les calcaires du Dogger. A leur base ils sont distants de près de 2 km. Commencée en 1985 alors que le pétrole valait 35 dollars le baril, l'opération de géothermie de Fresnes a été mise en service en 1986, au moment où le baril ne cotait plus que 12 dollars. Seul le sud de la commune est alors desservi, avec 3600 équivalent-logements. Le doublet de forages déviés offre une température en tête de puits de 73°C et la centrale comporte deux échangeurs à plaques de titane. En 1999, la ville de Fresnes et la Société Fresnoise de Chaleur raccordent de nouveaux ensembles immobiliers qui portent le réseau à 4500 équivalent-logements. Une centrale de cogénération est également mise en service en 1998 avec une desserte du nord de la ville. Le nombre d'équivalent-logements desservis aujourd'hui atteint 5350.

Allemagne

Quelques 140 centrales géothermiques utilisent des fluides chauds provenant d'aquifères profonds, situés dans les bassins sédimentaires du nord de l'Allemagne, de la Bavière et du Fossé rhénan. Il s'agit principalement de centrales de chauffage à distance, souvent combinées avec des centres thermaux et des serres agricoles. Les températures des eaux exploitées varient entre 26 et 108° C, les débits de 1 à 81 l/s. A fin 2004, la puissance totale installée était de 177 MWth (Schellschmidt et al, 2007).

Au contraire de la France, on a observé ces dernières années en Allemagne une forte progression de la géothermie APR, avec de nombreux projets nouveaux. La nouvelle centrale transfrontalière avec l'Autriche de Simbach-Braunau permet de fournir depuis 2001 une puissance installée de 40 MWth, dont 7 MWth par la géothermie, avec une eau très peu minéralisée (1.1 g/l), captée dans les calcaires du Malm par un forage dévié long de 3203 m (Goldbrunner, 2001). La récente loi sur l'énergie en vigueur depuis 2004 favorise les énergies renouvelables et la géothermie notamment par le rachat à prix coûtant de l'électricité produite par des centrales éoliennes, photovoltaïques ou géothermiques. Il y a maintenant un véritable boom pour des projets en aquifères profonds à des températures atteignant ou dépassant 100°C, dans le but d'avoir une petite production d'électricité au moyen d'une centrale ORC à fluide binaire.

Autriche

Malgré une longue tradition d'utilisation des ressources géothermiques pour le thermalisme et les bains, les aspects énergétiques de la géothermie n'ont été développés que récemment, notamment depuis l'entrée de l'Autriche dans l'Union européenne. Des ressources géothermiques existent dans la plupart des provinces autrichiennes, mais elles ne sont exploitées que dans deux régions : le bassin Styrien et le bassin molassique de Haute-Autriche. Les températures des eaux exploitées varient entre 33 et 95° C, avec des débits jusqu'à 81 l/s. Au total, une douzaine d'exploitations géothermiques sont en fonction pour le chauffage d'hôtels, de centres thermaux ou pour des habitations au moyen de réseaux de distribution de chaleur. A fin 2004, la puissance totale installée était de 61 MWth pour sept installations de doublets géothermiques (Goldbrunner, 2005). Deux petites installations de production électrique à Altheim et Bad Blumau fonctionnent au moyen de turbines ORC et de fluides géothermiques à 105 – 110°C.

Italie

Malgré l'existence de très nombreuses sources chaudes et un thermalisme traditionnel important, la géothermie en aquifère profond de moyenne température ne s'est pas beaucoup développée, non pas par manque de ressources, mais par l'absence d'incitations économiques. Quelques systèmes de chauffage existent pour des villages proches des centrales géothermiques électriques, pour des groupes de serres agricoles et des installations de pisciculture. Les centrales géothermiques exploitant des aquifères profonds dont la température est inférieure à 100° C ne sont qu'une dizaine et l'on ne recense qu'une seule installation avec un grand réseau de chauffage à distance à Ferrare. On peut estimer qu'à fin 2006, la puissance totale installée de type APR était de 450 MWth (Buonasorte et al, 2007).

Développements aquifères profonds en Suisse

Jusqu'en 1976, le développement de la géothermie APR en Suisse était quasiment inexistant (Vuataz & Fehr, 2000). L'utilisation des eaux chaudes provenant des profondeurs était confinée au remplissage des piscines de stations thermales. La première réalisation géothermique pour le chauffage de bâtiments en complément avec l'exploitation d'un établissement thermal a vu le jour à Lavey-les-Bains, grâce à la réalisation en 1972 d'un forage profond de 200 m pouvant délivrer une eau à 62° C avec un débit de 400 l/min (Jaffé et al., 1976).

Dès la première crise pétrolière en 1974, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a mis en place une politique d'encouragement des énergies renouvelables et notamment de la géothermie avec la création en 1975 d'une Commission fédérale de géothermie et du stockage souterrain de chaleur (KGS). Celle-ci avait pour mission de clarifier les aspects scientifiques, techniques et économiques liés à la géothermie et d'en promouvoir la connaissance et le développement. Les travaux de la KGS se concrétisèrent en 1981 avec l'édition d'une « Synthèse des données géothermiques » (Rybach et al., 1981). Des cartes furent publiées avec indications du gradient géothermique calculé à partir des mesures de température fournies par les forages pétroliers profonds. Un manuel spécifique fut conçu pour aider les réalisateurs d'installations et les promoteurs à mettre en œuvre des projets (OFEN, 1992).

La région du Plateau suisse a été identifiée comme la zone la plus favorable pour l'exploitation d'aquifères susceptibles de fournir de l'eau chaude. Dans le bassin molassique, dont l'épaisseur varie de quelques mètres à plus de 3000 m, les grès de la Molasse marine supérieure sont relativement perméables, du moins dans le Nord de la Suisse. Plus en profondeur, trois horizons formés de roches compétentes fissurées (calcaires, dolomies et gypses) sont aussi aquifères : le Malm, le Dogger et le Trias (Muschelkalk supérieur). Les régions les plus favorables pour atteindre ces aquifères par des forages profonds avec un investissement économiquement rentable se situent au nord et à l'ouest de la Suisse, ainsi qu'au pied de la chaîne du Jura.

Pour cette raison, dès 1980, deux projets de prospection régionale des ressources géothermiques ont été réalisés, l'un dans la région comprise entre Zurzach au nord et Schinznach au sud et l'autre le long du pied sud du Jura entre Bad Lostorf et Genève, en passant par Bienne (NEFF, 1980 et 1984 ; Burger & Gorhan, 1986 ; Gorhan & Griesser, 1988). Ces études ont été financées par le Nationaler Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) et exécutées par un groupe de recherche comprenant des instituts d'universités et d'écoles polytechniques, ainsi que des bureaux d'ingénieurs. Le Muschelkalk supérieur, considéré comme un aquifère potentiel important, a été la cible de 5 forages de prospection réalisés dans le N-W de la Suisse jusqu'à une profondeur de 410 m.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Tableau 5.5. Caractéristiques des forages géothermiques profonds réalisés en Suisse entre 1983 et 1998 (Vuataz & Fehr 2000).

Forage	Canton	Prof. totale (m)	Formation aquifère	Tempér.: fond (f) ou tête (t) de puits (°C)	Débit de product. (l/s)	Puissance en tête de puits avec refroidissement à 10°C (kW th)	Minéralisation de l'eau (g/l)	Utilisation de la géothermie en 1999	Année de forage
Kloten	ZH	400	Molasse marine supér.	22.7 f 19.0 t	5.0	188	0.92	Quartier de 70 logements	1983
Riehen 1 (producteur)	BS	1547	Muschelkalk supér.	67.0 f 62.0 t	20	4350	18.2	Réseau de chauffage urbain	1988
Riehen 2 (injecteur)		1247		54.0 f	14	-	14.2		1988
Kreuzlingen	SG	655	Molasse marine supér.	30.0 f 26.5 t	3.7	255	0.87	Piscine	1988
Reinach	BL	1793	Muschelkalk supér.	72.0 f	0.10	26	46.2	Aucune	1989
St Moritz	GR	1600	Série de Chastelets Nappe de Platta	47.2 f 22.0 t	1.3	67	14	Aucune	1991
Bulle	FR	800	Molasse marine infér.	30.0 f	0.08	7	-	Aucune	1992
Bassersdorf	ZH	553	Molasse marine supér.	23.0 t	4.3	232	~1	Home médicalisé	1992-93
Weggis	LU	2302	Molasse continent. infér.	73.0 f	0	~70 (sonde géothermique)	-	3 petits immeubles	1992-93
Thônex	GE	2650	Crétacé infér., Jurass. supér.	88.5 f	3.1	765	~1	Aucune	1993
Weissbad	AI	1618	Molasse contient. infér.	45.0 f	0	~50 (sonde géothermique)	-	Centre thermal	1993
Schinznach Bad	AG	891 415	Muschelkalk sup.	63.0 f 44.5 t	8.3	1200	2.15	Centre thermal	1996
Saillon	VS	929	Lias, Trias	32.4 f 30.5 t	4.9	420	4.45	Centre thermal et école (en cours de montage)	1996
Lavey-les-Bains	VD	595	Cristallin Aiguilles Rouges	72.0 f 69.0 t	22.5	5550	1.4	Centre thermal	1997
Yverdon-les-Bains	VD	1440 256 500 1117	Crét. inf., Jurassique sup. et moyen	60 f 22 t 28 t 39 t	92 50 4.3	4590 3760 525	0.45 0.40 0.50	Aucune	1998

Les cantons, communes et autres milieux intéressés par l'exploitation géothermique des aquifères profonds n'étaient pas à même de supporter seuls le financement des forages profonds, relativement coûteux, avec le risque de ne pas obtenir une productivité suffisante. Aussi la Confédération décida-t-elle, en 1987, d'assurer pour une période de 10 ans une couverture du risque

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

géologique pour des forages dont la profondeur dépassait 400 m, avec un montant global de 15 millions de CHF. En cas d'insuccès, il était prévu de rembourser aux promoteurs jusqu'à 50 % des coûts de forage et de tests. Plus tard, une subvention fut mise en place jusqu'en 1997, couvrant à titre d'encouragement jusqu'à 25 % de ces coûts. L'octroi de la couverture du risque, de la subvention et le paiement des montants étaient effectués sur recommandation de la KGS, après une évaluation préliminaire du projet et une analyse des résultats du forage.

Avec cette couverture du risque géologique, 14 forages profonds (dont un doublet) ont été réalisés jusqu'en 1998, dont 9 sont exploités commercialement à ce jour (Tabl. 5.5). Toutefois, par rapport aux objectifs de réussite établis par les contrats avec la Confédération, seules 4 réalisations géothermiques ont été considérées comme des succès (Riehen, Bassersdorf, Bad Schinznach et Lavey-les-Bains) et deux comme des succès partiels (Saillon et Kreuzlingen, Fig. 5.6). Pour ces projets, les températures des eaux profondes captées varient entre 26 et 69° C et les débits de production entre 4 et 22 l/s. Les puissances géothermiques calculées en tête de puits sont comprises entre 0.3 et 5.5 MW_{th}.

La fin de la couverture du risque a eu pour effet de stopper les nouveaux projets géothermiques visant à exploiter les aquifères profonds. Il aurait été pourtant souhaitable de poursuivre l'exploration géothermique du sous-sol profond, grâce à de nouveaux forages notamment dans les niveaux aquifères peu connus des roches sédimentaires du Trias et dans ceux, moins profonds, du Malm et du Dogger, ainsi que dans les zones à forte densité de peuplement du Plateau suisse. A nouveau, la Confédération va mettre en place dès 2009 une couverture du risque géologique pour les forages géothermiques profonds, mais seulement dans les cas où une production d'électricité est prévue, conjointement à cette chaleur.

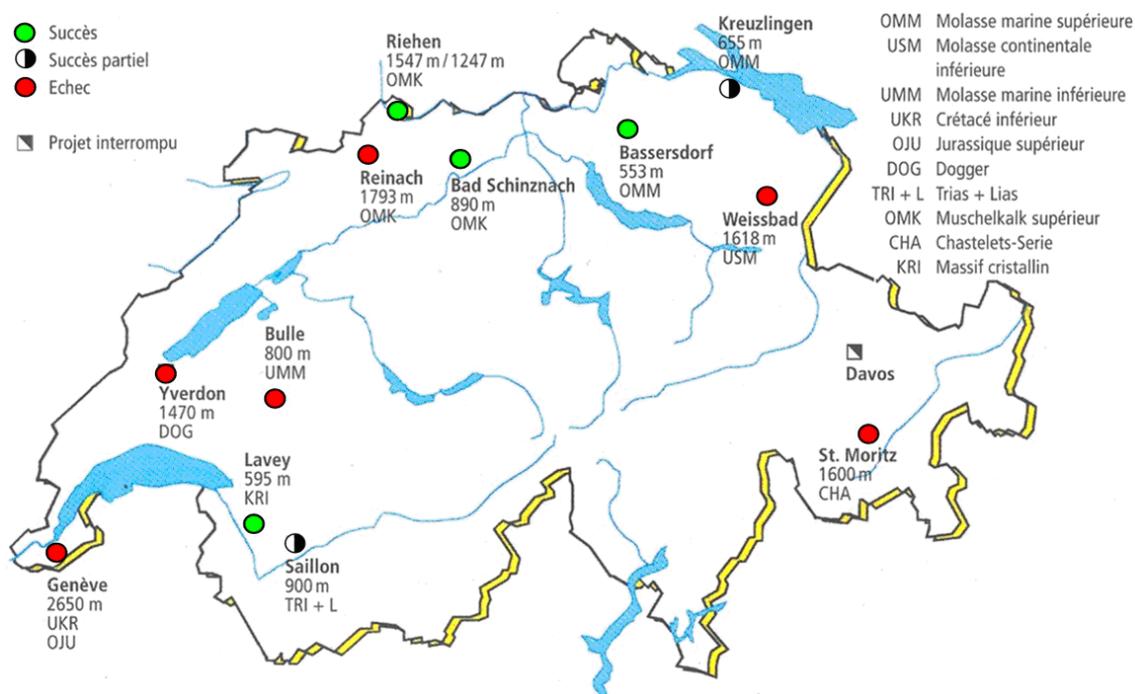


Figure 5.6. Situation, profondeur et état des projets de forages géothermiques profonds en Suisse effectués entre 1987 et 1998 avec l'aide de la Confédération (modifié d'après OFEN 1998).

La première centrale géothermique de Suisse fonctionnant sur le principe du doublet, a été mise en service en 1994 pour le réseau de distribution de chaleur de Riehen (Bâle). L'installation exploitant l'énergie géothermique est équipée des deux pompes à chaleur électriques et d'une centrale de

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

cogénération chaleur-force (Vuataz & Fehr, 2000). L'exploitation des eaux souterraines est réalisée par deux forages verticaux distants de 1 km. Le forage de production a une profondeur de 1547 m et celui de réinjection atteint 1247 m. La température de l'eau en tête de forage est de 62° C. Le débit d'exploitation, qui était au début de 14 l/s, a été porté à 20 l/s après acidification, par injection d'acide chlorhydrique qui a permis de dissoudre la calcite et d'élargir ainsi les fissures aquifères. L'aquifère exploité est celui du Muschelkalk supérieur et l'eau pompée, qui a une minéralisation de 18 g/l (env. la moitié de celle de l'eau de mer) ne peut pas être rejetée directement en surface. La puissance installée atteint 15 MWth, dont environ le tiers est fourni par la géothermie. Le reste est assuré par deux installations de pompe à chaleur électriques, deux centrales de cogénération chaleur-force à gaz et trois chaudières d'appoint à mazout. L'investissement total a atteint 40 Mio CHF dont 6.2 Mio CHF pour les deux forages. Quelques 180 immeubles sur territoire suisse sont chauffés par cette centrale et une zone étendue de nouvelles constructions située de l'autre côté de la frontière, à Lörrach (Allemagne), est approvisionnée en énergie depuis fin 2000 par une conduite transfrontalière de 600 m. Grâce à cette part de chauffage fournie par la géothermie, sur une année ce sont 900 t de CO₂, 2 t de SO₂ et 1 t de NO_x qui n'ont pas été rejetées dans l'atmosphère (Oppermann, 2001).

Mentionnons enfin deux réalisations géothermiques plus modestes, celles de Seon (Argovie) et d'Itingen (Bâle), où des forages peu profonds permettent l'exploitation de la ressource géothermique. A la recherche d'une nouvelle alimentation en eau potable, le village de Seon a mis en exploitation en 1997 un forage dans un aquifère graveleux, situé entre 268 et 320 m de profondeur et correspondant au remplissage d'un ancien surcreusement glaciaire de la molasse (USM). Pompée avec un débit maximum de 1500 l/min, l'eau est légèrement minéralisée, dépourvue d'oxygène et possède une température de 19.6° C. En raison du refroidissement nécessaire de l'eau pour la consommation, il a été décidé de tirer partie de cette énergie en couplant le système d'alimentation à une pompe à chaleur. Ainsi, en abaissant la température à 10° C, une puissance thermique de 1.45 MW est disponible en sortie de forage ce qui permet de chauffer à distance une soixantaine d'habitations (Matousek & Graf, 1998). En 1998, seule la moitié de cette énergie était utilisée, ce qui représentait déjà une économie de 200 tonnes de mazout par année.

A Itingen, l'exploitation de l'énergie géothermique se fait par un doublet foré dans les calcaires du Muschelkalk supérieur du Jura tabulaire. Le premier forage, vertical, exploite une eau à 22° C (24° C en fond de trou), entre 262 et 291 m (3 venues d'eau), avec un débit maximal de 300 l/min. Le deuxième forage, incliné de 28°, distant de 3 m en surface et de 185 m à la base, sert à la réinjection des eaux pompées, trop minéralisées (5.3 g/l). Avec un refroidissement de 12° C, le potentiel de puissance fournie par ce forage est de 0.25 MW. Cette ressource permettrait de subvenir aux besoins d'environ 50 appartements à basse énergie construits selon le standard Minergie. En 2000, six habitations de la « Cité Solar One » fonctionnaient grâce à ce doublet géothermique (Häring et al., 2002).

Etudes et projets géothermique dans le canton de Neuchâtel

La première évaluation géothermique du canton de Neuchâtel a été réalisée par le bureau B. Matthey Ing.-Cons. de Montezillon en 1986 dans le cadre d'un mandat de l'Office fédéral de l'énergie (Matthey, 1986). Elle recense les conditions géologiques, hydrogéologiques et géothermiques qui permettent de localiser des sites potentiels pour l'implantation d'un forage profond sur le littoral neuchâtelois. En parallèle, le marché des consommateurs de chaleur a été mis en évidence. Quatre régions ont été pré-sélectionnées sur la base des connaissances du sous-sol : Concise-Vaumarcus, Bevaix, Saars-Monruz et St-Blaise et considérant le potentiel de consommation, ce sont les deux dernières qui sont considérées comme les plus intéressantes.

En 1994, une étude préliminaire pour un projet d'exploitation géothermique à Marin a été réalisée sous l'égide du Service cantonal de l'énergie et complétée deux ans plus tard par une évaluation

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

économique des consommateurs de chaleur (Borreguero, 1996). Les conclusions montrent que le site est favorable tant sur les plans géologique et qu'économique.

Huit ans plus tard, le bureau Tecnoservice Engineering a effectué une évaluation technico-économique, mandaté par le Service cantonal de l'énergie (Tecnoservice Engineering, 2004). Cette étude de faisabilité décortique trois variantes de réseau de distribution de chaleur de tailles différentes (8.5, 9.1 et 13.7 MWth), avec des conditions de production de chaleur incluant la géothermie (13 à 25 %), l'électricité (4 à 5 %) et le gaz (71 à 83%). Le schéma de production de chaleur comprend 4 pompes à chaleur et 4 centrales chaleur-force avec moteur à gaz, 3 chaudières d'appoint à gaz et 3 accumulateurs. Les hypothèses de base considérées pour la partie géothermie sont résumées dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6. Hypothèses de base caractérisant la ressource géothermique, utilisées pour les calculs technico-économiques du projet de chauffage à Marin-Epagnier (Tecnoservice Engineering, 2004).

Caractéristiques	Valeurs	Remarques
Formation géologique aquifère	Calcaires bajociens	Dogger (Jurassique moyen)
Gradient géothermique (°C/km)	30-32	Estimé d'après le forage pétrolier de Tschugg
Profondeur du forage de production (m)	1500	Forage dévié
Température de l'eau en tête de puits (°C)	50	
Débit de production pompé (l/s)	33	
Rabattement par pompage (m)	200	
<i>Forage de réinjection</i>		<i>En option</i>
Profondeur du forage de réinjection (m)	1500	Forage dévié
Ecartement à la base des 2 forages (m)	>1000	
<i>Rejet en surface</i>		<i>En option, si teneur en NaCl < 2 g/l et température ≤ 30°C</i>
Longueur de la conduite de rejet (m)	1800	
<i>Coût des forages</i>		Valeur 2004
Forage de production (Mio CHF)	3.53	
Forage de réinjection (Mio CHF)	2.42	
Total (Mio CHF)	5.95	

5.3. Méthodologie de l'étude

5.3.1. Caractéristiques des APR recherchés

Température

Elle devrait atteindre au moins 30°C. Toutefois en considérant une exploitation munie d'une PAC, une température de 20°C peut déjà être intéressante.

Débit

La puissance thermique disponible est proportionnelle à la température et au débit. Ainsi, un faible débit pourra être compensé par une température élevée et inversement une basse température nécessitera un gros débit. Typiquement, les débits minimum nécessaires sont de l'ordre de 10 à 20 l/s.

Perméabilité

Par définition, pour être aquifère, une formation doit posséder une perméabilité ou conductivité hydraulique supérieure à 10^{-6} m/s. Cette perméabilité intrinsèque est généralement inférieure de deux ordres de grandeur à la perméabilité régionale qui bénéficie de la fracturation et de la dissolution.

Chimisme

Une eau fortement minéralisée (plusieurs grammes de sels dissous par litres) impose la réalisation d'un doublet afin de la réinjecter dans la même formation géologique et de ne pas rejeter des eaux salées dans des cours d'eau ou des nappes superficielles.

Consommateurs

Pour être économiquement rentable et prévenir une forte déperdition d'énergie, le site d'exploitation géothermique d'un APR doit se trouver à une distance maximale de 1 km des premiers consommateurs.

5.3.1. Contexte géologique du canton de Neuchâtel

Introduction

Le canton de Neuchâtel se situe entièrement dans le domaine géologique du Jura plissé, le lac séparant au sud le Jura du Plateau molassique. La molasse est néanmoins présente sous la forme de biseaux et de remplissages de vallées. Les plis du Jura sont constitués de roches sédimentaires mésozoïques désolidarisées du socle structural grâce aux couches « savon » du Trias situées à la base de la série. Le socle est composé principalement de roches cristallines. Toutefois, on y trouve localement des remplissages de sédiments continentaux datés du Permo-Carbonifère.

Socle

Le socle est composé de roches métamorphiques, granitiques ou gneissiques très anciennes. Le terme de socle structural est défini comme étant la partie stable située sous la couverture plissée. Il comprend également des roches sédimentaires du Permo-Carbonifère qui remplissent des dépressions à la surface du socle s.s.. Ces dépressions ou graben sont encore mal connus, ils

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

seraient relativement importants sous le Jura neuchâtelois et expliqueraient partiellement la localisation de son plissement.

Le socle affleure sur les bords du fossé rhénan. Vers le Sud, son toit plonge sous le Jura et sous le bassin molassique pour atteindre une profondeur supérieure à 4000 m au front des Alpes. Il réapparaît au cœur des Alpes sous la forme des massifs cristallins. Ainsi, dans le canton de Neuchâtel, le socle se situe à environ -1600 m.s.m au nord et -2400 m.s.m au sud (Fig. 5.7).

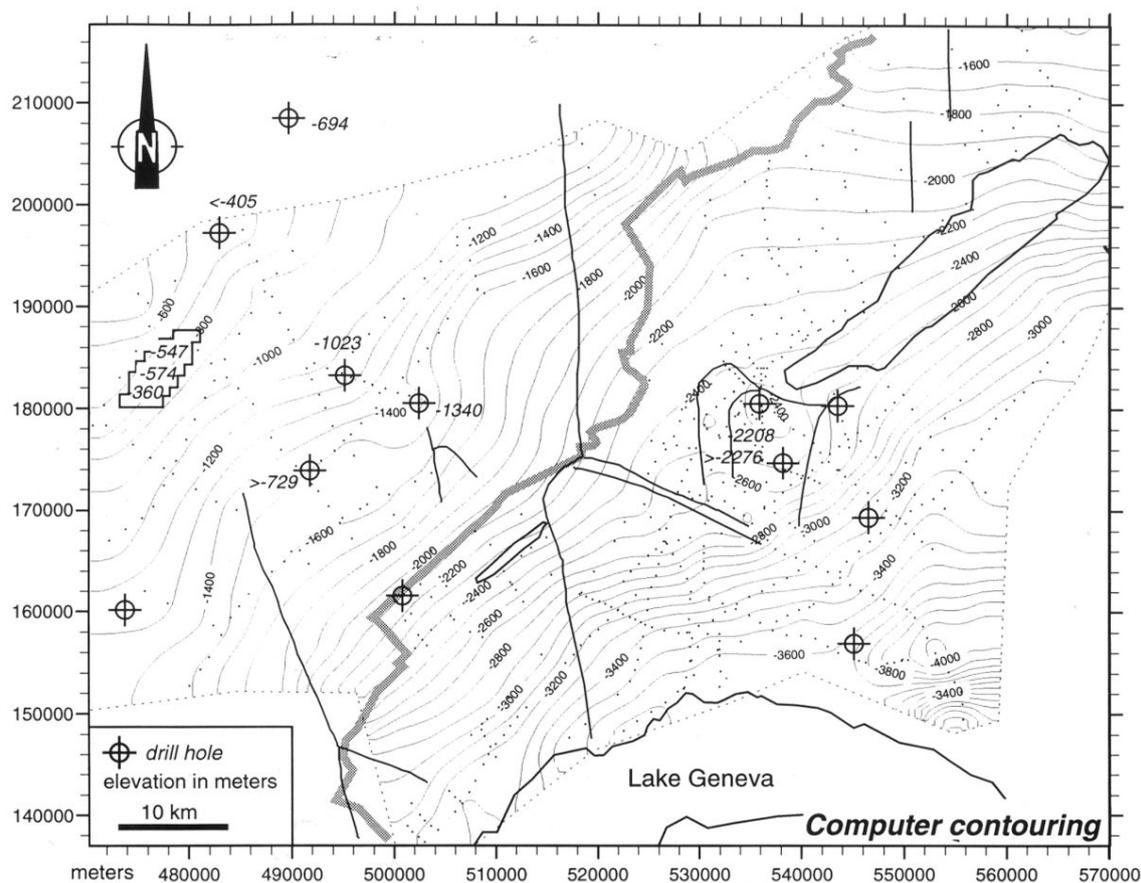


Figure 5.7. Isohypses du modèle du toit du socle (Sommaruga, 1997) utilisé pour la construction des coupes géologiques.

Stratigraphie

La couverture plissée est formée par l'accumulation d'une pile de roches sédimentaires comprenant le Trias, le Jurassique et le Crétacé. Dans le canton de Neuchâtel seules affleurent les roches les plus récentes jusqu'au Jurassique moyen (Dogger). En-dessous, la nature des roches est reconnue par extrapolation latérale ou par des forages profonds proches tel que celui de Hermitage.

A la base de la pile, la série triassique est principalement composée de roches évaporitiques avec d'importants niveaux de gypse et de sel gemme. Toutefois, la série du Trias comprend en son milieu la formation du Muschelkalk supérieur faite de couches calcaires et dolomitiques d'une puissance de 80 m. C'est l'ensemble de ces couches « savon » qui permettra la désolidarisation de la couverture et son plissement.

Durant le Jurassique et le Crétacé s'alternent des calcaires et des marnes. Ces alternances forment des successions tantôt aquifères tantôt aquicludes. A la fin du Crétacé (65 Ma), la région connaît

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

une période d'érosion continentale et ce n'est que vers 25 à 20 Ma que des sédiments molassiques recouvrent l'ensemble de la région. Durant les temps quaternaires, après l'apparition du relief, des glaciations ont permis le dépôt de sédiments morainiques dans les vallées et sur les flancs des anticlinaux.

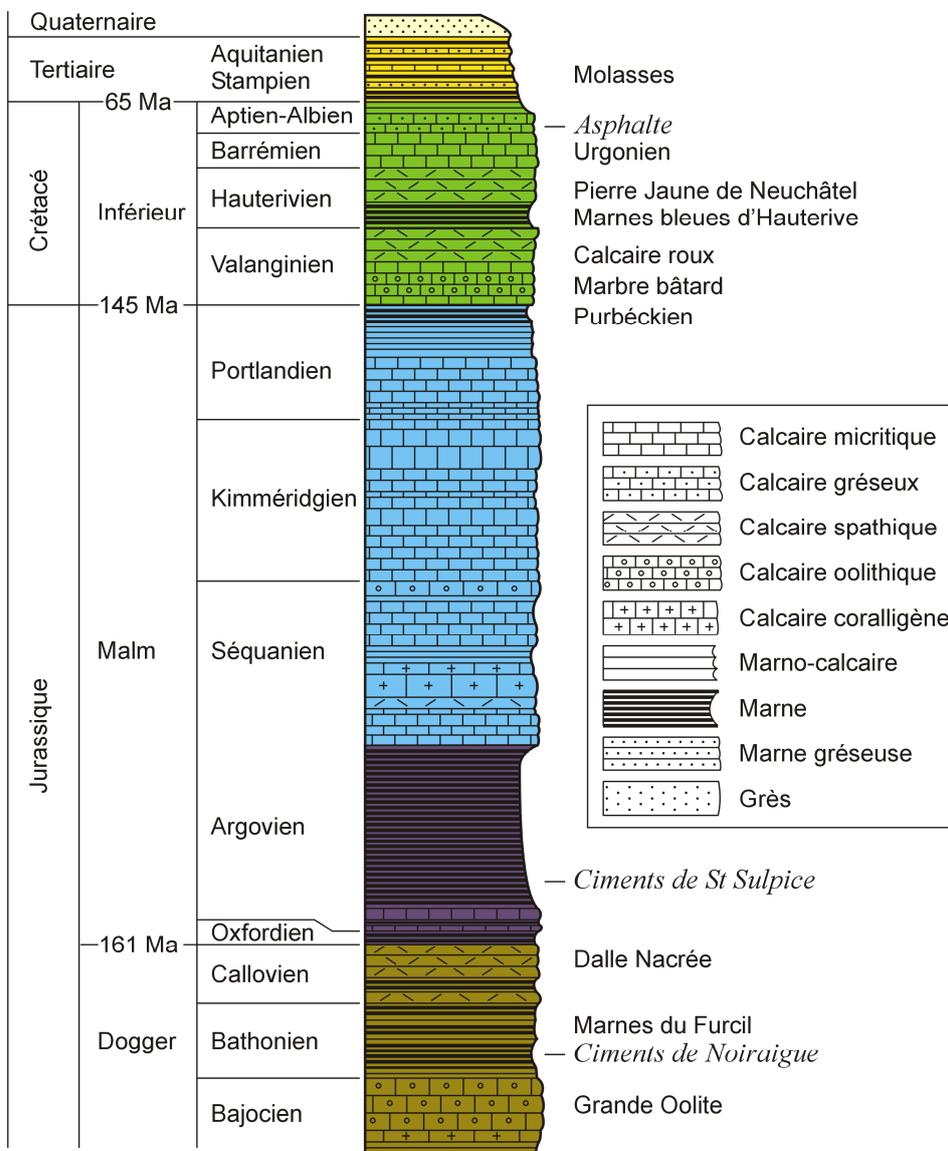


Figure 5.8. Colonne stratigraphique synthétique des roches sédimentaires affleurant dans le canton de Neuchâtel (Schaer et al., 2008).

Tectonique

Les poussées tardives de la compression alpine (~10 Ma) ont permis à la couverture de se désolidariser du socle et de se plisser. Cette déformation des roches sédimentaires n'a pratiquement pas eu lieu sous le bassin molassique sous l'effet de son propre poids. Malgré le fait que l'on parle du Jura plissé, la déformation dans le Jura neuchâtelois se décrit plutôt par une succession de chevauchements en pli sur rampe (fault-bend fold). De profondes cassures découpent la pile sédimentaire en larges écailles qui se chevauchent plus ou moins indépendamment. Mis à part quelques exceptions, ces chevauchements se propagent en direction du nord-ouest. La différence de compétence entre les calcaires rigides et les marnes plus ductiles entraîne une disharmonie du

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

plissement. Alors que les calcaires forment l'ossature des structures, les niveaux marneux s'adaptent et subissent localement des déformations très intenses. Les failles chevauchantes ont tendance à être plus horizontales dans les niveaux tendres et à se verticaliser dans les zones rigides.

Erosion

L'érosion qui s'exerce sur le paysage depuis le plissement jusqu'à aujourd'hui, opère avec une intensité maximale sur les hauteurs alors que les zones basses sont relativement protégées par leur couverture d'alluvions ou de sols protecteurs. Le phénomène de dissolution des calcaires ou de karstification agit dans les couches calcaires et se poursuit en profondeur selon le trajet de la circulation de l'eau. Les grottes sont le témoignage d'anciens systèmes de drainage souterrains.

5.3.2. Conditions hydrogéologiques

Les formations aquifères potentielles connues de Suisse occidentale (Fig. 5.9) sont situées dans le Crétacé, le Malm, le Dogger, le Lias, le Trias et dans la Molasse. Dans le cadre de cette étude, les aquifères de la Molasse et du Crétacé ont été écartés d'office. En effet ces formations qui peuvent se trouver à de très grandes profondeurs sous le plateau molassique suisse, ne se situent qu'en position superficielle dans le canton de Neuchâtel.

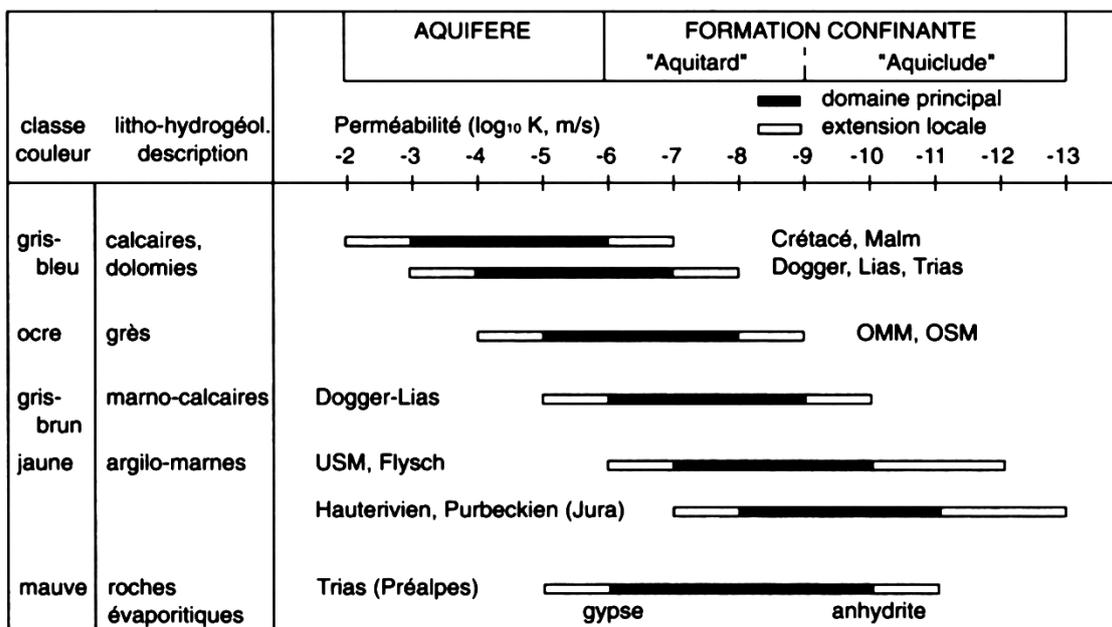


Figure 5.9. Domaines de conductivités hydrauliques des horizons hôtes des principaux aquifères de Suisse occidentale (Pasquier et al., 1999).

Malm

Bien qu'en position médiane, donc rarement à une température supérieure à 20°C, le Malm offre néanmoins des possibilités d'exploitation : en raison de sa grande épaisseur, des débits importants pourraient être disponibles.

Le Malm constitue l'aquifère le plus important du canton en terme de volume : composé des calcaires du Portlandien, du Kimméridgien et de l'Oxfordien moyen sa puissance atteint 400 m d'épaisseur. Il est compris entre les aquicludes du Purbéckien (toit) et de l'Argovien (mur).

La perméabilité régionale de cet aquifère peut être estimée à $10^{-3} m/s$ (Matthey, 1986).

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Le forage de Bevaix-Treytel, profond de 300 m et atteignant le Portlandien (Malm sup.) possède un débit de 75 l/s (Muralt, 1999). Ce forage produit une eau légèrement subthermale de 9 à 14°C avec une minéralisation faible de 0.4 g/l.

Dans le forage de Hermrigen, l'aquifère du Malm est situé entre 400 et 800 m de profondeur. Sa température moyenne est de 33°C et sa minéralisation atteint 2.4 g/l.

Formant l'ossature des anticlinaux neuchâtelois et de ce fait se trouvant à la surface dans ces zones hautes, le Malm subit d'importants effets de karstification, mais bénéficie d'une excellente recharge hydraulique (voir l'effet de la karstification au §5.3.4 : gradient géothermique).

Dogger

Moins connu que le Malm en région neuchâteloise, le Dogger peut fournir un aquifère géothermique potentiel intéressant en raison de son enfouissement plus profond. De plus, il ne subit pas autant l'effet de karstification. L'aquifère du Dogger comprend les calcaires spathiques de la Dalle Nacrée (Callovien), les calcaires de la Grande Oolithe supérieure et inférieure (Bathonien-Bajocien) ainsi que les calcaires à entroques (Bajocien). La puissance totale de cet aquifère mesure environ 300 m. Il est compris entre les aquicludes de l'Argovien (toit) et de l'Aalénien (mur).

Aucune mesure locale n'a permis de caractériser précisément cet aquifère. Sa perméabilité doit être légèrement inférieure à celle du Malm étant donné sa composition légèrement plus marneuse, de l'ordre de 10^{-5} m/s et les débits estimés seraient compris entre 2.5 et 40 l/s (Matthey, 1986).

L'aquifère du Dogger dans le forage de Hermrigen est situé entre 1150 et 1450 m de profondeur. Il atteint une température de 50°C et l'eau possède une minéralisation de 3 à 5 g/l. Deux forages de prospection d'eau à Muriaux dans le canton du Jura ont montré que l'aquifère du Dogger avait une perméabilité variant entre 10^{-6} et $5 \cdot 10^{-8}$ m/s (Hessenauer et al., 2001).

Muschelkalk

Le Muschelkalk n'affleure pas dans le canton. Il est bien connu dans l'Est du Jura et a été rencontré dans le forage de Hermrigen. Le Muschelkalk supérieur y mesure 79 m d'épaisseur et se situe à plus de 2000 m de profondeur. Il se compose de dolomies et de calcaires coquilliers. Il est limité par des couches évaporitiques, qui expliquent la forte minéralisation rencontrée. La température y atteint les 85°C et montre une minéralisation de plus de 250 g/l.

Le Muschelkalk supérieur a été rencontré dans les forages de Riehen (BS), Reinach (BL) et Schinznach Bad (AG) (localisation sur la figure 5.6). A Riehen, le débit de production atteint les 20 l/s et est utilisé pour un réseau de chauffage urbain (65°C et 18 g/l). Un débit de production de 8.3 l/s à Schinznach Bad permet d'alimenter le centre thermal (44°C et 2.15 g/l). A Reinach par contre le débit de 0.1 l/s n'a permis aucune exploitation (72°C et 46 g/l).

5.3.3. Conditions géologiques structurales

Afin de décrire au mieux la structure géologique du canton de Neuchâtel, dix coupes géologiques ont été construites. Leur orientation NNW-SSE a été choisie perpendiculairement aux structures. Leur espacement a été dicté par l'occurrence de zones de consommateurs potentiels. Le tracé des coupes est figuré sur la carte de l'annexe 5.3.

La construction de ces dix coupes a été réalisée à l'aide des cartes géologiques au 1:25'000 (voir références). Leur construction a été inspirée par des coupes géologiques existantes et des profils sismiques (Sommaruga, 1997). Si les données de surface sont fonction de la précision des levés cartographiques, les structures en profondeur sont nettement plus interprétatives. De manière

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

générale l'incertitude croît avec la profondeur et la limite du toit du socle a été déduite de la figure 5.7.

La construction d'une carte tectonique couvrant l'ensemble du canton a été entreprise afin de pouvoir y faire figurer l'orientation parfois interprétée des chevauchements et les accidents verticaux, éléments déterminants dans la recherche d'un site d'exploitation d'un APR. Un effort d'inventaire et de précision a été appliqué particulièrement à la surface du canton de Neuchâtel.

La carte tectonique (Fig. 5.10 et Annexe 5.1) montre d'un premier coup d'œil que la géologie de la surface du canton de Neuchâtel est dominée par le Malm supérieur (bleu ciel). Ceci ne favorise pas l'utilisation du Malm comme aquifère profond puisque majoritairement peu enfoui et sujet à la karstification. Le Dogger affleure dans le cœur des anticlinaux mais il ne représente qu'un faible pourcentage d'affleurement.

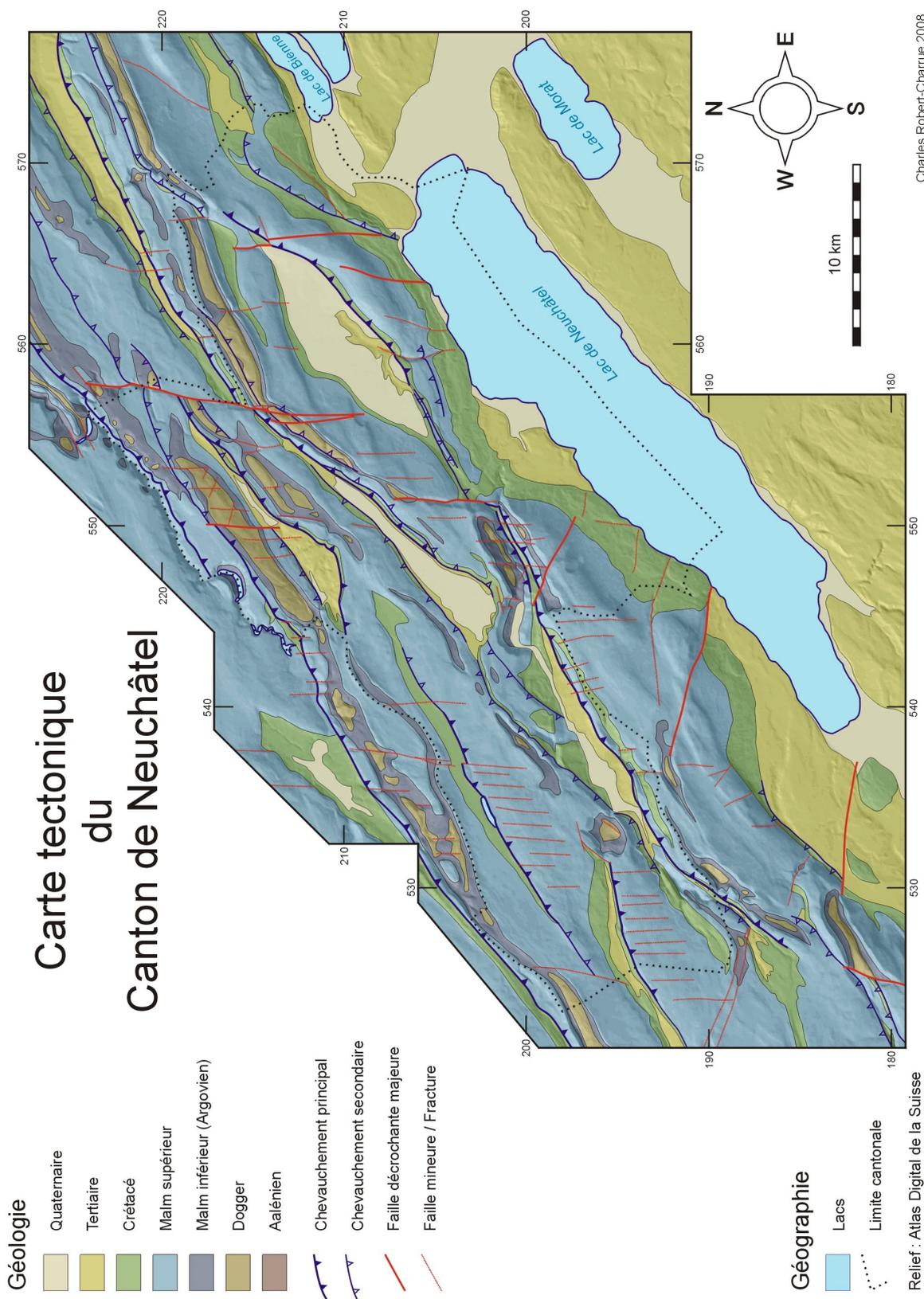
Les chevauchements ne sont pas latéralement continus. Bien que le raccourcissement total doit être identique, on observe quatre ou cinq chevauchements principaux dans la partie nord-est alors que la partie sud-ouest n'est affectée que par trois chevauchements.

Deux orientations d'accidents verticaux dominant la carte. Une première orientation, plus ou moins N-S dévoile des failles décrochantes sénestres, alors qu'une seconde orientation ENE-WSW suit des failles décrochantes dextres. Ces failles verticales cisailantes décalent apparemment les structures et les chevauchements et seraient de ce fait postérieures à la mise en place de ces structures. En fait il peut également s'agir de limites antérieures de part et d'autre desquelles la déformation a produit des structures indépendantes. Les deux orientations sont également soulignées par la fracturation plus discrète puisque ne provoquant pas de décalage. Dans le cas d'une étude préliminaire, une excellente approche de l'étude de la fracturation peut se faire par des images telles que des MNT (Annexe 5.2) ou pour plus de précision des images radar (Lidar).

Les coupes (Annexe 5.4) montrent la structure du sous-sol neuchâtelois. Les écaillés de couverture se chevauchent sur des rampes, majoritairement en direction du nord-ouest. Les rampes sont subhorizontales au niveau du décollement du socle et deviennent de plus en plus raides vers la surface. Au-dessus des rampes, la partie chevauchante forme un pli anticlinal. Ainsi la déformation en profondeur se caractérise par un important décalage principalement horizontal, alors qu'en surface, on assiste à la formation de vastes plis anticlinaux avec des chevauchements de faible décalage.

La structure du Jura neuchâtelois est davantage faite d'une succession de plis sur rampe (fault-bend fold) plutôt que d'une alternance d'anticlinaux et de synclinaux comme on peut l'observer ailleurs dans la chaîne. En général les anticlinaux de chevauchement sur rampe montrent des pendages élevés au niveau du front du chevauchement alors que les pendages à l'arrière du pli tendent à être plus faibles (plus ou moins parallèles à la rampe). Les pendages forts à l'arrière des chevauchements témoignent donc de la présence en profondeur d'une hétérogénéité dans le plongement de la rampe (marche d'escalier) et/ou de la formation d'un rétro-chevauchement. Certains chevauchements primaires subissent parfois le plissement d'un rétro-chevauchement (secondaire). C'est le cas notamment sur le premier bourrelet de la première chaîne des coupes 8, 9 et 10. Ceci explique l'actuel très fort pendage des failles chevauchantes (primaires).

Sur cette série de coupes, les anticlinaux donnent une impression de continuité latérale. On peut par exemple suivre l'anticlinal de la première chaîne du Jura avec une certaine régularité malgré des variations d'amplitude importantes. En fait, ces structures chevauchantes sont parfois indépendantes les unes des autres, séparées par des failles verticales décrochantes qui n'apparaissent que discrètement sur ce type de vue, d'où l'importance de la vue en carte. Ainsi le raccourcissement global de chaque coupe est constant à l'échelle de la chaîne, mais la déformation n'est pas toujours latéralement identique à une échelle locale.



Charles Robert-Charrue 2008

Figure 5.10. Carte tectonique du canton de Neuchâtel (voir Annexe 5.1).

5.3.4. Conditions géothermiques

Le gradient géothermique décrit l'augmentation de la température avec la profondeur. En compilant les différentes données sur une carte, il est possible de mettre en relation les variations du gradient géothermique en fonction de la localisation et de fait de sa géologie. L'anomalie positive du fossé rhénan qui atteint des gradients de plus de 40°C/km n'affecte pas la région neuchâteloise (Bonnard, 1984). Ainsi on constate que le canton bénéficie d'un gradient géothermique normal de l'ordre 30°C/km ou légèrement inférieur (26.8°C/km à Martel-Dernier). Plus à l'Ouest, la région d'Yverdon-les-Bains est, elle aussi, affectée par une anomalie positive avec des gradients atteignant ou dépassant 35°C/km. Ces anomalies sont certainement provoquées par des remontées d'eaux profondes le long d'accidents tectoniques sub-verticaux.

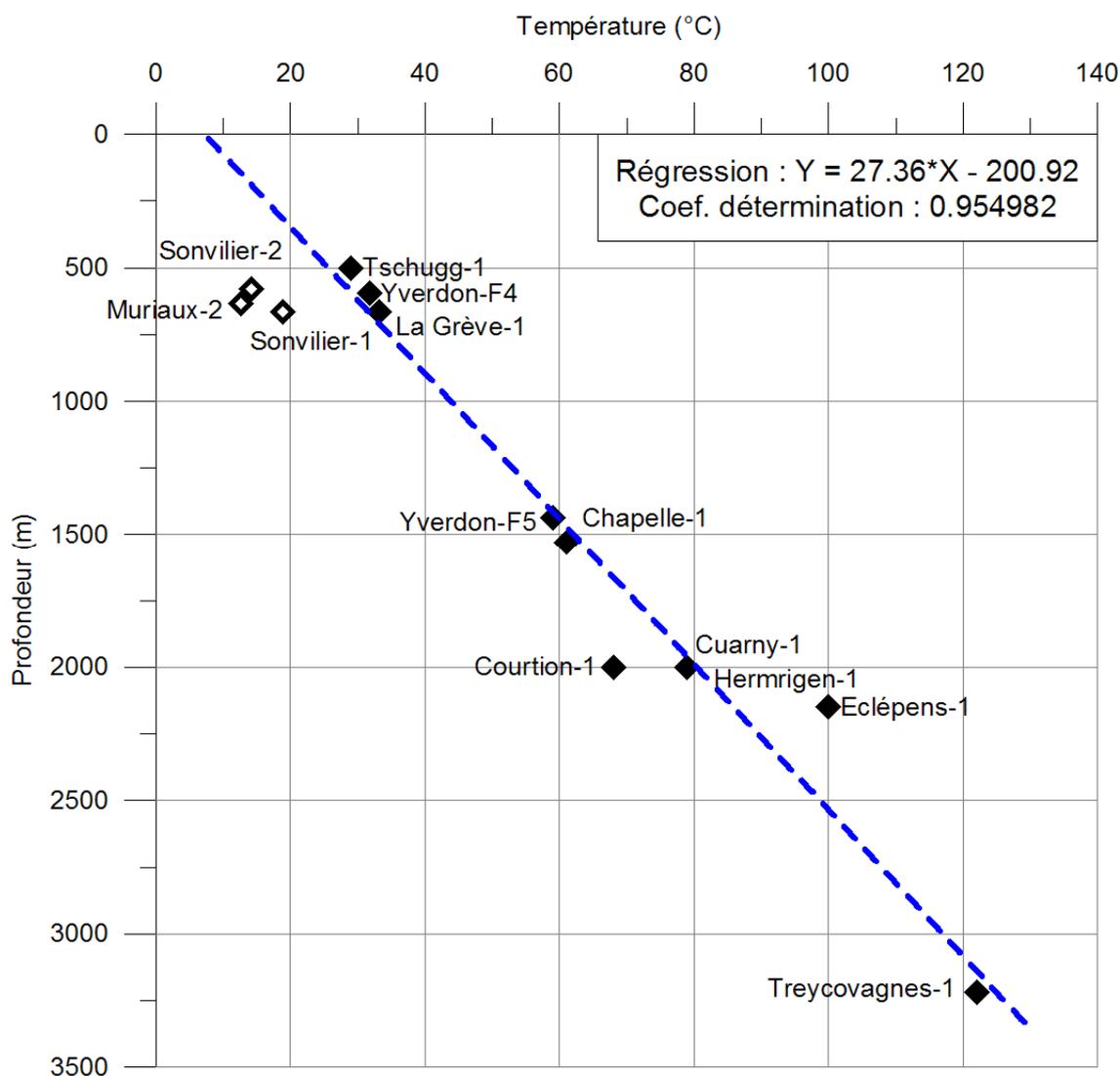


Figure 5.11. Température maximale mesurée dans une sélection de forages profonds. Les forages représentés par un losange vide n'ont pas été pris en compte pour la régression, car ils ont vraisemblablement subi un refroidissement lié aux circulations karstiques (modifié d'après Vuataz et al., 2005).

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Tableau 5.7. Liste des principaux forages profonds réalisés dans les régions limitrophes du canton de Neuchâtel.

Nom	Concise 1	Essertines 1	Treycovagnes 1	Hermrigen 1	Tschugg 1	Yverdon F4	Yverdon F5
Canton	VD	VD	VD	BE	BE	VD	VD
Cote (m)	440	661	473	542	462	435	435
Coordonnées	546340 189900	539775 173490	536136 180273	584603 214885	572610 207910	539698 180299	539683 180220
Année	1926	1963	1978	1982	1976	1980	1998
Prof. (m)	240	2936	3221	2198	704	598	1479
T° 500 m	--	39	32	39	--	29	29.3
T° 1000 m	--	57	52	53	45.5	--	43.5
T° 2000 m	--	94	84	79	--	--	--
T° X m	--	103	122	--	--	31.7	59
Prof. X m	--	2600	3221	--	--	597	1436
T° moyenne de l'air	--	8	8.5	8.5	8.5	9	9
Gradient moyen (°C/km)	--	36.2	34.9	34.8	36	36.3	34.1
Gradient profond (°C/km)	--	28.8	31.5	26	--	27.8	35.6
Profondeur top Crétacé	220	337	0	395	509	35	18
Profondeur top Malm	--	531	177	403	638	250	188
Profondeur top Dogger	--	1346	894	1078	--	--	1022
Profondeur top Lias	--	1905	1364	1550	--	--	--
Profondeur top Trias	--	2302	1672	1727	--	--	--
Profondeur top substratum	--	--	2681	--	--	--	--
Géologie en fond de trou	Crétacé Urgonien	Trias Keuper	Permien	Trias Muschelkalk	Malm Portlandien	Malm	Dogger Bajocien

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

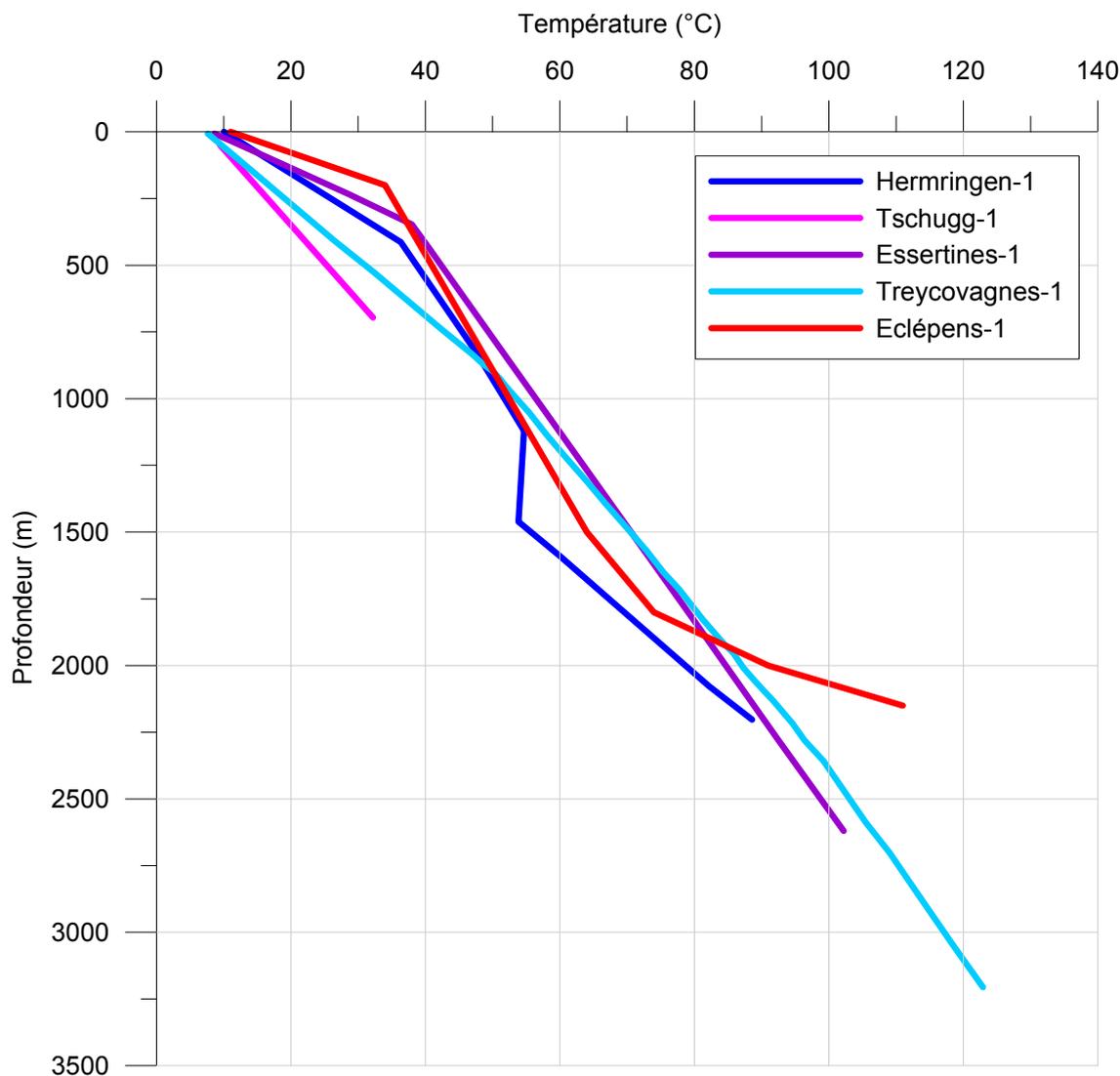


Figure 5.12. Profils de température dans une sélection de forages profonds des cantons de Berne et Vaud (compilation d'après Vollmayr, 1983).

Les forages représentés dans les figures 5.11, 5.12 et le tableau 5.7 montrent des gradients aux alentours de 30°C/km. Géologiquement ces forages sont situés au pied du Jura sur le plateau molassique. Leur conditions hydrogéologiques de leurs aquifères sont différentes que celles rencontrées dans le haut du canton de Neuchâtel. En effet, ils se trouvent protégés par la Molasse des écoulements karstiques rapides.

L'importante surface de Malm rencontrée dans la région neuchâteloise subit les effets des circulations karstiques qui changent considérablement les conditions géothermiques locales. La figure 5.13 montre le comportement des isothermes dans un massif karstique. Au sommet de la zone saturée correspond une température de 7°C. Sous le sommet de la zone saturée se trouve un réseau de conduits. Les temps de transit de l'eau y sont très brefs et ne permettent pratiquement aucune recharge thermique. Le gradient géothermique y est donc faible voire nul. Ce n'est que sous la base du réseau de conduits que le gradient devient normal. La problématique réside donc dans la connaissance de l'ampleur du réseau de conduits karstiques.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

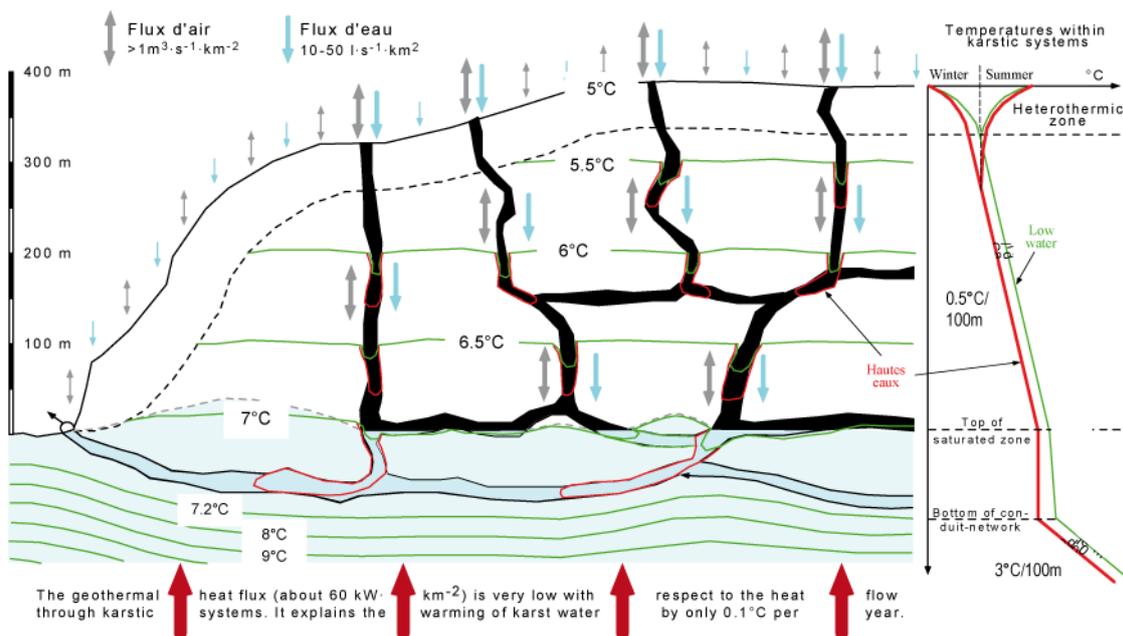


Figure 5.13. Modèle général des isothermes dans un massif karstique (Jeannin, 2006).

Le positionnement de la zone saturée n'est pas simple et peut varier spatialement. Par exemple, la source du Torrent située sur le flanc nord du Val-de-Ruz, entre Dombresson et Chézard, montre un battement important dans les calcaires du Malm. A la fonte des neiges, elle agit comme une importante résurgence alimentant le Seyon, mais en période de basses eaux, son conduit peut être spéléologiquement exploré jusqu'à une profondeur de -110 m (communication orale, Urs Eichenberger, ISSKA).

En ce qui concerne le réseau de conduits, l'étude hydrogéologique du bassin de la Serrière (Mathey, 1976) constitue un excellent exemple. La limite du bassin d'alimentation de la Serrière se situe principalement au nord du Val-de-Ruz, dans le Malm, de Tête de Ran au Mont d'Amin. Malgré l'enfouissement du Malm sous les sédiments tertiaires du Val-de-Ruz à une profondeur estimée de 500 m , la température moyenne à la source de la Serrière est de 8.8°C . Avec un gradient géothermique normal de $30^\circ\text{C}/\text{km}$ et le sommet de la zone saturée à 7°C , la température théorique à la source devrait donc être de 22°C . Le débit fort et les temps de transit courts ne permettent pas à l'eau de se réchauffer de manière significative. Ceci montre que l'influence du réseau de conduits est extrêmement importante et réduit fortement, la possibilité d'utiliser le Malm comme aquifère profond à des fins géothermiques.

A l'extrémité de l'Est du Jura, le tunnel ferroviaire du Hauenstein (Annexe 5.5) offre un exemple encourageant. Au centre du tunnel, sous environ 400 m de roches, des températures de plus de 25°C ont été mesurées. Certes, les structures géologiques y sont quelque peu différentes et le flux géothermique régional est supérieur à celui du canton de Neuchâtel, mais les lithologies sont identiques.

5.3.5. Consommateurs potentiels de chaleur

La carte des consommateurs potentiels de chaleur a été dressée selon la répartition géographique des zones construites actuelles (vert foncé). Un périmètre de 1 km a été défini autour des zones d'habitation et d'activité (vert clair). Cette distance de 1 km correspond à l'éloignement maximum défini entre un puits de production APR et le premier consommateur, afin d'optimiser un projet de distribution de chaleur (Fig. 5.14).

Les zones en plein essor comme par exemple le Crêt du Locle ou des zones appelées à s'urbaniser devraient être ajoutées ultérieurement à cette carte. Le but de cette carte est de pouvoir comparer les ressources géothermiques avec la répartition géographique actuelle des consommateurs potentiels et non d'anticiper l'urbanisation. Pour tout nouveau projet pouvant utiliser l'énergie géothermique, il sera nécessaire de le positionner par rapport aux zones de potentiel géothermique.

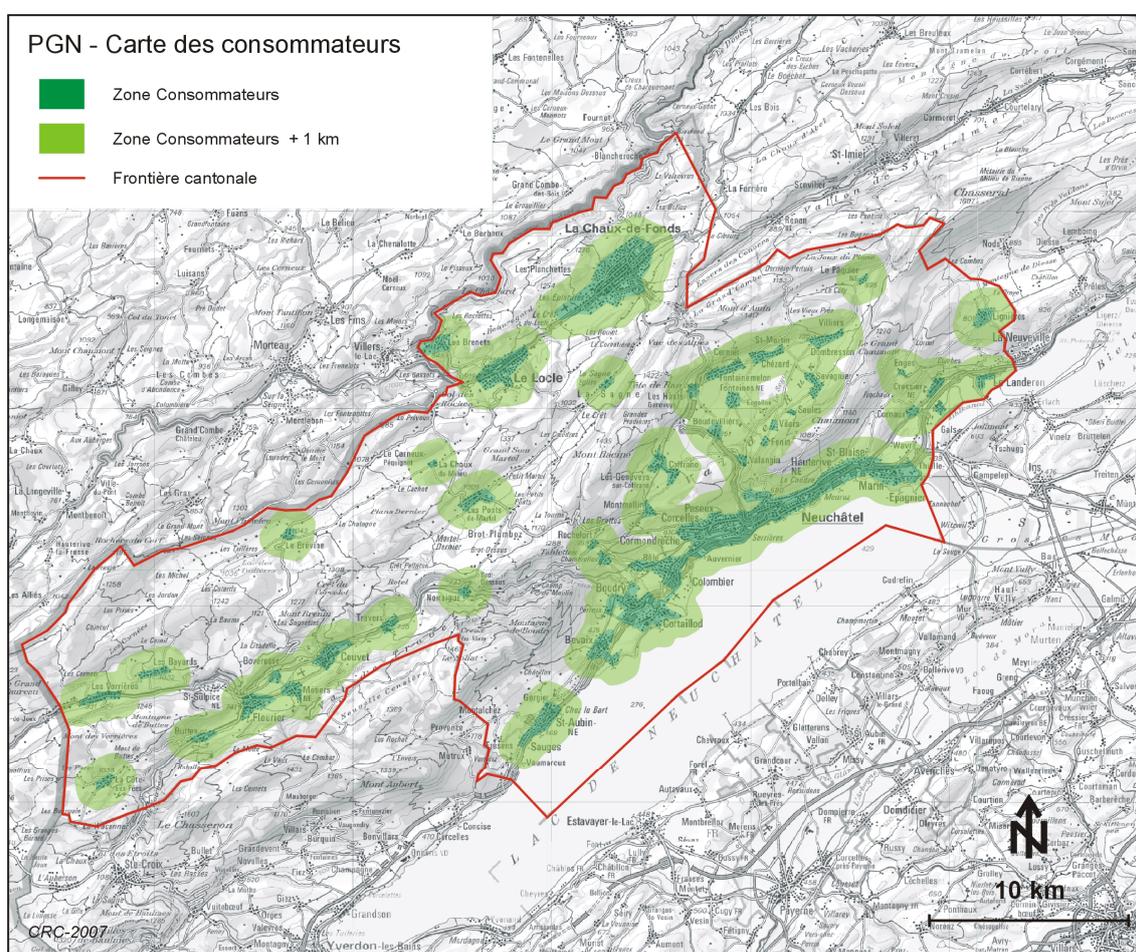


Figure 5.14. Carte des consommateurs potentiels actuels du canton de Neuchâtel.

5.4. Résultats

Trois formations géologiques ont été identifiées dans le canton de Neuchâtel comme pouvant être des aquifères profonds intéressants. Il s'agit du Malm supérieur, du Dogger et du Muschelkalk supérieur. Ces trois formations calcaires ont des perméabilités intéressantes permettant de supposer des débits suffisant pour une exploitation géothermique. La perméabilité régionale peut être encore supérieure si les roches sont fracturées. De plus, le long d'accidents tectoniques verticaux des remontées d'eaux chaudes pourraient être favorisées.

Du point de vue de leur minéralisation les fluides des aquifères du Malm et du Dogger ne posent pas de problèmes techniques et leur exploitation pourrait se faire en puits unique, sous réserve des autorisations nécessaires. L'exploitation des eaux du Muschelkalk en revanche nécessitera un puits de réinjection, étant donné la forte minéralisation qui caractérise cet aquifère.

Afin de délimiter sur une carte les zones géothermiques potentielles, une température de 7°C et un gradient de 30°C/km ont été appliqués aux coupes selon l'exemple de la coupe N° 7 (Fig. 5.15). Le Malm étant peu profond, ses réservoirs ont été définis par une température atteignant un minimum de 20°C. Les réservoirs du Dogger ont été définis à 30°C minimum. Il a été ainsi possible de dresser la carte des APR du canton (Fig. 5.16) en extrapolant latéralement les résultats de chacune des dix coupes et en tenant compte des accidents tectoniques majeurs. Il faut noter que cette carte reflète des conditions géothermiques optimales qui ne tiennent compte ni de l'abaissement de la zone saturée, ni d'une concentration de conduits karstiques.

Sur la figure 5.15, les isothermes en pointillé permettent de voir l'influence d'un abaissement de la zone saturée sur le volume des réservoirs potentiels. L'effet d'un réseau de conduits (non représenté) serait encore plus important.

Les surfaces données sur la carte APR (Fig. 5.16) définissent simplement une zone dans laquelle on trouvera en profondeur le réservoir à une température minimale donnée. En se référant à la coupe (Fig. 5.15 et Annexe 5.6), on s'aperçoit qu'il existe dans ces zones des possibilités d'obtenir des températures supérieures. Généralement, les conditions sont les meilleures à l'extrême sud-est des zones en bas de rampe. Cependant, ces zones en bas de rampe sont pratiquement systématiquement chapeautées par l'anticlinal du chevauchement plus méridional. Ceci induit que, pour atteindre ces zones, la longueur du forage doit être augmentée. Quoiqu'il en soit, ces zones de bas de rampe surmontées d'un anticlinal ne constituent pas des régions à forte densité de consommateur de chaleur.

La carte APR superposée à la carte des consommateurs (Fig. 5.19 et Annexe 5.8) montre que chaque commune bénéficie potentiellement de ressources géothermiques en aquifères profonds. L'urbanisation dans le canton de Neuchâtel est liée à la présence d'eau. Les agglomérations importantes se situent dans les vallées. Sur les zones hautes (anticlinaux) souvent karstifiées, ne se trouvent que de petits hameaux bénéficiant généralement d'une petite source.

- Val-de-Travers : les communes y sont situées au-dessus d'aquifères profonds. Les régions où les aquifères sont les plus intéressants sont situées sous l'anticlinal de la première chaîne (Chasseron – Creux du Van – Montagne de Boudry), mais cette zone est dépourvue de consommateurs potentiels.
- Val-de-Ruz : les communes situées au sud-est sont sur des aquifères profonds en bas de rampe, alors que les communes du Nord-ouest sont situées sur des aquifères en haut des rampes. Dans cette dernière situation, un important effet du karst est à prévoir, rendant vraisemblablement impossible une exploitation géothermique profonde.
- Littoral : les aquifères sont au plus profond au large des rives, ce qui conduirait pour un projet d'exploitation géothermique à réaliser des forages off-shore sur le Lac de Neuchâtel.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

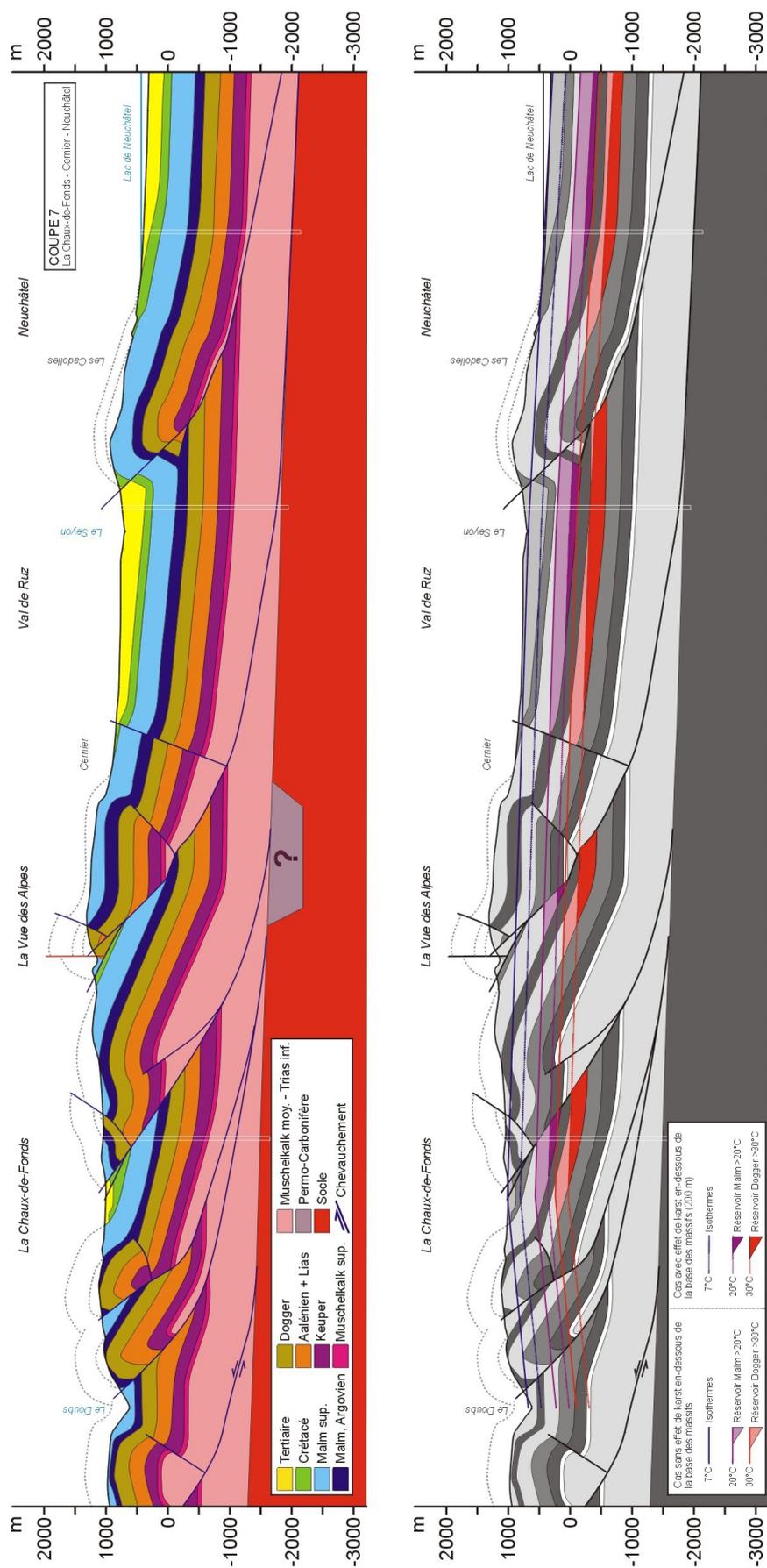


Figure 5.15. Coupe géologique N° 7 La Chaux-de-Fonds – Cernier – Neuchâtel ;
En bas : Coupe géologique avec gradient géothermique et localisation des APR du Malm et du Dogger (voir Annexe 5.6).

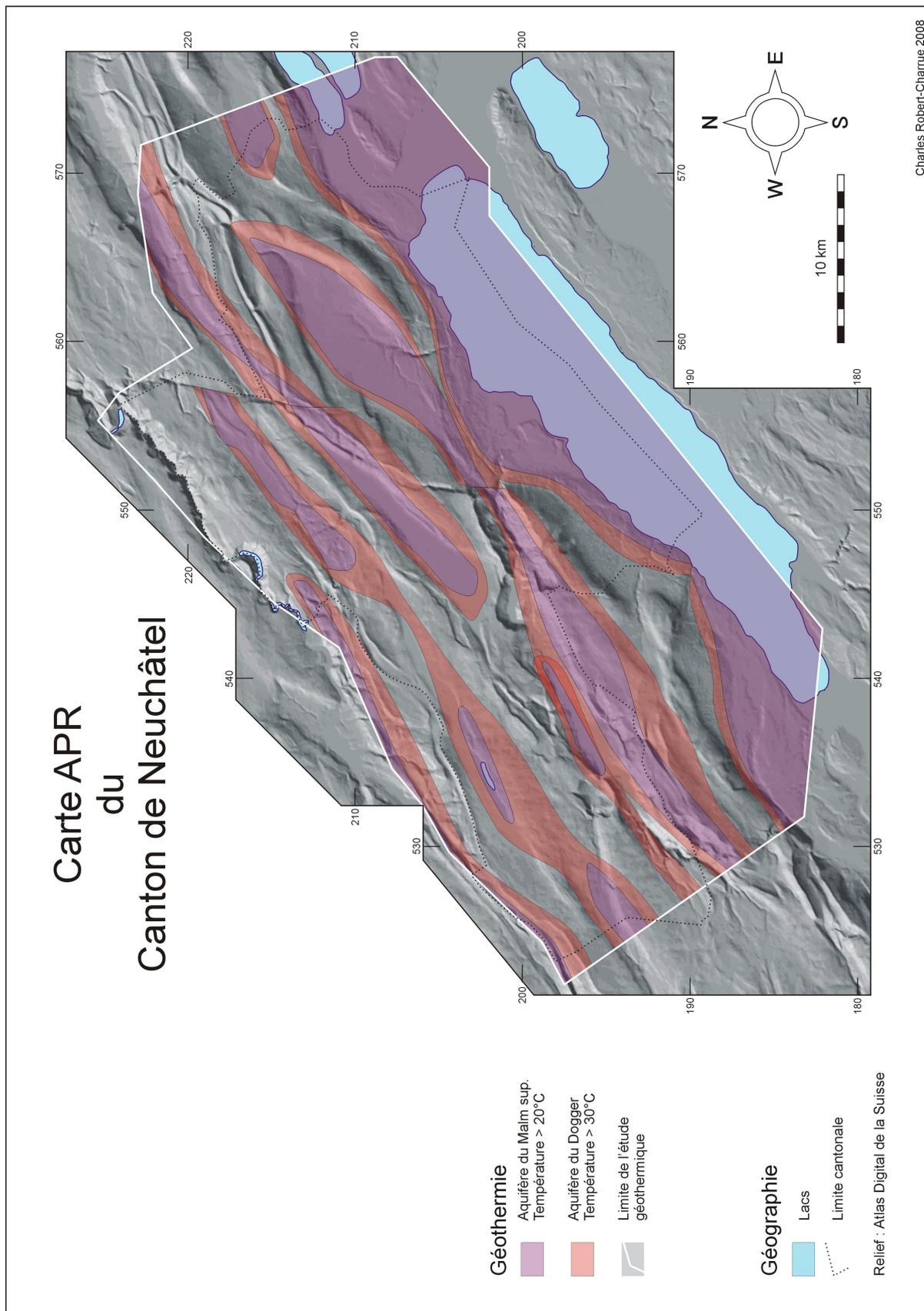


Figure 5.16. Carte théorique des aquifères profonds du canton de Neuchâtel. Avec la base des massifs définie à 7°C et un gradient géothermique de 30°C/km (voir Annexe 5.7).

5.5. Potentiel géothermique des aquifères profonds

Etant donné le vaste choix que donne la carte du potentiel APR dans le canton de Neuchâtel, trois sites caractéristiques sur la coupe N° 7 (Fig. 5.16) ont été choisis, afin d'évaluer leur potentiel géothermique. Cette sélection, permet encore l'exploitation d'aquifères même en cas d'abaissement de la zone saturée.

La figure 5.17 donne les profondeurs des différents aquifères. Les conditions géothermiques appliquées dans ces cas sont une température de 7°C à la base des massifs et un gradient géothermique de 30°C/km. Les flèches représentent l'effet de l'abaissement de la zone saturée par le karst et permet ainsi de déterminer une nouvelle profondeur de l'aquifère. Ces exemples ne prennent pas en compte l'effet d'éventuels réseaux de conduits karstiques profonds, qui abaisseraient davantage l'isotherme des 7°C.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

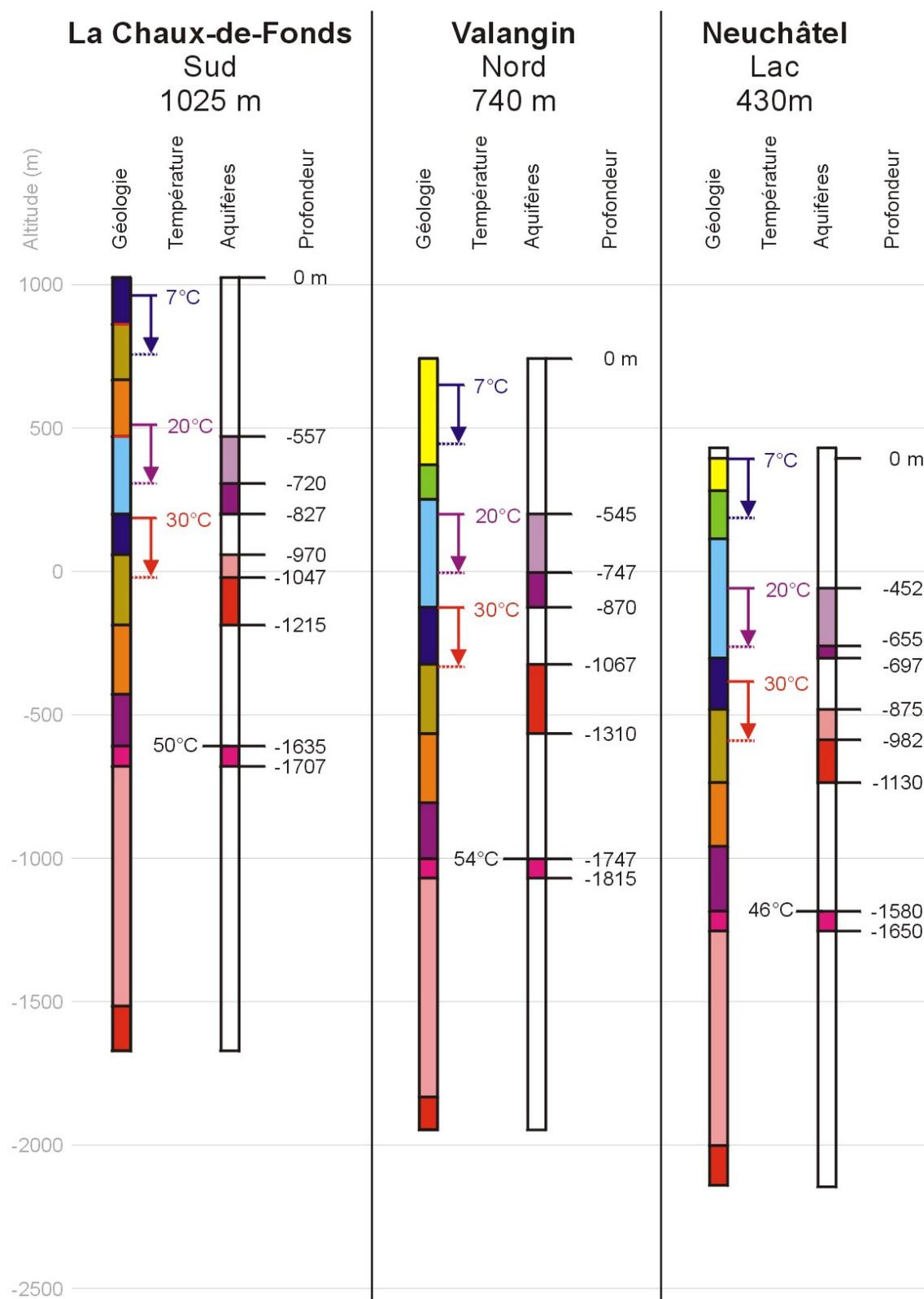


Figure 5.17. Forages hypothétiques dans les régions de La Chaux-de-Fonds, Valangin et Neuchâtel (légende des couleurs selon la figure 5.16).

Tableau 5.8. Puissance géothermique estimée pour les sites de Marin-Epagnier, Neuchâtel, Valangin et La Chaux-de-Fonds, pour trois aquifères profonds.

	Site de forage	Marin-Epagnier	Neuchâtel	Valangin	La Chaux-de-Fonds
	Altitude moyenne (m)	450	430	740	1025
	Gradient géothermique moyen estimé (°C/km)	30	30	30	30
Aquifère du Malm	Profondeur estimée du toit (km)	0.35	0.45	0.55	0.56
	T estimée à 100 m dans l'APR (°C)	20	23	24	25
	ΔT exploitable dans l'APR, (°C)	10	13	14	15
	Puissance géothermique (MWth) estimée pour un débit de 10 l/s	0.4	0.6	0.6	0.6
Aquifère du Dogger	Profondeur estimée du toit (km)	0.75	0.87	1.07	0.97
	T estimée à 100 m dans l'APR (°C)	34	36	39	37
	ΔT exploitable dans l'APR (°C)	24	26	29	27
	Puissance géothermique (MWth) estimée pour un débit de 10 l/s	1.0	1.1	1.2	1.1
Aquifère du Muschelkalk	Profondeur estimée du toit (km)	1.78	1.50	1.75	1.63
	T estimée à 50 m dans l'APR (°C)	53	46	54	50
	ΔT exploitable dans l'APR (°C)	33	26	34	30
	Puissance géothermique (MWth) estimée pour un débit de 10 l/s	1.4	1.1	1.4	1.3

Remarques :

- Un gradient géothermique uniforme de 30°C/km a été utilisé par défaut pour tous les sites et pour les trois aquifères, en l'absence de données locales disponibles. Il est très vraisemblable que pour les sites du littoral, le gradient géothermique soit sensiblement plus élevé (env. 35 °C/km).
- Le niveau de température de futures exploitations des aquifères du Malm et du Dogger nécessitent le couplage à une pompe à chaleur.
- Les températures estimées ne tiennent pas compte d'un éventuel abaissement de la zone saturée ni d'une concentration de conduits karstiques.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Etant donné les faibles températures des aquifères du Malm et du Dogger, une température de réinjection à 10°C a été considérée, ce qui implique l'utilisation d'une PAC. Pour l'aquifère du Muschelkalk la température de réinjection a été fixée à 20°C.

L'aquifère du Malm étant très épais, le débit théorique exploitable d'un nouveau forage serait certainement supérieur aux 10 l/s (Tabl. 5.8). Si le débit est doublé à 20 l/s la puissance géothermique le sera aussi.

Les résultats identiques obtenus pour les trois sites, tant pour l'aquifère du Malm que celui du Dogger, proviennent du fait que le gradient géothermique et la température ont été fixé arbitrairement à 30°C/km et 7°C à la base du massif. De plus ces forages prévisionnels se trouvent dans des agencements géologiques similaires.

Basé sur l'exemple du forage de Bevaix – Treytel, le Malm pourrait fournir dans le meilleur des cas, une température exploitable de 4°C (captage à 12°C et rejet à 8°C). Avec un débit vraisemblable de 40 l/s, une telle exploitation fournirait une puissance géothermique de 0.66 MWth et ne nécessiterait pas de forage profond.

L'aquifère du Muschelkalk est évidemment le plus intéressant par sa température plus élevée, mais il nécessite un forage plus profond et un puits de réinjection donc l'investissement pour une telle exploitation sera nettement plus élevé.

5.6. Conclusions

L'absence de manifestations thermales en surface n'exclut évidemment pas l'exploitation du potentiel géothermique des APR dans le canton de Neuchâtel. Néanmoins, la structure géologique complexe et le phénomène de karstification ne permettent pas d'envisager la réalisation d'une exploitation sans une phase de prospection géologique et hydrogéologique très détaillée.

La cible APR privilégiée est indéniablement le Dogger avec la possibilité de se rabattre sur le Malm en cas d'échec. L'aquifère du Malm ne justifie toutefois pas forcément l'investissement d'un forage profond pour son exploitation, en raison du refroidissement causé par le karst et les réseaux de conduits sur les conditions géothermiques. L'aquifère du Muschelkalk supérieur n'est pas à exclure, mais ses caractéristiques géothermiques sont très mal connues malgré l'existence de quelques forages de prospection pétrolière. Un projet géothermique captant l'aquifère du Trias nécessiterait la réinjection totale du fluide, donc la réalisation d'un doublet.

Dans le cas d'une température trop faible mais d'un débit élevé, l'installation d'une PAC peut être envisagée. Dans le cas d'un trop faible débit, on peut néanmoins prévoir l'utilisation du forage en l'équipant d'une sonde géothermique profonde.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

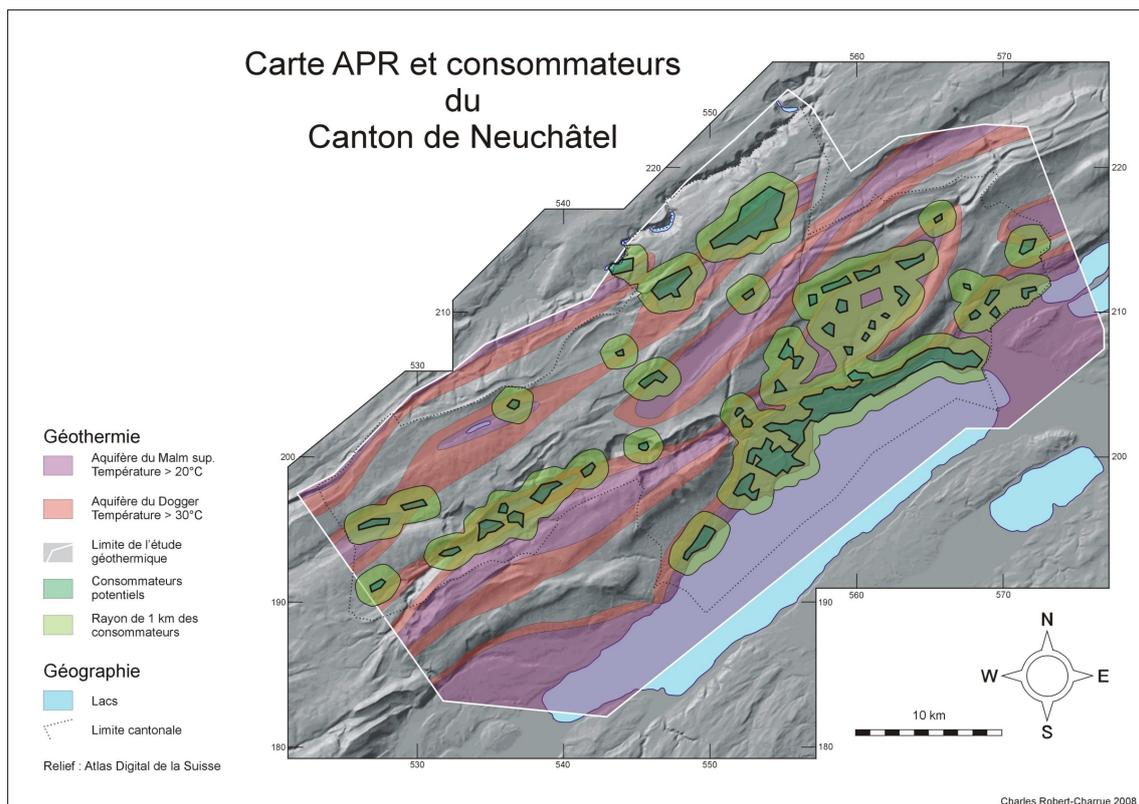


Figure 5.18. Carte des consommateurs potentiels combinée au potentiel géothermique théorique du Malm et du Dogger (voir Annexe 5.8).

La carte des consommateurs combinée au potentiel géothermique (Fig. 5.18) ne doit pas être utilisée de manière unilatérale. On cherchera plutôt à atteindre les structures de bas de rampe, généralement le plus au Sud-est possible, et à éviter les effets du karst et des réseaux de conduits. Pour assurer une meilleure perméabilité régionale les zones hautement fracturées constitueront un avantage. Les accidents verticaux profonds permettront éventuellement l'interception de remontées de fluides chauds.

En cas de développement d'un site résidentiel ou industriel entièrement nouveau, il existe des zones où l'aquifère du Dogger serait plus profond et donc plus chaud.

5.7. Références

- ADEME – BRGM, 2004. La géothermie, Collect. Les enjeux des géosciences. Val de Loire Impression, 44 pp.
- AGEPP 2007. Projet de géothermie profonde à Lavey (VD). Rapport de phase B1, OFEN, annexes : 187 pp.
- Motor Columbus, 1982. Commentaires à la carte tectonique d'ensemble du pied sud du Jura de Genève à Dielsdorf (ZH), rapport NEFF 165 IB 002.
- Motor Columbus, 1984. Geothermie Jura-Südfuss, Chap. 3 : Lokale Geologie, CHYN, rapport NEFF 165 IB 043.
- Technoservice Engineering SA, 2004. Centrale géothermique chauffage à distance - Centrale de refroidissement à distance sur le site de Marin-Epagnier, rapport pour le Service cant. de l'énergie, Neuchâtel.
- Baujard C., Signorelli S. & Kohl T., 2006. Evaluation du potentiel geothermique suisse, rapport 2006, Commission Suisse de Géophysique, 18 pp.
- Bianchetti G., 2002. Opération géothermique de Lavey-les-Bains (VD). CESLA S.A. - Réalisation du forage géothermique profond P600 et exploitation de la ressource énergétique par pompage dans les puits P600 et P201 (juin 1997 – décembre 2002). Rapport final, OFEN, 46 pp.
- Bitterli T., 1990. The kinematic evolution of a classical Jura fold : a reinterpretation based on 3-dimensional balancing techniques (Weissenstein Anticline, Jura Mountains, Switzerland). *Eclogae geol. Helv.* 83/3, p. 493-511.
- Boem J.-M., Flury F. & Rieben C., 2006. Recherche d'eau par forages profonds dans le Dogger (Grande Oolithe) du Jura tabulaire à Courtemaîche (JU, CH), *Bull. angew. Geol.* 11/1, p. 19-34.
- Bonnard E., 1984. Geothermie Jura-Südfuss, Champ thermique regional, ETHZ, rapport NEFF 165 IB 044.
- Borreguero M., 1996. Projet d'exploitation géothermique de Marin, Etude préliminaire, GEOREPONSES.
- Buonasorte G., Cataldi R. & Passaleva G., 2007. Geothermal Development In Italy : From Present To Future, Proc. European Geothermal Congr. 2007, Unterhaching, Germany, May 2007.
- Burger A. & Gohran H.L., 1986. Etude des ressources géothermiques suisses. Prospection géothermique le long du pied Sud du Jura. Rapp. de recherches NEFF N° 165, in *Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, 6 : 91-198.
- De Bosset C., >1965. Sondages profonds 1963-1965 (du canton de Neuchâtel), Archives CHYN 1020, 54 pp.
- Fehlmann Travaux Hydrauliques S.A., 1992. Impact d'un chantier de forage géothermique. Notice interne, 3 pp.
- Flury F., Allemann R. & Lachat R., 1991. Recherche d'eau par forages à Delémont. Résultats de la phase d'exploration. *Revue gwa 12/91 de la société suisse de l'industrie du gaz et des eaux*, Zurich, p. 841-849.
- Flury F., Matthey B. & Rieben C., 1991. Nouvelles ressources en eau et aspects géothermiques. Résultats de trois forages à 420 m de profondeur dans le bassin de Delémont. *Ingénieurs et architectes suisses N° 24*, p. 487-490.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Geister-Frantz M., 1986. Données géothermiques des aquifères du Dogger au pied sud du Jura suisse. Bull. CHYN, n°7, p. 31-47.
- Goldbrunner J., 2001. Geothermieprojekt Simbach-Braunau (D/A). Bull. Geothermie CH, 30 : p. 10-11.
- Goldbrunner J., 2005. State, Possible Future Developments in and Barriers to the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy in Austria – Country Update, Proc. World Geothermal Congr. 2005, Antalya, Turkey, April 2005.
- Gorhan H.L. & Griesser J.C., 1988. Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad - Baden. Rapp. de recherches NEFF, in Mat. Géol. Suisse, sér. Hydrol., Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 76, 73 pp.
- Griesser J.-C., 1983. Geothermie Jura-Südfuss, Zusammenstellung der Zugaenglichen geophysikalischen Literatur zwischen Yverdon und Genf, ETHZ, NEFF 165 IB 021.
- Griesser J.-C., 1984. Geothermie Jura-Südfuss, Geophysikalische Untersuchungen, ETHZ, NEFF 165 IB 046.
- Hadorn J.-C., 1996. Centre thermal cantonal de Lavey-les-Bains – Projet de forage géothermique. Etude technico-économique de l'utilisation de la ressource. Variantes d'avant-projet à l'appui de la demande de garantie au risque de forage de l'OFEN. Dossier pour la requête auprès de l'OFEN pour la couverture du risque de forage géothermique, 56 pp., non publié.
- Häring M.O., Leimer Th. & Wahl S., 2002. Wärme-Contracting, Geothermie-Doublette, Siedlung Solar One, Itingen, BL. DIS-Projekt Nr : 26'745, Auftrag des Bundesamtes für Energie.
- Hessenauer M., Rieben C. & Flury F., 2001. Prospection d'eau souterraine par forages profonds à Muriaux (JU), Bull. Geol. Appl. 6/2, p. 147-164.
- Jaffé F., Benoit F. & Roux D., 1976. Low enthalpy geothermal energy in Switzerland : the thermal spring of Lavey and its utilisation. Int. Congr. Thermal Waters, Geothermal Energy, Vulcanism Mediterranean Area, Athens, 1 : 268-274.
- Jaffé F.C., 1984. Caractéristiques géothermiques du forage pétrolier de Hermingen (BE), Départ. de minéralogie, Uni GE, NEFF 165 1B 055.
- Jenny J., Burri J.-P., Muralt R., Pugin A., Schegg R., Ungemach P., Vuataz F.-D. & Wernli R., 1995. Le forage géothermique de Thônex (Canton de Genève) : Aspects stratigraphiques, tectoniques, diagénétiques, géophysiques et hydrogéologiques. Eclogae geol. Helv. 88/2, p. 365-396.
- Jeannin P.-Y., 2006. Question et problèmes rencontrés lors de l'implantation de SGV en terrain calcaire karstifié, cours bloc de formation continue en géothermie basse température, Neuchâtel, Septembre 2006
- Király L., 1973. Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel, suppl. du Bull. de la SNSN tome 96, 1973, IGUN, CHYN.
- Laplaige P., Jaudin F., Desplan A. & Demange J., 2000. The French geothermal experience : review and perspectives. Proc. World Geothermal Congr., Kyushu-Tohoku, June 2000 : 283-295.
- Laplaige P., Lemale J., Decottegnie S., Desplan A., Goyeneche O. & Delobelle G., 2005. Geothermal Resources in France – Current Situation and Prospects, Proc. World Geothermal Congr., Antalya, Turkey, April 2005.
- Mathey B., 1976. Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel. 336 pp.
- Matthey B., 1986. Recherche d'un site favorable, Gisement géothermique du Littoral Neuchâtelois Possibilité d'Exploitation à des Fins Thermales ou Géothermiques. Rapport pour l'office féd. de l'énergie.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Matousek F. & Graf H., 1998. Trinkwasser und Wärme aus 300 m Tiefe. GWA 1/98.
- Meury P. & Wacker C., 1981. Etude géologique du pied du Jura vaudois et français en vue de l'implantation de forages géothermiques, OFEE
- Monbaron M., 1984. Geothermie du pied sud du Jura, le problème de l'anomalie géothermique du fossé rhénan méridional et de sa prolongation à travers le Jura, CHYN, NEFF 165 IB 058.
- Mornod L., Bertrand J. & Barraud J.-P., 1970. Construction du premier puits profond à grand diamètre dans le karst jurassien suisse à Moutier. Revue suisse pour l'Industrie du gaz, l'alimentation en eau et l'assainissement. N° 10, p. 279-287.
- Muralt R., 1999. Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains). Matériaux pour la Géologie de la Suisse, série Géotechnique, 82 : 236. pp.
- NEFF, 1980. Geothermische Prospektion im Raum Koblenz – Wildegg – Dielsdorf. Schlussbericht, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel.
- NEFF, 1984. Nutzbarmachung des Geothermie im Raume Baden und Umgebung. Schlussbericht, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel.
- OFEN, 1992. Avant-projet d'installation de géothermie en Suisse : aspects techniques et financiers. Brochure, 30 pp.
- OFEN (1998). Géothermie : exploitation de l'énergie géothermique. Guide pour concepteurs, maîtres d'ouvrages, investisseurs et décideurs. Brochure, 23 pp.
- Oppermann G., 2001. Riehen exporte la chaleur terrestre. Bull. Géothermie CH.
- Pasquier F., Bouzelboudjen M & Zwahlen F., (1999) Carte Hydrogéologique de la Suisse, Sarine, feuille6. Commission Géotechnique Suisse et Service Hydrologique et Géologique national.
- Pfiffner O., 1990. Kinematics and intrabed-strain in mesoscopically folded limestone layers :examples from the Jura and the Helvetic Zone of the Alps. Eclogae geol. Helv. 83/3, p. 585-602.
- Rieben C., 1999. Recherche d'eau à 666,6 m de profondeur, gwa 7/99 des Schweiz. Ver. des Gas- u. Wasserfaches, Zürich, 7 pp.
- Rybach L., Büchi U.P., Bodmer Ph., Griesser J.-C., Israng L., Kappeler S., Rellstab W., Schlanke S. & Weiss H.P., 1981. Geothermische Datensynthese der Schweiz. Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, 26, Bern, 122 pp. + 24 annexes (cartes).
- Schaer J.-P., Robert-Charrue C. & Burkhard M., 2008, Val de Travers : géologie et évolution morphologique. In : Le Val-de-Travers. Une région, une identité. Ed. Attinger. P. 8-36.
- Schellschmidt R., Sanner B., Jung R. & Schulz R., 2007. Geothermal Energy Use in Germany, Proc. European Geothermal Congr.2007, Unterhaching, Germany, May 2007
- Sermet D., 1980. Etude géologique du pied du Jura vaudois et neuchâtelois en vue de l'implantation de forages géothermiques, OFEE
- Signorelli S. & Kohl T., 2006. Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik, N° 39, 107 pp.
- Sommaruga A., 1997. Geology of the central Jura and the Molasse Basin : new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. Mémoire de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles, tome XII, 176 pp.
- Sommaruga A. & Burkhard M., 1997. Interpretation of seismic lines across the rhomb shaped Val-de-Ruz Basin (internal folded Jura) in : Deep structure of the Swiss Alps, results of NRP 20. Ed. : Pfiffner, Lehner, Heitzmann, Müller & Steck. Birkhäuser Verlag Basel. p. 45-55.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

- Tecnoservice Engineering, 2004. Etude de faisabilité: Centrale géothermique Chauffage à distance sur le site de Marin-Epagnier. Rapp. Pour le Service cantonal de l'énergie, Neuchâtel.
- Valley B., 2002. La vallée des Ponts-de-Martel, rétro-déformation 3D d'une structure complexe dans le Jura neuchâtelois, travail de diplôme, Université de Neuchâtel
- Vollmayr T., 1983. Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. U. –Ing., vol. 49, 116 : 15-27.
- Vuataz F.-D., 1992. Rapport interne sur l'analyse des coûts de forages géothermiques en Suisse. Note au dossier pour le CREALP, 3 pp., non publié.
- Vuataz F.-D., 1995. Analyse des coûts des forages géothermiques en Suisse. Etat de la situation en 1995. Note au dossier pour le CREALP, 3 pp. et 2 tableaux, non publié.
- Vuataz F.-D., 1997. Applications des techniques de forage slimhole pour la prospection des aquifères profonds. Eclogae geol. Helv., 90 : 497-512.
- Vuataz F.-D. & Fehr A., 2000. 25 ans d'activités géothermiques en Suisse. Bull. Géothermie CH, 26 : 2-10.
- Vuataz F.-D., Bossy F., Colliard B. & Wilhelm J., 2005. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg, Rapport final pour le Service des transports et de l'énergie, Fribourg.
- Weber R. & Fehr A., 1990. La géothermie en Suisse. Gisements et possibilités d'utilisation. Brochure de l'OFEN, 40 pp.
- Wilhelm J., 1995. Les forages géothermiques en zone urbaine. Brochure de Zschokke S.A., 4 pp.
- Wilhelm J., Bianchetti G. & Vuataz F.-D., 2003. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud, Rapport final pour le Service de l'environnement et de l'énergie, Vaud.
- Ziegler H.-J., 1992. Entwicklung einer Trinkwasserbohrung mit Salzsäure. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. U. – Ing., Vol. 59, Nr. 135, p. 39-48.

Cartes géologiques et hydrogéologiques

- Bourquin Ph. et al., 1968. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1144 Val-de-Ruz (n°51), avec notice explicative. Swisstopo.
- Bourquin Ph. et al., 1946. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1124 Les Bois (n°15), avec notice explicative. Swisstopo.
- Burkhard M., 2002. Carte géologique SIG 1:25'000, feuille 1163 Travers. Carte provisoire pour l'Atlas géologique de la Suisse. Inédit.
- Jordi H.A. et al., 2006. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1183 Grandson (n°114). Swisstopo.
- Kiraly L., 1973. Carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel au 1:50'000, avec notice explicative. Supplément du Bull. Soc. neuch. sci. nat. 96, Département des travaux publics du canton de Neuchâtel.
- Meia J. & Becker F., 1976. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1164 Neuchâtel (n°67), avec notice explicative. Swisstopo.
- Meia J., 1986. La Géologie. In : Les Gorges de l'Areuse. Ed. La Baconnière, Neuchâtel, pp. 51-76.
- Mühletaler C., 1930. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1162 Les Verrières (n°2), avec notice explicative. Swisstopo.
- Rigassi D. & Jaccard, M., 1994. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1182 Ste-Croix (n°95), avec notice explicative. Swisstopo.
- Rittener T., 1902. Carte géologique de la Cote aux Fées et des environs de Ste Croix et Baulmes, N°30, Etabl. Topogr. J. Schlumpf, Winterthur.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

Rollier L., & Favre, J., 1910. Carte géologique des environs du Locle et de La Chaux-de-Fonds. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse. Carte spéciale N°59. Commission géologique suisse.

Schär U. et al., 1971. Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1145 Bieler See (n°60), avec notice explicative. Swisstopo.

Coupes

Buxtorf A., +1917. Coupe géologique du Tunnel de Hauenstein, Sources et température de la roche. Commission géologique suisse, inédit. Tirage : Kümmerly & Frey, Bern.

Burkhard M., 1993. Coupe géologique de Chasseral : Villeret – Lignièrès – La Neuveville – Île St Pierre. Inédit.

Burkhard M., 2001. Coupe géologique variante RER1 (TransRUN)– 1 :10'000, inédite

Frei, 1946. Coupe géologique Montagne de Boudry – Solmont, inédite

Hindle D., 1997. Quantifying stresses and strains from the Jura Arc, and their usefulness in choosing a deformation model for the region. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 103 pp.

Schardt H., 1910. Val de Travers. In : Dictionnaire géographique de la Suisse. Editions Attinger, v. 6, p. 155.

Schardt & Dubois, 1901. Coupe géologique du Creux du Van. *Eclogae geol. Helv.* VII, pl. 13.

6. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Les investigations conduites entre mai 2007 et août 2008 en vue de déterminer le potentiel géothermique sur le territoire du canton de Neuchâtel dans les domaines suivants,

- Conditions d'implantation des sondes géothermiques verticales (SGV)
- Potentiel des géostructures énergétiques (GEN)
- Exploitation thermique des nappes phréatiques (NAP)
- Ressources en aquifères profonds (APR),

ont permis de conclure que chacune de ces quatre technologies offre des perspectives intéressantes de valorisation, sous un certain nombre de conditions. Le présent chapitre synthétise les conclusions et les recommandations détaillées qui figurent à la fin des chapitres consacrés à ces quatre secteurs, soit les chapitres 2, 3, 4 et 5 pour les SGV, les GEN, les NAP et les APR, respectivement.

6.1 Conditions d'implantation des sondes géothermiques verticales

Depuis plusieurs années, les sondes géothermiques verticales (SGV) connaissent un certain développement dans le canton de Neuchâtel, essentiellement pour le chauffage de nouvelles villas. La répartition géographique des SGV couvre presque l'ensemble du territoire, à l'exception des zones les plus élevées, mais leur densité maximale se trouve surtout dans le bas du canton, ainsi que dans certaines zones de développement de l'habitat entre 700 et 1000 m d'altitude. En 2007, plus de 300 installations de chauffage étaient alimentées par une ou plusieurs SGV.

En vue de dimensionner correctement une ou plusieurs SGV, un certain nombre de paramètres liés au site d'implantation doivent être considérés :

- Caractéristiques thermiques des roches
- Profondeur autorisée pour le forage
- Altitude de l'installation
- Phénomènes karstiques
- Présence d'un aquifère
- Gradient géothermique.

Les paramètres les plus importants au niveau du dimensionnement des SGV sont les suivants :

- Profondeur de la SGV
- Nombre de SGV
- Espacement entre plusieurs SGV
- Configuration des SGV
- Type de SGV
- Diamètre de la SGV
- Espace entre les tubes en U
- Type de matériau et qualité du remplissage autour de la SGV
- Type de fluide caloporteur.

Recommandation 1

Dans le but d'assurer le développement durable et efficace sur le plan énergétique pour les futures sondes géothermiques verticales (SGV) dans le canton de Neuchâtel, il est recommandé de finaliser et d'appliquer dès que possible la carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sol par SGV sur le territoire. Au moyen de cette carte, il devient possible d'établir le potentiel théorique des sondes géothermiques verticales !

D'autre part, un guide simple d'aide au dimensionnement des SGV pour les installations de petites tailles pourrait être rédigé à l'intention des installateurs. Il est important pour les entreprises de chauffage du canton que de brefs cours de formation continue soient proposés aux installateurs.

De plus, afin de stimuler le développement des champs de sondes pour le chauffage et le refroidissement de grands bâtiments ou de lotissements, les prochaines réalisations devraient rapidement faire l'objet d'une promotion active (fiches techniques, visites organisées, soutien financier pour la mesure des performances énergétiques) comme des projets pilote & démonstration.

Enfin, la présentation et la diffusion de la norme SIA 384/6 bientôt disponible pour le dimensionnement des sondes géothermiques uniques et des champs de sondes sera profitable tant pour les installateurs que pour les services cantonaux concernés et les bureaux d'ingénieurs.

6.2 Potentiel des géostructures énergétiques

La technique des géostructures énergétiques est un développement relativement récent, mais actuellement déjà bien utilisée. Il s'agit d'une source d'énergie utilisant le potentiel calorifique du sous-sol, avant tout pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments, dans les meilleures conditions économiques, environnementale et de fonctionnement. De nombreux exemples en Suisse et à l'étranger témoignent de l'intérêt qu'il y a d'équiper en échangeur de chaleur les éléments d'une construction en contact avec le sol.

L'étude prospective effectuée en 2007 a mis en évidence les régions disposant de potentiel en géostructures énergétiques dans le canton de Neuchâtel. Il s'agit essentiellement de la vallée Le Locle - La Chaux-de-Fonds et de la région du Littoral - est jusqu'au Landeron, où la présence d'un sous-sol nécessitant la mise en place de géostructures permettront d'approvisionner les constructions futures dans les zones de développement.

Le potentiel énergétique théorique a été évalué à 180 GWh/an, ce qui représente le 10% des besoins actuels en chaleur du canton.

Le potentiel énergétique utilisable pour le chauffage et/ou le refroidissement sur le territoire cantonal a été estimé à 18 GWh/an dans 10 ans, en admettant un taux de mise en œuvre des géostructures énergétiques de 50% des nouvelles constructions, l'accroissement moyen de ces dernières étant de 2% par an.

Au vu du potentiel identifié, il est recommandé de poursuivre les études et les démarches pour préciser les disponibilités en surfaces potentielles et pour approfondir les possibilités d'application avec l'ensemble des acteurs impliqués.

Cette dernière action est favorisée par la série de projets d'aménagement en plein développement, soutenus en particulier par la mise en œuvre du nouveau Plan Directeur Cantonal.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

D'une façon concrète, les actions suivantes sont proposées dans le domaine des géostructures énergétiques (GEN) :

- Diffusion des conclusions de la présente étude auprès des autorités et organismes concernés.
- Organisation d'une campagne d'information auprès des professionnels et des promoteurs impliqués dans de tels projets.
- Soutenir des études de faisabilités des GEN en collaboration avec les responsables des grands projets de développement.
- Recherche de soutien financier pour promouvoir les réalisations GEN
- Etablissement d'une réglementation en faveur des GEN.
- Inclure le développement des GEN dans la conception cantonale de l'énergie et établir un plan d'action comprenant les mesures ad hoc décrites ci-dessus.

Recommandation 2

Au vu de l'intérêt représenté par les géostructures énergétiques, il est proposé d'inclure leur développement dans le Plan directeur cantonal de l'énergie et d'établir un plan d'action comprenant une partie ou la totalité des mesures mentionnées ci-dessus.

6.3 Exploitation thermique des nappes phréatiques

Contrairement à la chaleur des roches du sous-sol qui est exploitable sur la quasi-totalité de la surface du canton, les réservoirs thermiques constitués par les nappes phréatiques de faible profondeur sont très localisés. D'autre part, les installations d'exploitation de la chaleur des nappes sont en général réalisées pour des groupes de maisons ou des grands bâtiments.

Une estimation globale des ressources thermiques des nappes phréatiques du canton de Neuchâtel a été réalisée dans cette étude. Elle donne le cadre et les possibilités d'exploitation des nappes, mais ne fournit pas d'informations spécifiques. Celles-ci doivent être impérativement déterminées par une étude locale lors de chaque projet.

Les simulations ont montré que les deux principales influences sur l'environnement liées à l'exploitation thermique d'une nappe phréatique sont le rabattement induit dans la nappe et l'extension du panache thermique qui dépendent principalement des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère.

L'extension du panache thermique est déterminée par la puissance extraite du sous-sol, mais surtout par la perméabilité et le gradient hydraulique de l'aquifère. L'extension du panache thermique doit être limitée, pour ne pas causer une variation de plus de 3 °C à 100 m de l'installation.

Dans le canton de Neuchâtel, les deux principales nappes phréatiques de faible profondeur sont la nappe du delta de l'Areuse et la nappe du Val-de-Travers. La nappe de l'Areuse montre une très forte hétérogénéité de la perméabilité. Ceci permet de distinguer trois cas d'exploitation :

- Les zones à perméabilité élevée ($\geq 10^{-3}$ m/s) : ces zones permettent d'exploiter de grandes quantités de chaleur par une utilisation simple.
- Les zones à perméabilité moyennes (env. 10^{-4} m/s) : ces zones sont particulièrement adaptées au stockage de chaleur par une installation des puits en doublet réversible.
- Les zones à perméabilité faible ($< 10^{-5}$ m/s) : l'utilisation de la chaleur de l'aquifère n'est pas vraiment rentable, car les puits doivent être très espacés, ce qui demande une surface d'implantation importante.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

La nappe du Val-de-Travers est un peu plus homogène, avec une perméabilité observée de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Cette perméabilité élevée permet, comme dans le cas 3 de la nappe de l'Areuse d'exploiter de grandes quantités de chaleur, mais pas de réaliser un stockage thermique à l'aide d'un doublet réversible, à cause des vitesses d'écoulement trop élevées.

Cette étude a permis de montrer que les possibilités d'exploitation des nappes phréatiques peuvent être déterminées de manière globale sur la base de la perméabilité (K), de l'épaisseur (e) de l'aquifère et du gradient hydraulique (i).

Lorsque K est faible ($< 10^{-5}$ m/s), les conditions sont peu favorables pour une exploitation thermique. Si K est un peu plus élevé, de l'ordre de 10^{-4} m/s, mais que l'épaisseur de l'aquifère est trop faible, seules de faibles puissances peuvent être extraites de l'aquifère. Si l'épaisseur de la zone saturée est suffisamment importante, la limite d'exploitation est donnée par le gradient hydraulique, qui détermine l'extension du panache thermique, mais également la possibilité d'installer un doublet réversible. Pour les perméabilités élevées ($\geq 10^{-3}$ m/s), une faible épaisseur d'aquifère suffit pour exploiter de grandes quantités d'énergie. Au-delà d'une certaine valeur, l'épaisseur ne limite donc plus les possibilités d'exploitation. Pour cette gamme de perméabilités, le gradient hydraulique détermine l'extension du panache thermique. Ces perméabilités ne sont en général pas adaptées pour l'installation d'un doublet réversible car l'écoulement de l'eau souterraine est trop rapide.

Recommandation 3

D'une façon concrète, les actions suivantes sont proposées dans le domaine de l'utilisation thermique des nappes phréatiques (NAP) :

- **Diffusion des conclusions de la présente étude auprès des autorités et organismes concernés.**
- **Organisation d'une campagne d'information auprès des professionnels et des promoteurs impliqués dans de tels projets.**
- **Soutenir des études hydrogéologiques pour des projets de faisabilité de NAP en collaboration avec les promoteurs des projets de développement.**
- **Évaluer le potentiel énergétiques des NAP en utilisant la carte des ressources réalisée lors de cette étude.**
- **Inclure le développement des NAP dans la conception cantonale de l'énergie.**

6.4 Ressources en aquifères profonds

L'exploitation par forages des aquifères profonds pour la géothermie vise à capter et à mettre en valeur l'énergie thermique des réserves naturelles d'eau chaude emmagasinées dans des couches perméables comprises entre 300 et 3'000 m.

En considérant un gradient géothermique moyen de $3^\circ \text{C}/100 \text{ m}$, la profondeur de 300 m permet d'atteindre des températures de l'ordre de 20°C , alors qu'elles seront d'environ 100°C à 3'000 m.

Actuellement, la Suisse compte une douzaine d'installations utilisant des aquifères profonds pour du chauffage et/ou du thermalisme, dont seule la moitié peut être considérée comme de véritables succès. Pour ces derniers, les températures des eaux profondes captées varient entre 26 et 68°C et les débits de production entre 4 et 22 l/s . Les puissances géothermiques en tête de puits sont comprises entre 0.3 et 5.5 MWth .

Dans le canton de Neuchâtel, l'absence de manifestations géothermiques de surface et de données provenant de forages d'exploration pétrolière ou géothermique, n'ont pas encouragé jusqu'à présent

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

le montage de projets d'exploitation dans les aquifères profonds. Cependant, les différentes investigations menées dans le cadre de cette étude ont montré qu'un réel potentiel géothermique existait, entre 0.5 et 1.5 MWth par puits de production, selon le site de production et la profondeur de l'aquifère visé, pour autant que ce dernier soit suffisamment fracturé et donc productif.

Sur l'ensemble du canton, les connaissances précises de ces conditions essentielles de fracturation font actuellement défaut. Si une certaine réinterprétation des données existantes de l'exploration pétrolière permettait de mieux définir ces paramètres à l'échelle régionale, il serait néanmoins nécessaire, pour tout futur projet APR, de débiter par une phase de prospection locale, afin de caractériser au mieux par des méthodes géologiques et géophysiques les structures aquifères et de réduire au maximum les risques inhérents à ce genre d'opération.

A l'échelle du canton, trois formations géologiques peuvent être envisagées comme ressource en aquifères profonds. Leurs caractéristiques géothermiques minimales basées sur des estimations conservatrices sont les suivantes :

Tableau 6.1 : Caractéristiques géothermiques minimales des aquifères profonds du canton de Neuchâtel basés sur des estimations conservatrices.

Aquifère	Profondeur minimum (m)	Température minimum (°C)	Puissance thermique en tête de puits pour 10 l/s et un rejet à 10°C (MWth)
Malm	300 - 600	20 - 25	0.4 - 0.6
Dogger	700 - 1100	34 - 39	1.0 - 1.2
Muschelkalk	1500 - 1800	46 - 54	1.1 - 1.4

Par défaut, c'est un gradient géothermique de 30°C/km qui a été pris en compte, sachant que ce paramètre peut varier sensiblement entre les massifs, les fonds de vallées et la bordure du plateau. Les ressources dont la température de production est inférieure à 40°C peuvent être exploitées à l'aide d'une pompe à chaleur. Finalement, c'est aussi une valeur minimale de 10 l/s qui a été considérée comme débit de production, sachant que ce paramètre varie beaucoup d'un forage à un autre dans les milieux fracturés. Une carte a été produite, qui superpose les zones de potentiel APR et les zones de consommateurs potentiels de chaleur, permettant de cibler rapidement les sites d'intérêt pour de futures investigations et études de faisabilité.

Recommandation 4

Sur la base des connaissances du sous-sol et des cartes de ressources en aquifères profonds (APR), une estimation du potentiel thermique théorique est réalisable. Elle peut être présentée sous différentes formes (par type de formation géologique ou en fonction des lieux de consommation de chaleur).

Au vu du potentiel géothermique probable en aquifères profonds sous le territoire neuchâtelois, nous recommandons au canton de considérer sérieusement cette option lorsque de futurs projets immobiliers d'envergure seront envisagés. Si le budget alloué à ces projets est suffisant, nous proposons qu'un poste soit réservé à la caractérisation précise du potentiel géothermique du site par une étude hydrogéologique ciblée (données existantes et nouvelle prospection). Ainsi, la prise de risque sera limitée et une discussion objective pourra alors être engagée sur la réalisation ou non d'un forage géothermique de reconnaissance.

6.5 Synthèse générale

Pour la mise en œuvre des recommandations ci-dessus, il conviendrait de préparer un plan d'action, devant servir de fil conducteur à un Programme cantonal de développement de l'énergie géothermique. Le cadre et les modalités du plan d'action seront à définir compte tenu de la position des autorités face aux recommandations du présent rapport et selon les étapes suivantes :

- Acceptation des recommandations du présent rapport.
- Elaboration d'un Programme d'action détaillé et chiffré, visant à promouvoir l'utilisation de l'énergie géothermique dans le canton.
- Approbation du programme d'action par les autorités et mise en place des moyens nécessaires à sa mise en œuvre, en particulier en ce qui concerne les aspects administratifs, juridiques et financiers.
- Mise en œuvre du programme.

Possédant les connaissances et l'expérience nécessaires à ce travail, la préparation du plan d'action pourrait être confiée au Groupement PGN, dans le prolongement de son activité d'évaluation du potentiel géothermique.

Cette activité serait susceptible de bénéficier du soutien financier de la Confédération dans le cadre de divers programmes de soutien à la recherche et aux installations pilote. Ceci conduit à l'ultime recommandation.

Recommandation 5

Intégrer les recommandations ci-dessus dans un Programme cantonal de développement des technologies avancées d'utilisation de l'énergie géothermique et charger le Groupement PGN de sa réalisation en collaboration avec les autorités et les administrations concernées.