

Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel – PDGN

Volume 1 :

Rapport final

Elaboré par

Groupe de travail PDGN

c/o Laboratoire Suisse de Géothermie - CREGE

Août 2010

Impressum

Date : août 2010

Projet CREGE : PDGN – Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel

No Rapport : CREGE08-10/01

Réalisation : Groupe de travail PDGN

Financement : Service de l'énergie, canton de Neuchâtel

Adresse et coordonnées :

Laboratoire Suisse de Géothermie - CREGE

c/o CHYN

11 rue E.-Argand

CH-2000 Neuchâtel

Tél. +41 (0)32 718 2600

www.crege.ch

Citation :

Groupe de travail PDGN, 2010. Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel (PDGN). Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, CREGE08-10/01, Neuchâtel.

SOMMAIRE

Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel

1. Introduction.....	5
1.1. Cadre général du projet	5
1.2. Démarche de l'étude	8
1.3. Présentation du rapport	9
1.4. Organisation de l'étude.....	9
2. Potentiel d'exploitation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales (SGV)	11
2.1. Introduction	11
2.2. Présentation des résultats de l'étude PGN	12
2.3. Méthodologie de l'étude de potentiel.....	21
2.4. Résultats.....	31
2.5. Synthèse et conclusions.....	44
2.6. Références	47
3. Potentiel des géostructures énergétiques (GEN)	49
3.1. Introduction.....	49
3.2. Les géostructures énergétiques	50
3.3. Le projet de développement Le Corbusier	56
3.4. Tunnels – Eaux souterraines et géostructures.....	67
3.5. Synthèse et conclusions.....	83
3.6. Références	85
4. Potentiel thermique des nappes phréatiques (NAP)	87
4.1. Introduction et objectifs	87
4.2. Méthodologie.....	88
4.3. Calcul du potentiel théorique exploitable des nappes phréatiques du canton de Neuchâtel.....	94
4.4. Synthèse et conclusions.....	157
4.5. Guide d'aide au dimensionnement.....	163
4.6. Références	165
5. Potentiel des sources et des eaux de surface (SES).....	169
5.1. Introduction et objectifs	169
5.2. Méthode et travaux réalisés	170
5.3. Potentiel des cours d'eau.....	172
5.4. Potentiel des effluents de STEP	191
5.5. Potentiel du lac de Neuchâtel.....	194
5.6. Procédure d'autorisation	197
5.7. Installations existantes.....	198
5.8. Cartes du potentiel.....	201
5.9. Synthèse et recommandations.....	202
5.10. Références	204
6. Potentiel des aquifères profonds (APR)	205
6.1. Introduction.....	205
6.2. Présentation des résultats de l'étude PGN.....	215

6.3. Méthodologie de l'étude.....	219
6.4. Résultats.....	227
6.5. Synthèse et suite du programme.....	246
6.6. Références	249
7. Séminaires d'information aux professionnels	251
7.1. Objectifs	251
7.2. Actions entreprises.....	251
7.3. Conclusions, recommandations.....	256
8. Synthèse et recommandations.....	257
8.1. Potentiel d'exploitation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales (SGV)	257
8.2. Potentiel des géostructures énergétiques (GEN).....	258
8.3. Potentiel thermique des nappes phréatiques (NAP)	258
8.4. Potentiel des sources et des eaux de surface (SES)	259
8.5. Potentiel des aquifères profonds (APR).....	260
8.6. Séminaires d'information aux professionnels	261
8.7. Synthèse générale	261

1. Introduction

1.1 Cadre du projet

Situation générale

Dans le canton de Neuchâtel, le débat sur les questions énergétiques fait partie du quotidien et le restera 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, développement de l'efficacité énergétique, diminution des émissions de CO₂, augmentation du prix des énergies, utilisation des nouvelles énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse, géothermie).

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 pionniers dans ce domaine avec notamment la plus forte densité des sondes géothermiques verticales par rapport à la superficie du pays.

Dès le début des années 2000, plusieurs cantons ont marqué leur volonté de connaître le potentiel en énergies renouvelables de leur territoire. Notamment les études du potentiel géothermique des cantons de Vaud (PGV, 2003) et de Fribourg (PGF, 2005) ont suscité des projets de réalisation et des planifications à l'échelle cantonale pour les années à venir.

Une première évaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN) a été réalisée entre mai 2007 et octobre 2008. Cette étude, financée par la Fondation ProTechno, a été initiée et conduite par le Centre de recherche en géothermie de Neuchâtel (CREGE) qui a établi un groupe de travail PGN formé de spécialistes des différentes disciplines concernées (PGN, 2008).

Suite à l'intérêt suscité par cette étude, le Service de l'énergie du canton de Neuchâtel a mandaté le CREGE afin d'effectuer le Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel – PDGN. Ce programme a débuté dès décembre 2008 par la constitution d'un groupe de travail composé de spécialistes provenant du réseau de compétences du CREGE et de membres des différents services concernés du canton.

Au cours de l'étude, une restructuration des entités de géothermie s'est produite à Neuchâtel. Suite à l'arrivée de la Prof. Eva Schill pour occuper la nouvelle chaire de géothermie de l'Université, l'équipe opérationnelle du réseau CREGE a fusionné avec le Laboratoire de géothermie, devenant dès 2010 le Laboratoire Suisse de Géothermie – CREGE de l'Université de Neuchâtel. L'ancien réseau CREGE s'appelle désormais Swiss Geothermal Network (SGnet). Début 2010, les Services de l'énergie et de la protection de l'environnement ont fusionné en une seule et unique entité, Service de l'énergie et de l'environnement (SENE). La fusion de ces deux entités devra permettre, entre autres, une meilleure promotion de la géothermie.

Exploitation des ressources géothermiques

On entend par exploitation géothermique la valorisation du potentiel thermique du sous-sol, indépendamment de la température et de la profondeur de la ressource. Suivant leur nature et leur gisement, les ressources géothermiques sont valorisées en ayant recours à des techniques d'exploitation variées. Ainsi on distingue de nombreuses ressources et formes d'exploitation de l'énergie géothermique (Figure 1.1 à 1.3) :

- Collecteurs horizontaux enterrés et corbeilles géothermiques
- Sondes géothermiques verticales et sondes profondes
- Champs de sondes géothermiques
- Géostrutures énergétiques (pieux de fondation, parois ou dalles, revêtement de tunnels)
- Nappes phréatiques (aquifères de faible profondeur)
- Sources d'eaux chaudes (dites également sources thermales)
- Eaux chaudes drainées par les tunnels
- Aquifères profonds (à moins de 100 °C pour la production de chaleur)
- Géothermie de grande profondeur et haute température (aquifères très profonds et systèmes géothermiques stimulés – EGS, à plus de 100 °C pour la coproduction de chaleur et d'électricité).

La plupart de ces techniques sont aujourd'hui bien connues et sont exploitées de manière très diverse selon les régions et les pays. Les applications de la géothermie de basse température nécessitent, sauf exception, le couplage à une ou plusieurs pompes à chaleur (PAC). A l'heure actuelle, les PAC connaissent un grand succès en raison de leur diversité, mais leur fonctionnement ne sera pas expliqué dans ce rapport. Des informations détaillées peuvent être obtenues auprès du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP) et notamment sur leur site internet www.pac.ch. Seule la technologie des systèmes géothermiques stimulés nécessite encore des efforts de recherche et de développement pour être utilisée de manière étendue et atteindre la rentabilité économique.

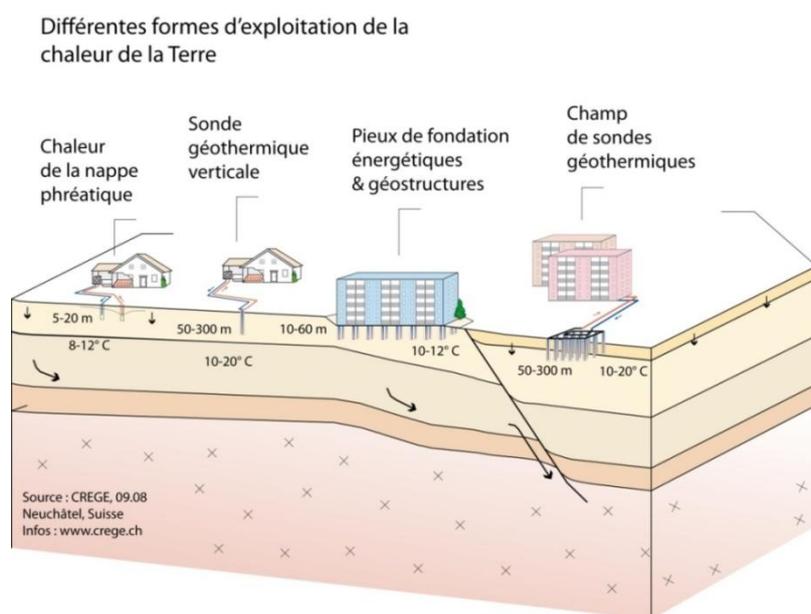


Figure 1.1. Différents types d'exploitation de la géothermie de faible profondeur et basse température.

Doublet géothermique

1. Forages de production et de réinjection
2. Echangeurs de chaleur
3. Réseau de chauffage à distance

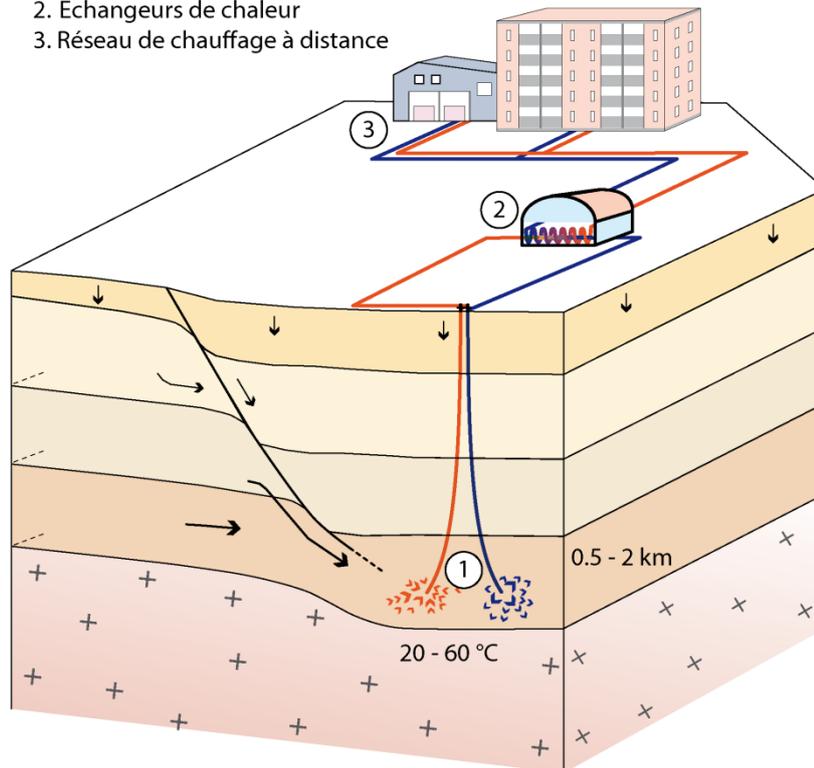
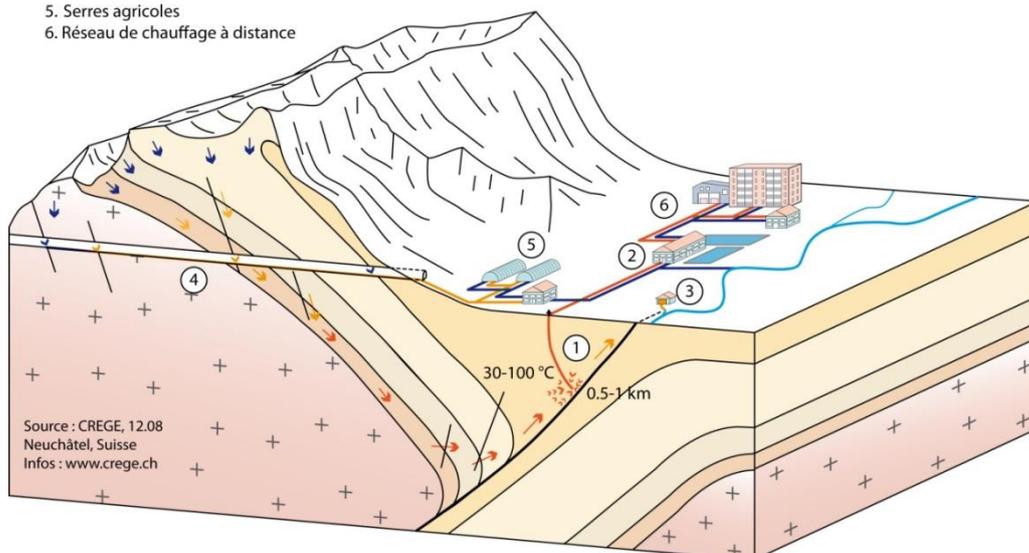


Figure 1.2. Mode d'exploitation de la géothermie des aquifères profonds.

Chaleur des tunnels et hydrothermalisme

1. Forage de production
2. Centre thermal
3. Source thermale
4. Tunnel
5. Serres agricoles
6. Réseau de chauffage à distance



Source : CREGE, 12.08
Neuchâtel, Suisse
Infos : www.crege.ch

Figure 1.3. Mode d'exploitation de la géothermie des tunnels et des ressources hydrothermales.

1.2 Démarche de l'étude

L'étude du Potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN, 2008) a permis de mettre en évidence l'intérêt pour ce canton de développer quatre principaux modes d'utilisation de la géothermie et d'en évaluer qualitativement, voire semi-quantitativement le potentiel : Sondes géothermiques verticales (SGV), Géostructures énergétiques (GEN), Chaleur des nappes phréatiques (NAP) et Ressources en aquifères profonds (APR).

Dans le rapport PGN (2008), un certain nombre de conclusions et de recommandations ont été élaborées et mises en évidence. A la suite de sa présentation aux services cantonaux concernés, le Service de l'énergie a mandaté le CREGE pour effectuer une évaluation quantitative plus détaillée du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel dans les quatre domaines mentionnés et participer à la mise en application des recommandations du rapport final. De plus, il a été décidé qu'un cinquième type de ressource serait examiné lors de ce projet : le potentiel thermique des eaux de surface. D'autre part, il a été prévu de diffuser l'information auprès des professionnels de l'énergie et du bâtiment, notamment par le moyen d'une série de séminaires d'information.

L'étude proposée est intitulée Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel – PDGN. Ses principaux buts et méthodes à concrétiser compte tenu des données disponibles sont les suivants :

Potentiel des sondes géothermiques verticales (SGV)

Calcul du potentiel théorique des SGV pouvant être installées dans le canton.

Réalisation d'un guide simple d'aide au dimensionnement des SGV pour les installations de petite taille (recommandations techniques, procédure cantonale, bases de données, logiciels, liste d'adresses, etc.).

Potentiel des géostructures énergétiques (GEN)

Affiner les évaluations du potentiel : précisions sur le degré de développement des zones, contacts avec les principales communes et promoteurs potentiels, identification de projets d'aménagement supplémentaires.

Estimation du potentiel géothermique de chacun des deux tunnels de 5300 m du projet TransRun et du potentiel des géostructures des têtes de tunnel en tranchée couverte et du potentiel d'utilisation près des portails.

Programme pour l'établissement d'un cadastre du potentiel cantonal des tunnels existants ainsi que des tunnels projetés.

Potentiel des nappes phréatiques (NAP)

Calcul du potentiel théorique pouvant être installé dans le canton.

Réalisation d'un guide simple d'aide au dimensionnement des installations de type NAP pour les installations de petite taille (recommandations, bases de données, logiciels, liste d'adresses, etc.).

Potentiel des eaux de surface (EDS)

Evaluation du potentiel thermique des eaux de surface montrant un potentiel important pour la chaleur et le froid.

Mesure des débits et températures en février et en août pour une douzaine de cours d'eau.

Actualisation du potentiel exploitable et formulation des conditions d'exploitation. Les résultats seront reportés sur une carte numérique pouvant être intégrée au SITN.

Potentiel des aquifères profonds (APR)

Calcul du potentiel théorique des APR pouvant être installés dans le canton.

Proposition de sites de forage sélectionnés en fonction des formations aquifères potentielles, des structures géologiques et des lieux de consommation.

Organisation de six séminaires d'une demi-journée

Organisation d'un séminaire d'information d'une demi-journée modulé en fonction des participants, qui sera donné à six reprises au cours du projet, pour les professionnels et les promoteurs dans les domaines de l'énergie et du bâtiment. Ce séminaire abordera ainsi l'ensemble des techniques de la géothermie peu profonde et de basse température; le contenu sera adapté en fonction du type de participants.

1.3 Présentation du rapport

Le plan retenu pour le rapport est le suivant : la présente introduction (chapitre 1) est suivie par cinq chapitres traitant respectivement les cinq potentiels cibles selon l'ordre du point 1.2.

Chacun des chapitres 2 à 6 forme un tout, avec des conclusions et des recommandations spécifiques. Du point de vue de la présentation, les cinq chapitres suivent le même plan, c'est-à-dire une première partie rappelant brièvement l'état de développement de la technologie concernée, un résumé des principaux résultats de l'étude PGN suivie de l'étude du potentiel, des conclusions et des références bibliographiques.

Le chapitre 7 est une brève présentation des séminaires organisés dans le cadre de ce programme. Le chapitre 8, quant à lui, synthétise les conclusions et les recommandations des chapitres précédents.

Une annexe sous forme d'un volume séparé (vol. 2) contient l'essentiel des tableaux et figures du rapport nécessitant un grand format pour leur lisibilité ou étant trop volumineux pour figurer dans le rapport.

1.4 Organisation de l'étude

Cette étude a débuté en décembre 2008 et a duré environ 18 mois. Pour mener à bien ce projet, un groupement réunissant la majeure partie de l'équipe du précédent projet PGN a été constitué. Les spécialistes proviennent de quatre institutions différentes (Tableau 1.1). Il s'agit de M. Affolter (BMIC), P. Altwegg (CREGE), B. Matthey (BMIC), F.-D. Vuataz (CREGE) et J. Wilhelm (Ing.-conseil).

Sous la dénomination « Groupe de travail PDGN », cette équipe a mené les études nécessaires d'une part pour évaluer le potentiel géothermique du canton et d'autre part pour donner, aux services cantonaux, aux promoteurs immobiliers et aux installateurs d'équipement énergétiques, des guides et des recommandations permettant un développement harmonieux des ressources thermiques du sous-sol. La coordination et la gestion de l'étude ont été réalisées par le Laboratoire Suisse de Géothermie (CREGE) à Neuchâtel.

Tableau 1.1. Groupe de travail PDGN.

Nom, Fonction, Institution	Domaine d'activité dans le projet PDGN
Laboratoire Suisse de Géothermie – CREGE Dr François-D. Vuataz,	<ul style="list-style-type: none"> - Coordination et gestion du projet - Suivi et encadrement des différentes sections du projet - Potentiel des aquifères profonds (APR)
Pierrick Altwegg, géol. dipl.	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel des sondes géothermiques verticales (SGV) - Potentiel des aquifères profonds (APR) - Assistance au chef de projet - Préparation des cartes et documents pour le SITN - Mise en page et édition des rapports et documents
Jules Wilhelm, Ing. dipl. SIA	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel des géostructures énergétiques (GEN)
Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA (BMIC SA) Dr Bernard Matthey, Directeur BMIC Marc Affolter, Hydrogéol. dipl. Jeremy Dupuy, Ing. thermicien	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel des sondes géothermiques verticales (SGV) - Potentiel thermique des nappes phréatiques (NAP) - Potentiel des eaux de surface (EDS) - Organisation et réalisation des six séminaires d'information

Un spécialiste extérieur au projet a contribué à cette étude :

Denis Blant (ISSKA, La Chaux-de-Fonds et CHYN, Neuchâtel) : Compilation et synthèse des données sur les ouvrages profonds (forages et tunnels).

Dans plusieurs services cantonaux, les personnes concernées par les différentes parties de cette étude PDGN ont été impliquées au sein du groupe de projet :

Jean-Luc Juvet, Gervais Oreiller : Service de l'énergie et de l'environnement

Steeve Michaud : Service de l'énergie et de l'environnement

Isabelle Butty : Service de l'énergie et de l'environnement

Elisenda Bardina : Service des ponts et chaussées

Arthur Fiechter : Service de la faune, des forêts et de la nature

Nadia Rognon : Service de la géomatique

Isabelle Tripet, Service de la faune, des forêts et de la nature

Sabine Erb, Laboratoire Suisse de Géothermie (CREGE, Neuchâtel), a également contribué au présent rapport en réalisant la mise en page et l'impression du rapport.

2. Potentiel d'exploitation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales (SGV)

2.1 Introduction

Depuis plusieurs années, les sondes géothermiques verticales (SGV) connaissent un important développement dans le canton de Neuchâtel, essentiellement pour le chauffage de nouvelles villas (Figure 2.1). La répartition géographique des SGV couvre presque l'ensemble du territoire, à l'exception des zones les plus élevées. 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.

L'objectif de ce chapitre est de calculer le potentiel d'exploitation de la chaleur du sous-sol par SGV dans le canton de Neuchâtel. Le calcul de ce potentiel se base essentiellement sur les documents suivants :

- L'analyse de sensibilité des différents paramètres de dimensionnement d'une SGV effectuée lors de l'étude PGN (2008).
- La carte provisoire des profondeurs de forages autorisées (BMIC SA, 2010).

D'autre part, il s'agissait de favoriser la diffusion de l'information et des bonnes règles de dimensionnement par la rédaction d'un guide intitulé : « Sondes géothermiques verticales : guide d'aide au dimensionnement des ouvrages de petite dimension et procédures d'autorisation dans le Canton de Neuchâtel ». Le guide est fourni en Annexe 2.6.

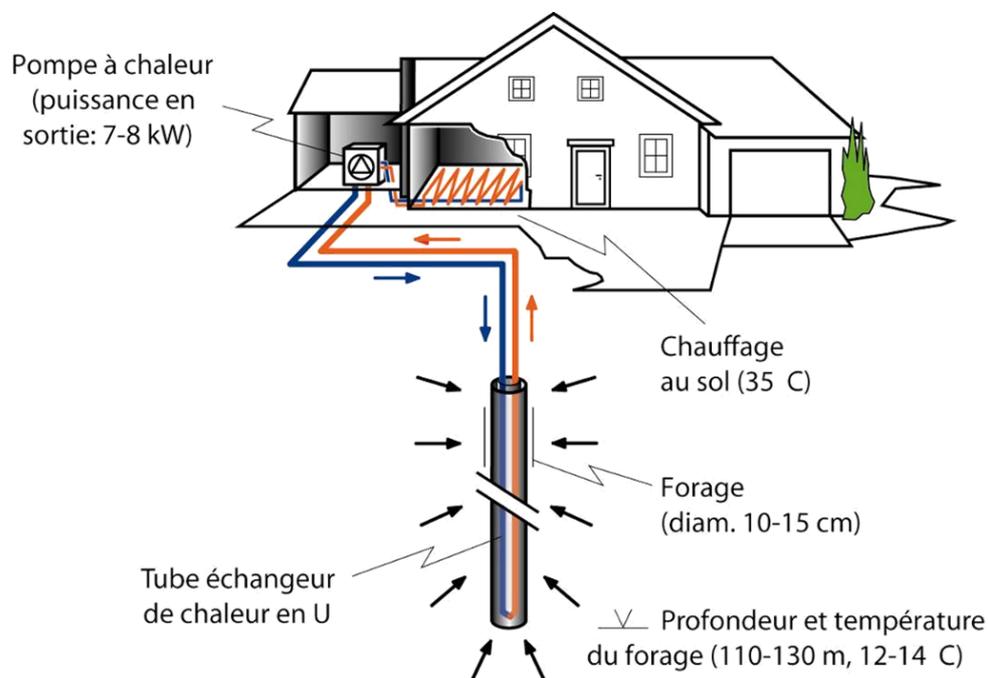


Figure 2.1. Schéma de principe d'une installation de chauffage utilisant une sonde géothermique verticale pour alimenter une villa (CREGE, 2004).

2.2 Présentation des résultats de l'étude PGN

L'étude du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN, 2008) étant le point de départ du présent rapport, ses principaux résultats sont résumés ci-dessous. La partie de l'étude concernant les sondes géothermiques verticales (SGV) consistait essentiellement en une analyse de sensibilité théorique menée au moyen du logiciel EED (Earth Energy Designer v 2.0, BLOCON) sur les différents paramètres servant au dimensionnement d'une ou de plusieurs SGV, à savoir :

Paramètres liés au site d'implantation :

- Caractéristiques thermiques des roches et état de saturation en eau du terrain.
- Profondeur de forage autorisée.
- Température moyenne annuelle de l'air.
- Prise en compte de la réduction du flux géothermique en terrain karstique.
- Flux géothermique régional.

Les paramètres à considérer pour le dimensionnement des SGV sont les suivants :

- Profondeur de la SGV.
- Nombre de SGV d'une installation ou de plusieurs installations proches.
- Espacement entre plusieurs SGV.
- Configuration géométrique 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.

Seuls les paramètres liés au site d'implantation seront résumés dans ce chapitre, car c'est sur la base de ces derniers que la présente étude sera effectuée.

2.2.1 Paramètres liés au site d'implantation

Caractéristiques thermiques des roches

De manière générale, la chaleur du terrain est disponible en tout lieu, sur toute la surface du canton et tous les types de roches sont généralement favorables à l'implantation de sondes géothermiques verticales. Localement, la capacité d'une roche à fournir de la chaleur est déterminée par ses propriétés thermiques, soit la conductivité thermique, la capacité calorifique et l'état de saturation en eau du terrain. La conductivité thermique, exprimée en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ représente la capacité d'une roche à transmettre de la chaleur par conduction. L'influence de la conductivité thermique des roches traversées sur le dimensionnement de la longueur des sondes est indiquée à la Figure 2.2, résultat de l'analyse de sensibilité des caractéristiques thermiques menée pour une maison familiale type de 150 m² à La Chaux-de-Fonds. Les données utilisées pour la simulation EED sont résumées dans le Tableau 2.1. Une analyse de sensibilité a également été menée sur la capacité calorifique (Figure 2.3). Le Tableau 2.2 présente des valeurs habituelles de ces paramètres pour les principaux types de roches traversées par les SGV en Suisse. On peut constater que la présence d'eau au sein de la roche traversée (état de saturation) améliore considérablement les propriétés thermiques du sous-sol. Il s'agit par conséquent d'un facteur important à prendre en compte lors du dimensionnement, notamment pour les roches à forte perméabilité. La présence d'une nappe souterraine active en roches meubles contribue au renouvellement du stock de chaleur à l'échelle saisonnière et doit donc également être pris en compte.

Tableau 2.1. Données thermiques de base d'une maison type à La Chaux-de-Fonds utilisées pour les analyses de sensibilité des paramètres fixes des simulations EED (PGN, 2008).

Paramètre	Valeur
Demande thermique annuelle	15'400 kWh·an ⁻¹
Puissance thermique de la PAC	7 kW
Coefficient de performance (COP)	4
Durée de fonctionnement annuelle ⁽¹⁾	2'200 h·an ⁻¹
Durée d'exploitation totale	30 ans

(1) Durée habituelle pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

On constate, grâce aux Figures 2.2 et 2.3, que la conductivité thermique des roches joue un rôle plus important que celui de la capacité calorifique sur le dimensionnement des sondes géothermiques verticales.

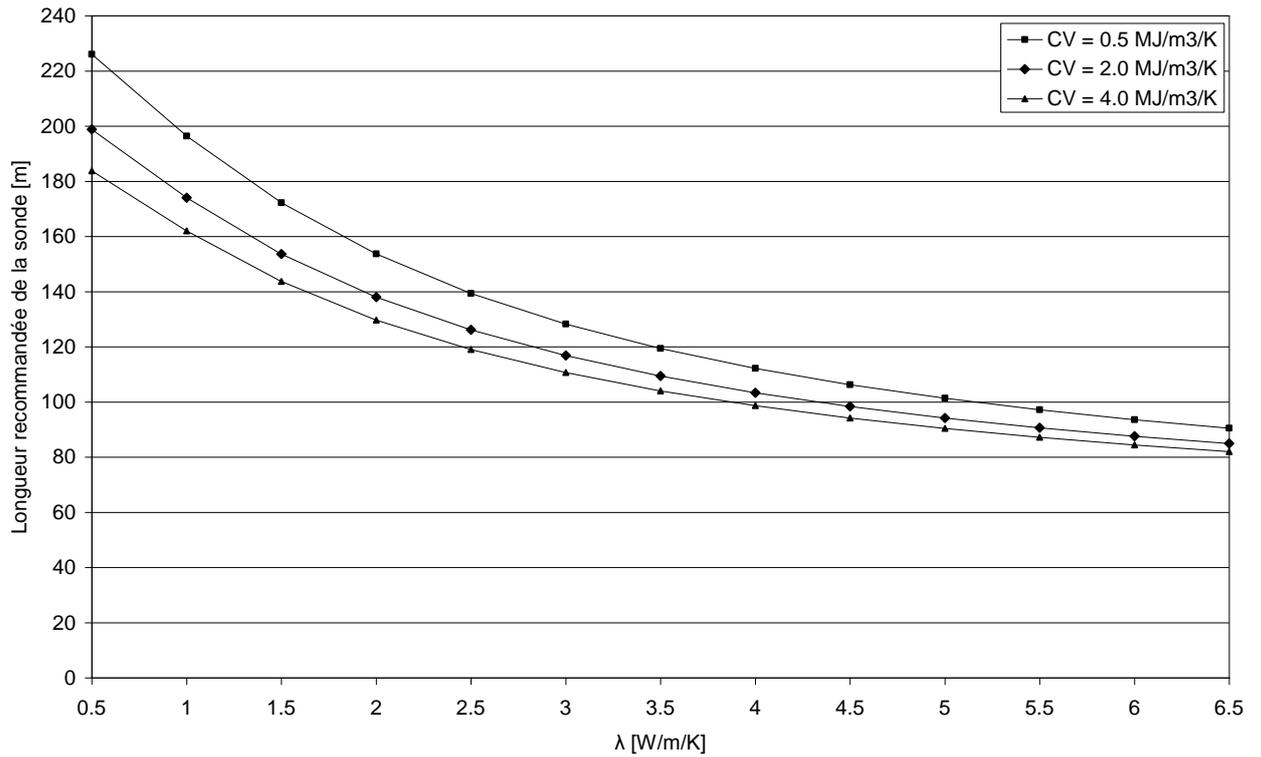


Figure 2.2. Influence de la conductivité thermique sur la longueur de sonde calculée, pour trois capacités calorifiques (valeurs extrêmes : $c_v=0.5$ et $4.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, valeur standard : $c_v=2.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) (PGN, 2008).

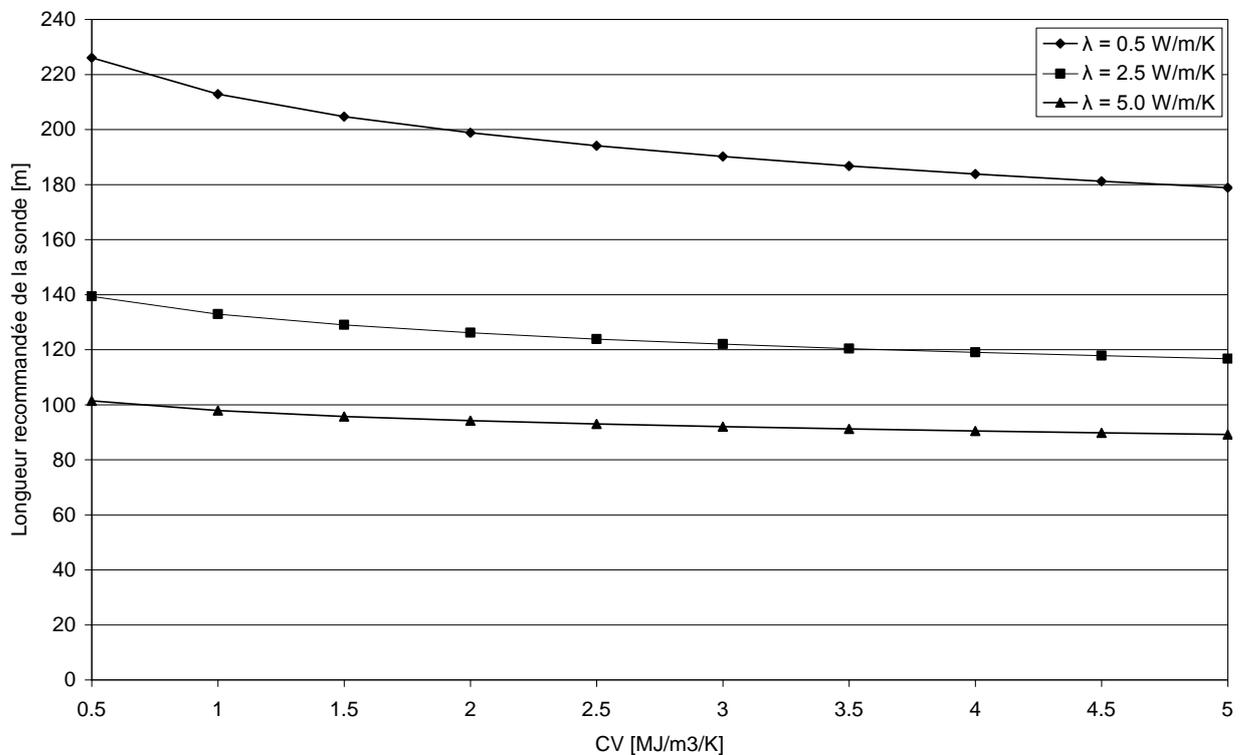


Figure 2.3. Influence de la capacité calorifique sur la longueur de sonde calculée, pour trois conductivités thermiques (valeurs extrêmes : $\lambda=0.5$ et $5.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, valeur standard : $\lambda=2.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) (PGN, 2008).

Tableau 2.2. Conductivité thermique et capacité calorifique de différentes roches (synthèse des normes VDI (2001) et des documents SIA D025, D0136, D0179), (modifié d'après PGN, 2008).

Type de roche	Densité (kg·m ⁻³)	Conductivité thermique (W·mK ⁻¹)	Capacité calorifique (MJ·m ³ K ⁻¹)
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
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

Profondeur de forage autorisée

Dans le canton de Neuchâtel, les secteurs autorisés ainsi que les profondeurs de forage maximales pour le prélèvement de chaleur par SGV sont déterminés par la carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales (BMIC SA, 2010). Cette dernière a été établie essentiellement en fonction de critères géologiques et hydrogéologiques avec, pour objectif, de préserver les eaux souterraines exploitées pour la production d'eau potable. Il s'agit d'un outil essentiel pour le dimensionnement des SGV.

Cette carte délimite les secteurs où la pose de sondes géothermiques verticales est autorisée ou interdite (Figure 2.4). Dans les secteurs interdits, une distinction est faite entre interdiction légale (stricte) et interdiction sur la base de critères hydrogéologiques. Dans ces derniers secteurs, qui couvrent une surface importante du canton, une dérogation peut être accordée sur la base d'une note technique justifiant l'absence de risque hydrogéologique et fixant la profondeur maximale de sondage, dans tous les cas inférieure à 60 m. Dans les secteurs autorisés, une profondeur maximale de forage est donnée (60, 120 ou 180 m).

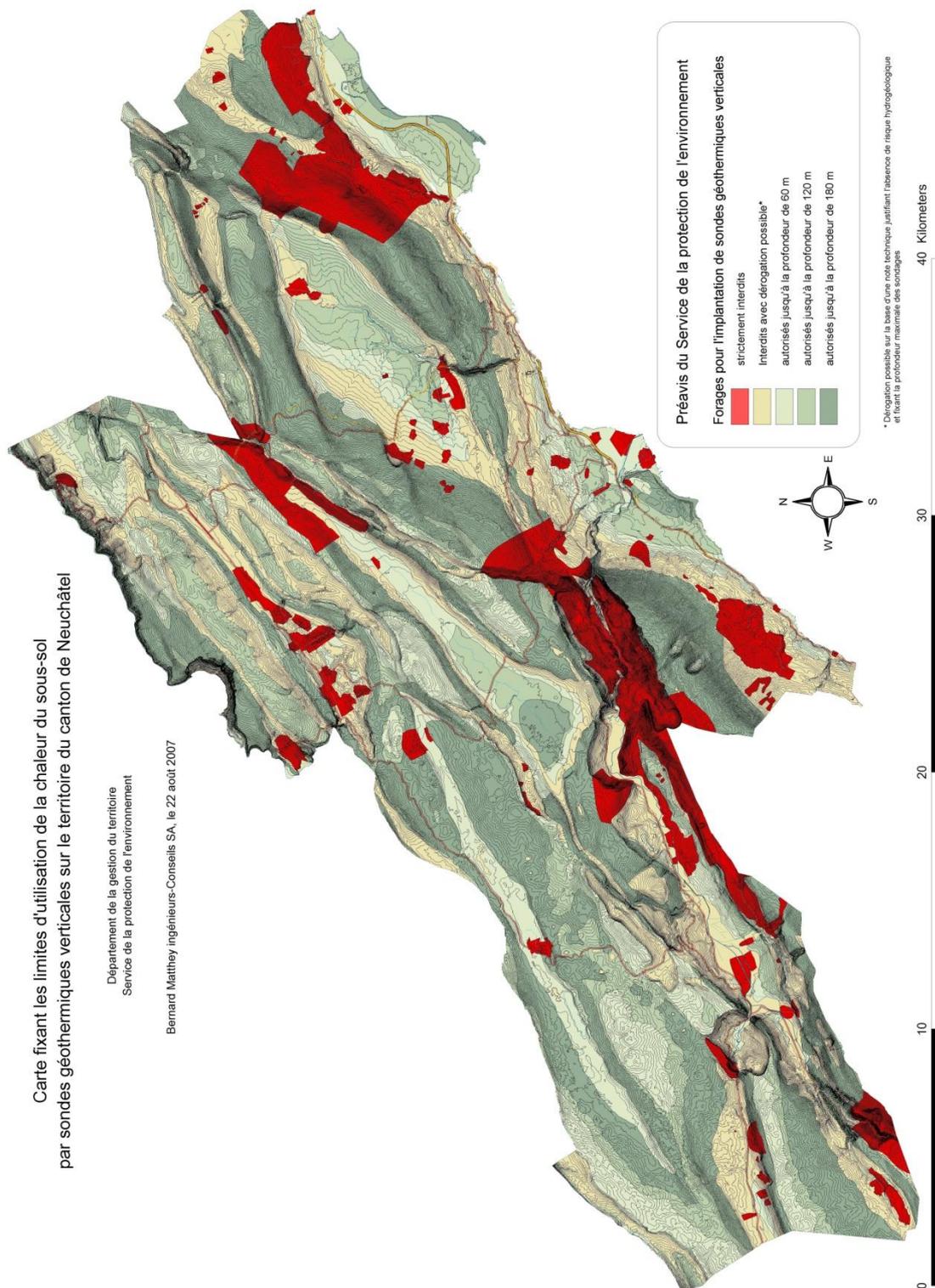


Figure 2.4. Carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sol par sondes géothermiques verticales sur le territoire du canton de Neuchâtel (BMIC SA, 2010).

Température moyenne annuelle de l'air

La température moyenne de l'air est essentiellement fonction de la région climatique et de l'altitude à laquelle se trouve l'installation : il s'agit d'un paramètre important à considérer lors du dimensionnement, car il conditionne la température initiale du terrain à profondeur donnée. En effet, si l'on considère un gradient géothermique dit « normal » de $30\text{ °C}\cdot\text{km}^{-1}$ et une température moyenne annuelle de l'air de 10 °C (Littoral) : à 100 m de profondeur, la température devrait approcher 13 °C . Cependant, si la température moyenne annuelle de l'air est de 6 °C (La Brévine), la température à 100 m de profondeur ne dépassera pas 9 °C .

La température moyenne en profondeur (50 – 200 m) dépend de la température moyenne annuelle de l'air qui, elle, dépend principalement de l'altitude et de la morphologie locale du terrain. L'influence de la morphologie se faisant sentir par exemple par l'orientation d'une vallée ou sa profondeur qui peuvent réduire la durée d'ensoleillement. Cette température aura non seulement une influence sur la température en profondeur, mais également sur le temps de fonctionnement annuel de l'installation. L'accroissement de longueur des sondes résultant de ce paramètre peut-être observé sur la Figure 2.5.

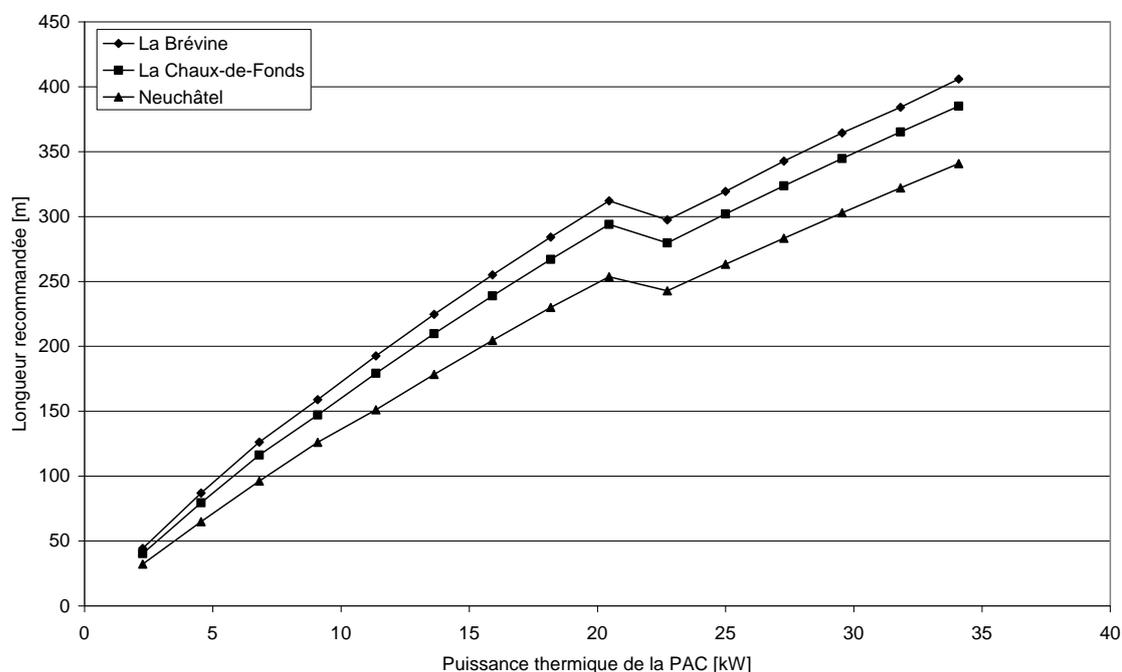


Figure 2.5. Longueur recommandée d'une sonde en fonction de la puissance thermique fournie, pour trois régions climatiques du canton de Neuchâtel. Températures moyennes de l'air considérées : Neuchâtel : 10.6 °C , La Chaux-de-Fonds : 7 °C et La Brévine : 5.8 °C . Le seuil visible entre 20 et 25 kW est dû au changement du régime d'écoulement du fluide de la sonde, lié à l'augmentation du débit nécessaire dans les sondes plus profondes (PGN, 2008).

Prise en compte de la réduction du flux géothermique en terrain karstique

Lorsque l'on soutire la chaleur du sous-sol par sonde géothermique verticale, un abaissement local de la température du terrain est créé : il se manifeste par un cône d'influence thermique et une augmentation du gradient de température radial. Si le système est correctement dimensionné, cet abaissement de température sera en partie résorbé en été (absence de soutirage) par un apport conductif de la roche encaissante. Le rôle du flux géothermique se manifestera surtout sur une élévation de la température initiale du sous-sol à une profondeur donnée et par une proportion plus importante de la recharge dite profonde. Dans des conditions standard, le flux géothermique dans le canton de Neuchâtel est de $0.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Les roches calcaires constituent une grande partie du sous-sol neuchâtelois et sont le siège de circulations karstiques d'eau souterraine. Ces écoulements ont pour effet de drainer une bonne partie du flux géothermique et d'amener son énergie à l'exutoire, ce qui se manifeste par une augmentation de la température moyenne des sources (sources de l'Areuse, de la Serrière, de la Noiraigue). On estime cette élévation moyenne de température des eaux des sources à $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dans les secteurs élevés, situés au-dessus du niveau de base de l'aquifère karstique (Figure 2.6), on peut ainsi constater que le gradient géothermique est réduit et que la température ne varie pas ou peu avec la profondeur. Cette dissipation du flux géothermique a une influence sur le dimensionnement des SGV, comme montré sur la Figure 2.2, les paramètres utilisés pour ces simulations sont résumés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3. Paramètres utilisés pour la simulation en massif calcaire non saturé (PGN, 2008).

Paramètres	Valeur
Terrain calcaire	
Conductivité thermique ($W \cdot mK^{-1}$)	2.8
Capacité calorifique ($MJ \cdot m^{-3}K^{-1}$)	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 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	En fonction de la puissance de l'installation
Résistance de contact ($mK \cdot W^{-1}$)	0
Type de sonde	PE DN 32 mm si L < 150 m PE DN 40 mm si L > 150 m
Espacement des tubes de la sonde en double U (m)	0.07 si L < 150 m 0.08 si L > 150 m
Conductivité thermique du ciment de remplissage ($mK \cdot W^{-1}$)	2.0
Fluide caloporteur	Monopropylène glycol 33 %
COP	4.0
Exploitation	
Lieu d'implantation des sondes	La Chaux-de-Fonds
Durée de fonctionnement annuelle ($h \cdot an^{-1}$)	2'200
Durée (an)	30
Mois de départ	Septembre

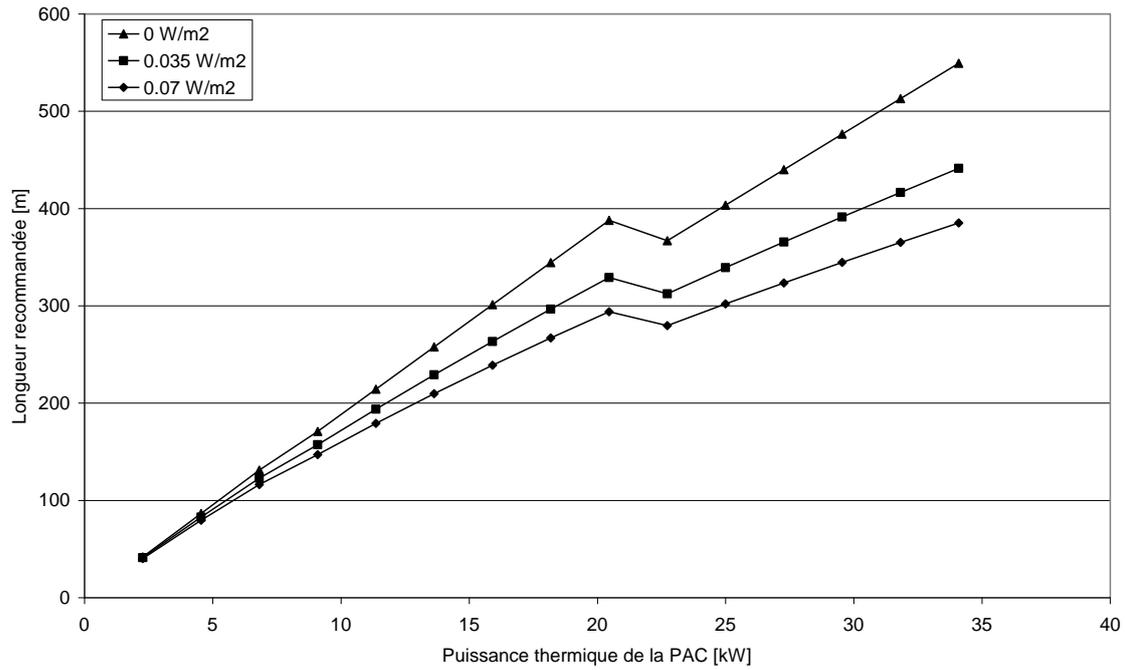


Figure 2.6. Longueur de sonde recommandée en fonction de la puissance thermique fournie, pour trois flux géothermiques : cas normal de $0.07 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, cas intermédiaire de $0.035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et cas extrême de $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, pour lequel la totalité du flux géothermique est absorbé. La rupture des droites entre 20 et 25 kW est due au changement de régime du fluide dans la sonde, lié à l'augmentation du débit.

2.3 Méthodologie de l'étude de potentiel

2.3.1 Quantification du potentiel

Jusqu'à ce jour, il n'existait aucune tentative de calcul du potentiel d'exploitation du sous-sol neuchâtelois par sondes géothermiques verticales. L'énergie que l'on peut extraire du sous-sol à l'aide d'une SGV va dépendre des propriétés thermiques des roches traversées, du dimensionnement de l'installation (longueur de l'échangeur), mais surtout du mode d'exploitation et de gestion de la chaleur du sous-sol. Ainsi, en utilisant le sous-sol comme stockage saisonnier et dans le cas d'une gestion équilibrée, on pourra multiplier jusqu'à un facteur 100 la quantité d'énergie exploitable par rapport au simple prélèvement de la chaleur disponible.

Dans le calcul présenté dans ce chapitre, c'est le potentiel d'exploitation minimal qui a été calculé en se basant sur le mode d'exploitation actuel, soit l'implantation non concertée de sondes géothermiques individuelles sans recharge thermique saisonnière. Des estimations sur les possibilités que représente l'exploitation par recharge et stockage thermique dans le sous-sol sont données au point 0.

En se basant sur l'étude de sensibilité réalisée lors de l'étude PGN (2008), les facteurs suivants ont été retenus pour le calcul du potentiel :

- Profondeur de forage autorisée, tirée de la carte de BMIC SA (2010).
- Caractéristiques des roches (lithologie), déduites de la carte de BMIC SA (2010).
- Etat de saturation du terrain.
- Flux géothermique et ses variations particulières dans le canton de Neuchâtel.
- Température annuelle moyenne de l'air et ses effets sur la température initiale du sous-sol.

Une évaluation sur l'ensemble du territoire a été réalisée pour chaque paramètre et une carte a été établie au format numérique. La compilation des différents paramètres a ensuite permis de classer l'ensemble du territoire neuchâtelois en fonction des paramètres-clé. Une fois cette première étape réalisée, nous avons pu évaluer la réponse thermique et calculer le potentiel d'exploitation du sous-sol neuchâtelois au moyen du logiciel « Earth Energy Designer 2.0 » (EED) et ceci pour différents modes d'exploitation.

2.3.2 Conditions d'implantation des sondes et cartes du sous-sol

Profondeur de forage autorisée

La profondeur de forage autorisée a été cartographiée en se basant sur la carte provisoire établie par BMIC SA (2010). La version de la carte utilisée dans ce travail tient également compte des zones de protection des captages d'eau potable, où la pose de SGV est strictement interdite. Dans les zones dites « avec dérogation possible », une nouvelle catégorie a été prévue avec une profondeur admissible de 30 m. Cette catégorie a été prévue afin de tenir compte, si les conditions le permettent, des possibilités à moyen terme de réaliser des forages à une profondeur inférieure à 60 m.

Caractéristiques des roches

L'ensemble du territoire neuchâtelois a été subdivisé en fonction des lithologies moyennes qui

devraient être rencontrées à une profondeur donnée (Figure 2.8 et Annexe 2.1). Pour établir cette carte, on s'est principalement basé sur les hypothèses de travail de la carte de BMIC SA (2010), elle-même résultat d'une synthèse de la géologie du canton. Pour établir la carte lithologique, un certain nombre de simplifications ont été admises, à savoir :

- Les SGV sont considérées comme étant dans la même formation géologique sur toute leur longueur. Une évaluation plus précise a toutefois été réalisée pour les endroits où cette approximation s'éloignait trop de la réalité.
- Quatre lithologies, représentatives de l'ensemble des roches que l'on trouve dans le canton ont été considérées (Figure 2.7) :
 - Calcaire
 - Molasse (50% limon et 50% grès)
 - Terrains meubles (mélange de sable, gravier et limon)
 - Marno-Calcaire

Calcaire

Un des principes fondamentaux fixant les profondeurs autorisées des forages est que les horizons marneux imperméables (Argovien, Hauterivien inférieur et Purbeckien) ne doivent pas être traversés. Par conséquent, la lithologie « calcaire » a été essentiellement appliquée aux formations du Crétacé, du Malm et du Dogger. Les calcaires peuvent être soit saturés soit secs, et peuvent bénéficier du flux géothermique normal ou ce dernier peut être drainé par des écoulements karstiques. Les hypothèses suivantes ont été faites :

- Le Dogger n'affleurant généralement que sur les combes anticlinales en altitude, il est considéré comme sec et ne bénéficiant pas du flux géothermique.
- Pour le Malm et le Crétacé, la limite supérieure moyenne de la nappe du Malm établie par Kiraly (1973) a été utilisée pour différencier la partie saturée au bénéfice du flux géothermique normal de la partie sèche ne bénéficiant pas du flux. Il s'agit d'une approximation, car la limite supérieure d'une nappe varie en fonction des conditions hydrologiques. La limite choisie est cependant représentative de conditions moyennes. En ce qui concerne le flux, ce dernier sera grandement affecté par le phénomène de drainage karstique uniquement dans la zone d'infiltration - ou de recharge - de l'aquifère. Cette zone étant considérée comme non saturée, nous avons décidé d'utiliser par simplification la même limite que pour l'état de saturation.

Molasse

La molasse est une formation tertiaire que l'on trouve essentiellement dans le fond des vallées (Val-de-Ruz, Vallée des Ponts) et sur le littoral (plateau de Bevaix-Boudry, Littoral Est). De ce fait, elle est considérée comme toujours saturée et au bénéfice d'un flux géothermique normal. Pour les simulations, la molasse a été considérée comme constituée d'une proportion égale de limon et de grès.

Terrains meubles

Cette lithologie regroupe toutes les formations quaternaires récentes. Les terrains meubles (moraine, alluvions, éboulis) sont répartis sur l'ensemble du territoire, mais cette lithologie n'a été appliquée qu'aux zones où la profondeur de sédiments quaternaires avait une épaisseur d'au moins 30 m. Les terrains meubles sont considérés comme constitués d'une proportion égale de limons, de sables et de graviers, tous saturés en eau.

Marno-calcaire

Cette lithologie a été utilisée pour les alternances de marne et de calcaire et lorsque il n'était pas possible de distinguer les unités à l'échelle considérée pour cette évaluation. Ce cas est également appliqué dans le cas des autorisations partielles de forage dans les unités imperméables (La Brévine, Nord du Val-de-Ruz).

Même si la carte obtenue (Figure 2.8) tient compte de nombreuses approximations et simplifications, on soulignera que la réalisation de la carte des lithologies du canton de Neuchâtel est un résultat méritant d'être valorisé comme outil d'aide à l'implantation des forages pour les SGV.

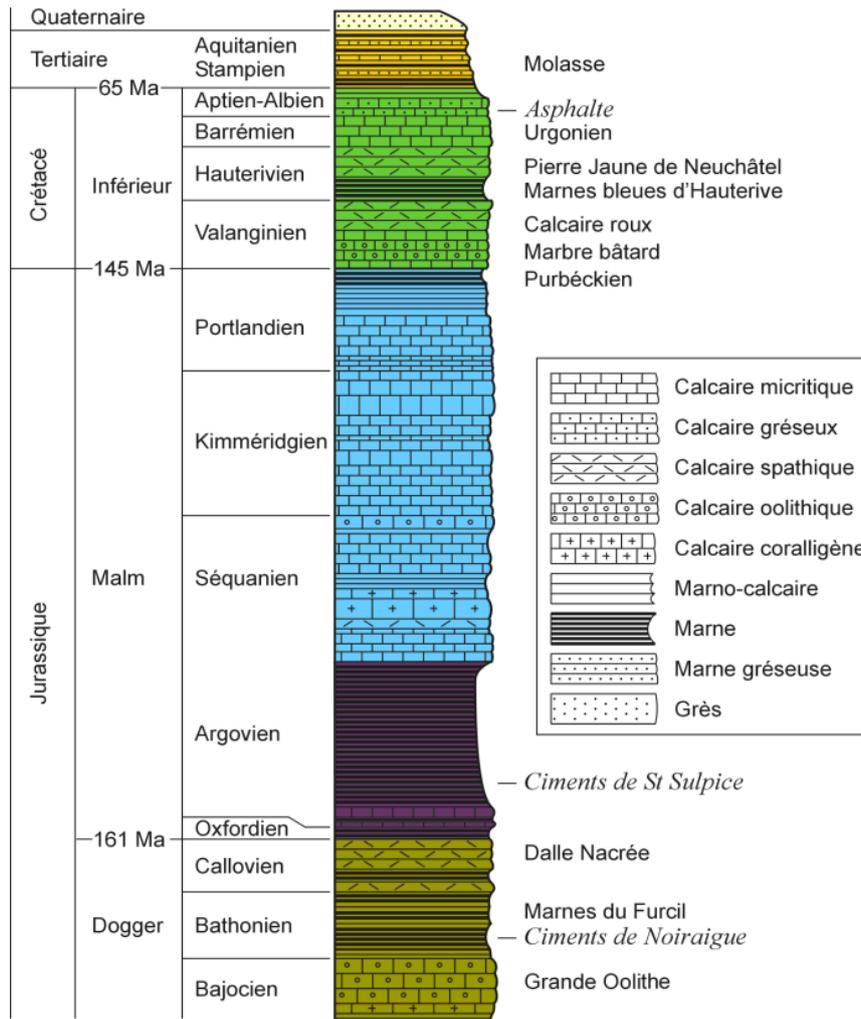


Figure 2.7. Colonne stratigraphique synthétique des roches sédimentaires affleurant dans le canton de Neuchâtel (Schaer et al. 2008).

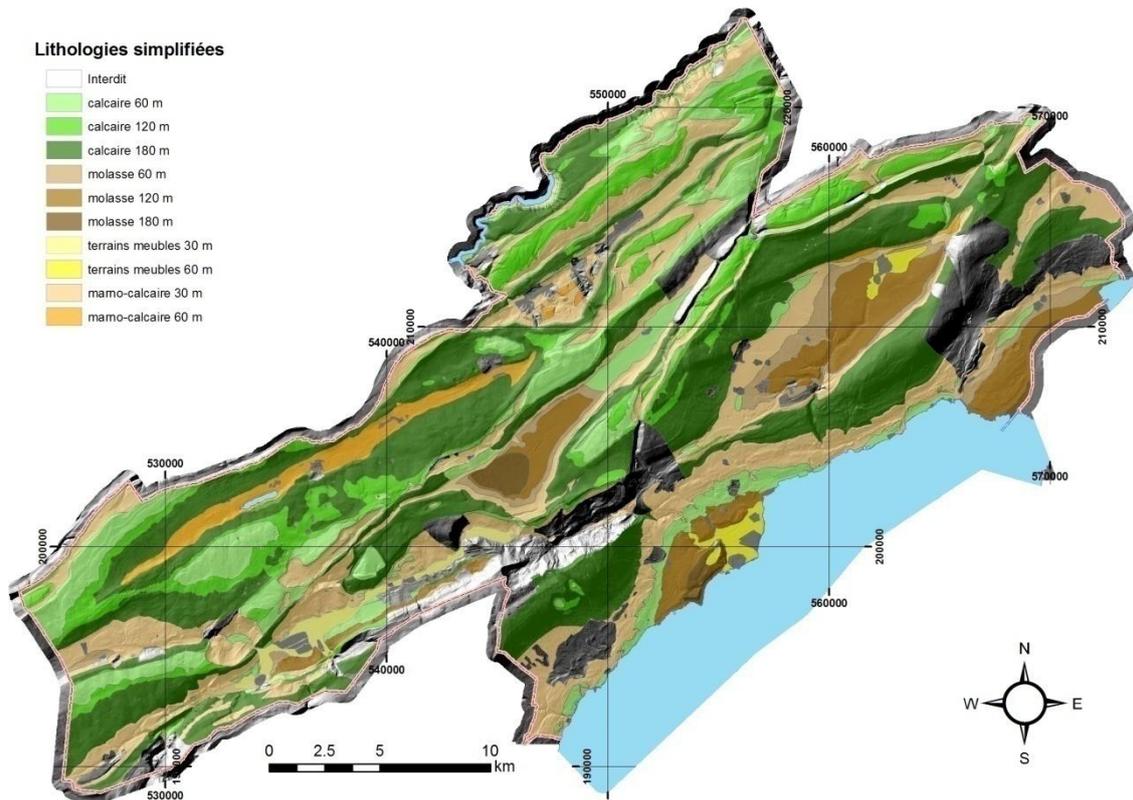


Figure 2.8. Synthèse des profondeurs de forage autorisées et des lithologies simplifiées qui devraient être rencontrées jusqu'à ces profondeurs pour le canton de Neuchâtel (carte reproduite à plus grande échelle dans l'Annexe 2.2).

Etat de saturation en eau du terrain et flux géothermique

En tenant compte de l'état de saturation en eau du terrain et du flux géothermique, des hypothèses simplificatrices ont été utilisées pour chaque lithologie (voir ci-dessus), afin d'éviter une trop grande complexité du calcul et une multiplication importante du nombre de simulations à effectuer. Le résultat peut être consulté sur la Figure 2.9 et à l'Annexe 2.3.

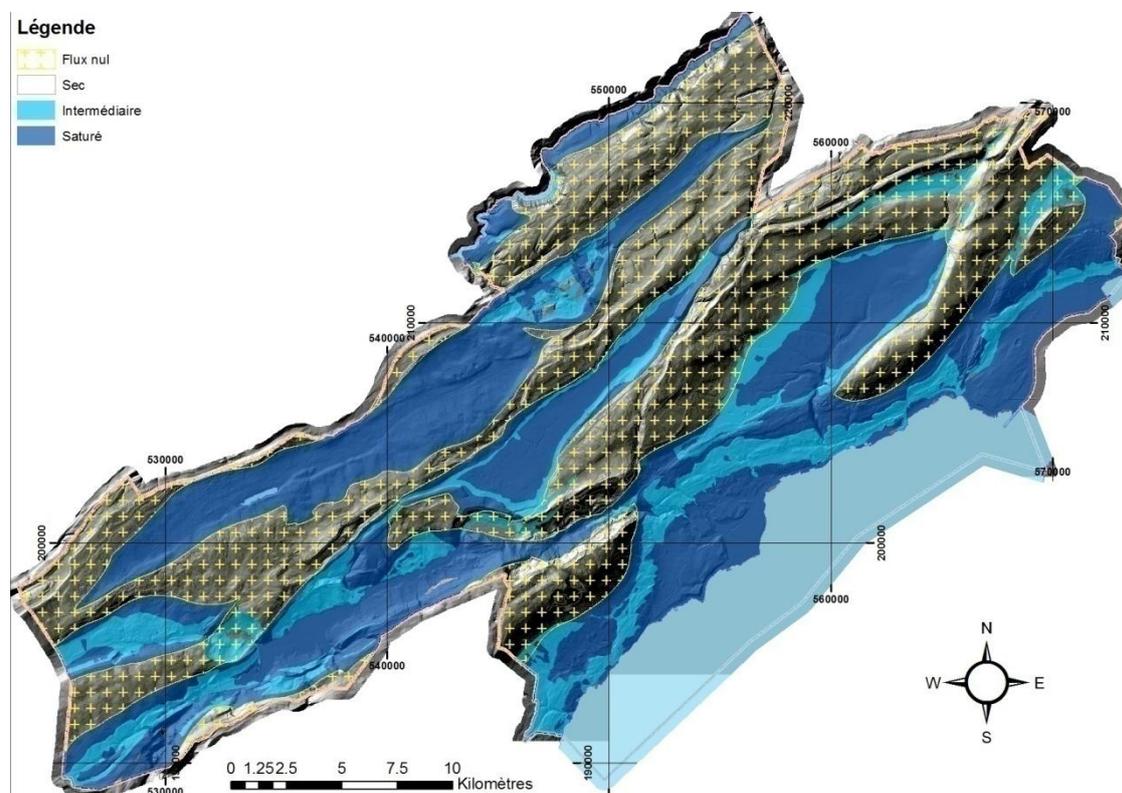


Figure 2.9. Etat de saturation du terrain et zones de flux nul pour le canton de Neuchâtel.

2.3.3 Température moyenne annuelle

La température moyenne annuelle de l'air a une influence sur l'énergie que l'on peut tirer par mètre de sonde. Dans cette étude, nous avons utilisé deux paramètres pour définir la température annuelle moyenne de l'air en tout point du canton : la température moyenne annuelle régionale et l'altitude.

Température moyenne annuelle régionale

Les températures moyennes journalières ne sont données que pour cinq des neuf régions météorologiques du canton de Neuchâtel (www.ne.ch). Les degrés-jours annuels étant par contre connus pour l'ensemble des régions, il a été dès lors possible de calculer une température moyenne pour les neuf régions, à l'altitude de la station de mesure.

Altitude

Le gradient altimétrique standard représente une perte de température de 5.5 °C par kilomètre. Nous avons donc calculé la différence d'altitude en tout point des régions météorologiques par rapport à leur station de mesure. L'application du gradient cité précédemment permet alors d'obtenir la température moyenne annuelle en tout point du canton (Figure 2.10 et Annexe 2.4).

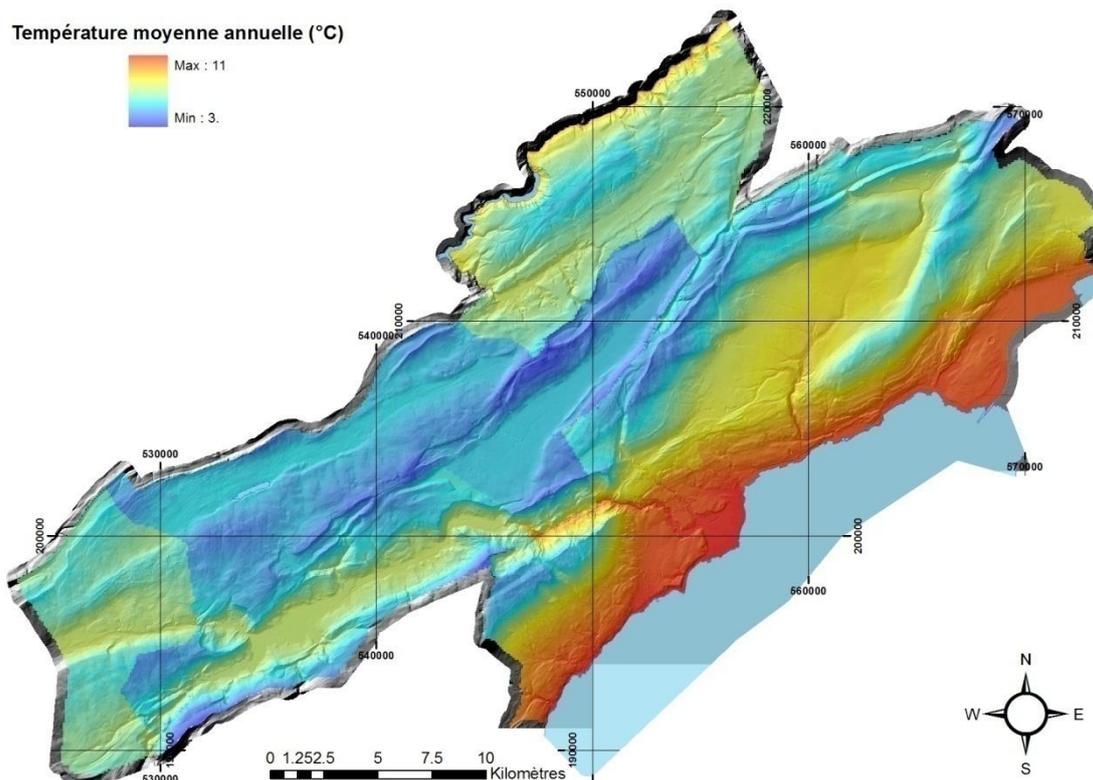


Figure 2.10. Carte des températures moyennes annuelles du canton.

2.3.4 Calcul du potentiel

Simulations

Les paramètres cités précédemment ont permis d'effectuer des simulations avec le programme « Earth Energy Designer 2.0 » (EED), tout en fixant les paramètres liés au site par utilisation de valeurs standard. Les simulations ont été réalisées selon trois approches – ou modes – différents qui se traduisent par des espacements variables entre les sondes (Hellström et al., 2000).

Dans les trois modes utilisés, le cas de la recharge et du stockage thermique saisonnier n'est pas considéré. Le calcul du potentiel représente donc des valeurs d'énergie soutirable minimales, qui correspondent au mode d'exploitation du sous-sol tel qu'il est pratiqué actuellement.

Les conditions cadre considérées pour les calculs EED sont les suivantes :

- Sonde double U 32 mm, liquide caloporteur : monopropylène de glycol 33 % circulant en régime turbulent. Pour les forages de 180 m, sondes de diamètre 40 mm.
- Forage 130 mm équipé de distanceurs et avec ciment de remplissage de bonne qualité $\lambda = 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Condition d'utilisation standard avec production d'eau chaude sanitaire et durée de fonctionnement annuel de la PAC de 2'200 heures $\cdot\text{an}^{-1}$.
- Pas de nappe souterraine active.
- Température minimale admise dans la sonde en période de pointe : 0 °C, en moyenne entre l'aller et le retour.

- Température moyenne de l'air à Neuchâtel, 10.2 °C et extrapolation des résultats en tout point du canton en tenant compte de la température annuelle moyenne de l'air.

Mode 1 - Sondes uniques avec espacement variable

Dans cette approche, le potentiel est estimé par simulation numérique, en déterminant la puissance exploitable par une sonde unique dont la longueur est donnée en fonction des conditions locales du sous-sol neuchâtelois. L'énergie exploitable exprimée en MW·ha⁻¹ est ensuite calculée en estimant la distance nécessaire entre chaque sonde, afin d'éviter toute interaction entre les ouvrages après 30 ans d'exploitation saisonnière pour la production de chauffage (Tableau 2.4). Dans cette configuration, la température du sous-sol se stabilise après quelques années d'exploitation, avec un refroidissement moyen de 1° C par rapport aux conditions non influencées. L'énergie exploitable en MW·ha⁻¹ selon cette méthode de calcul sur toute la surface du canton est représentée sur la Figure 2.11 et à l'Annexe 2.5.

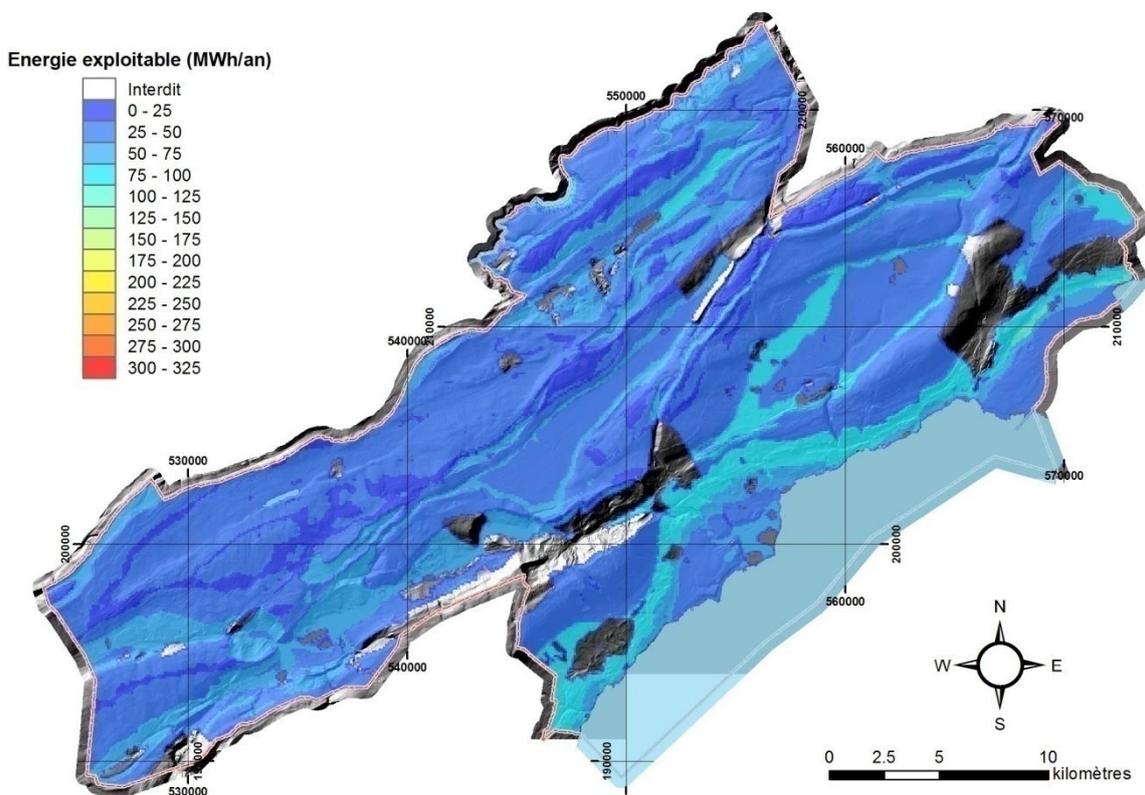


Figure 2.11. Carte de l'énergie annuelle exploitable pour le mode 1 par hectare pour le canton de Neuchâtel.

Mode 2 - Exploitation avec espacement fixe

Dans une seconde approche, on calcule l'énergie exploitable par simulation EED de sondes régulièrement espacées sur une surface de 4 hectares. L'espacement a été fixé arbitrairement à 20 m, correspondant à l'implantation dans des zones d'habitation de moyenne densité. La puissance exploitable dans chaque sonde est alors déterminée en fonction de la nature du terrain, des conditions locales et tient compte de l'interaction entre les sondes. Après 30 ans d'exploitation, l'équilibre thermique n'est pas atteint, ce qui signifie que la température du sous-sol diminue progressivement et que la recharge naturelle en été ne permet pas d'équilibrer le système. Dans ce cas, le terrain finira par geler au-delà de la période d'exploitation de 30 ans. L'énergie exploitable pour un tel mode d'utilisation est présentée sur la carte de la Figure 2.12 et à l'Annexe 2.5.

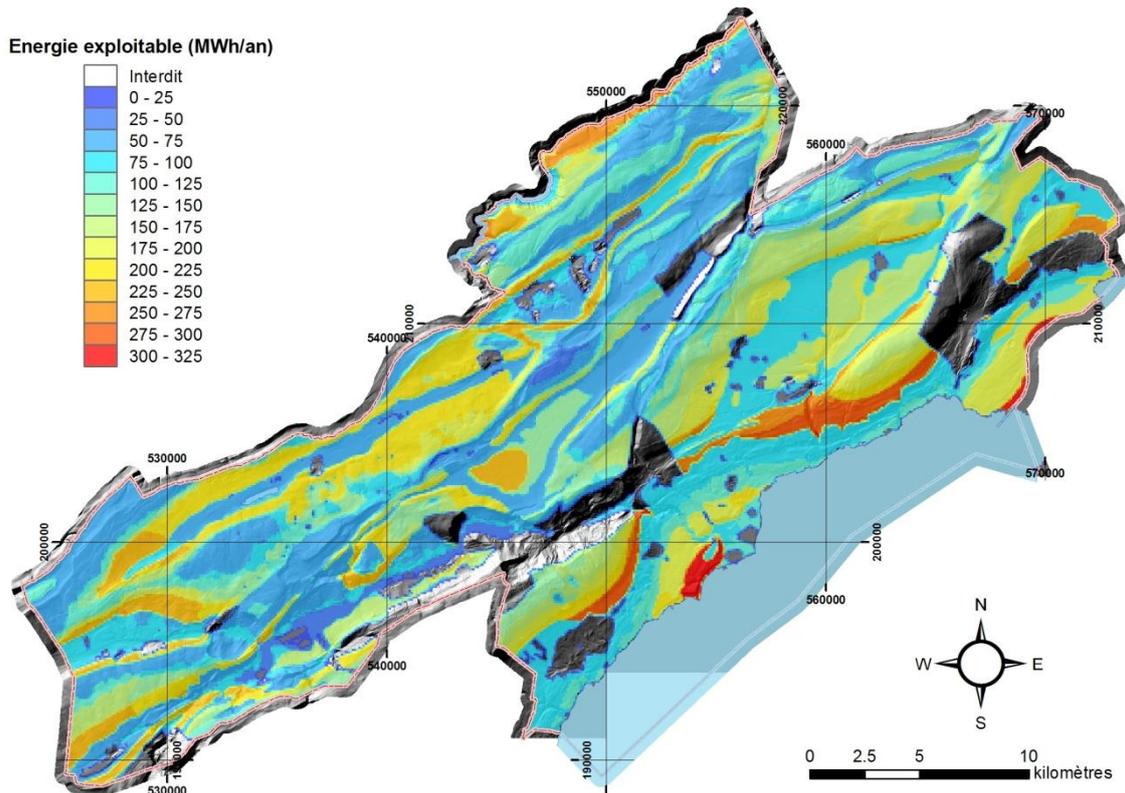


Figure 2.12. Carte de l'énergie annuelle exploitable pour le mode 2 par hectare pour le canton de Neuchâtel. Calcul effectué pour une grille de 10x10 sondes espacées de 20 m, à l'exception des forages de 30 m de profondeur pour lesquels une distance de 15 m a été utilisée.

Mode 3 - Exploitation maximale sans geler le terrain, puis recharge pendant un temps égal

Enfin, les résultats du Mode 2 ont été repris, mais en calculant le potentiel exploitable sur une période de 60 ans, ce qui correspond à la durée de l'exploitation et à la période de recharge. Cela revient à réduire de moitié le potentiel du Mode 2, en imposant une période de non-exploitation de 30 ans, afin de laisser le terrain se recharger comme présenté sur la Figure 2.13 et à l'Annexe 2.5. Ce mode correspond à l'exploitation pratiquée actuellement. Afin de représenter cet effet lors du calcul du potentiel, nous avons utilisé les valeurs obtenues pour le mode d'exploitation précédent que nous avons divisées par deux.

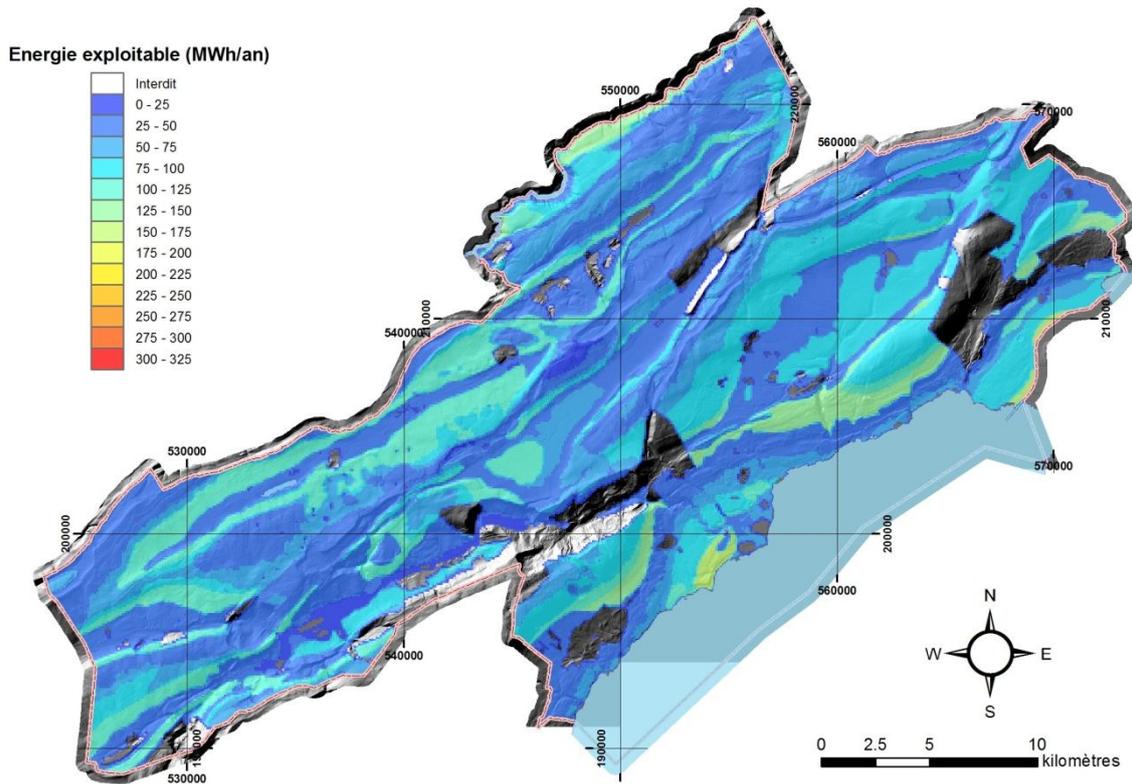


Figure 2.13. Carte de l'énergie annuelle exploitable pour le mode 3 par SGV par hectare pour le canton de Neuchâtel. Calcul effectué pour des champs de 10x10 sondes espacées de 20 m, à l'exception des forages de 30 m de profondeur pour lesquels une distance de 15 m a été utilisée. Le calcul tient compte d'un temps de recharge de 30 ans égal à la durée de l'exploitation.

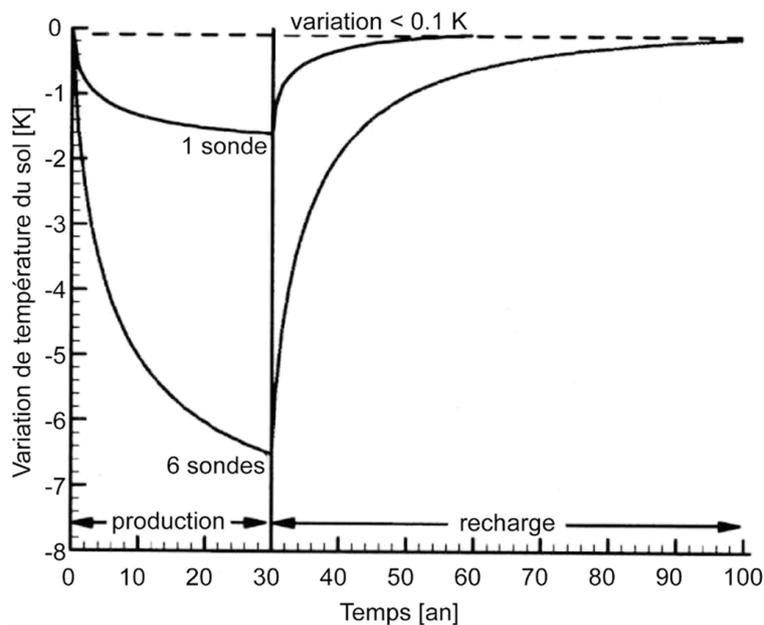


Figure 2.14. Variation de température calculée dans le sol à une profondeur de 50 m et à 0.12 m de distance d'une sonde de 100 m de profondeur ou de six sondes de 100 m de profondeur espacées de 7.5 m (Signorelli et al. 2004).

Carte de potentiel

Les simulations effectuées ont permis de calculer l'énergie exploitable en fonction des paramètres déterminés pour le canton en fonction de 3 approches choisies. Ces résultats ont été valorisés de deux façons différentes, soit :

1. Etablissement de cartes du potentiel cantonal pour chaque mode, puis comparaison avec les besoins totaux de chaleur (cf. détails dans le chapitre 5 sur le potentiel des aquifères profonds).
2. Calcul du potentiel de chaque commune, en mettant en relation les périmètres d'urbanisation et les résultats des simulations. Un exemple est présenté à la Figure 2.15, l'ensemble de ces cartes figurent en annexe (Annexe 2.1). Cette approche permet également de voir quelle fraction de l'énergie disponible sur l'ensemble du canton peut effectivement être exploitée.

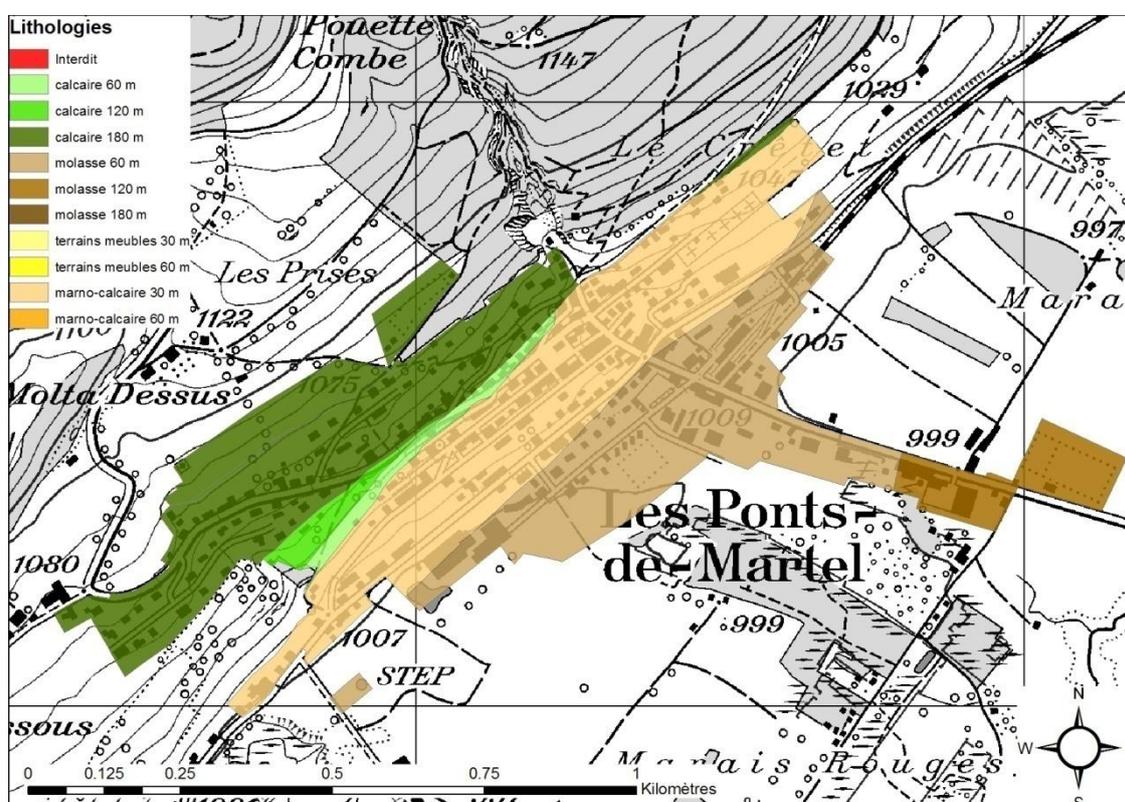


Figure 2.15. Carte des différentes lithologies appliquées au périmètre d'urbanisation de la commune des Ponts-de-Martel, utilisée pour le calcul du potentiel communal.

2.4 Résultats

2.4.1 Résultats des simulations

Les simulations effectuées ont permis de calculer le potentiel cantonal et le potentiel pour chaque commune neuchâteloise. Cela a également permis de déterminer l'énergie exploitable par mètre de sonde dans chaque secteur du canton en fonction des approches choisies. Les résultats présentés dans le Tableau 2.4 proviennent des simulations effectuées au moyen des paramètres décrits au point 2.3.4 et des remarques générales concernant les trois modes de calcul du potentiel par simulation EED sont présentées ci-dessous.

Mode 1

Un refroidissement moyen de 1° C de la température du sous-sol après 30 ans au voisinage du puits a été considéré pour les simulations. Les puissances exploitables (altitude de référence Neuchâtel) par mètre de sonde qui en résultent sont comprises entre 35.6 et 47 W·m⁻¹. Cette variation est due aux différentes profondeurs de forage et aux conditions géologiques. La distance nécessaire entre les sondes varie également d'une lithologie à l'autre et en fonction de la profondeur. De manière générale il est possible de dire que la distance nécessaire pour éviter toute interaction entre deux sondes est égale à la moitié de leur profondeur.

Dans cette approche, la distance nécessaire calculée entre les sondes a beaucoup d'influence sur l'énergie exploitable. Pour les forages profonds en particulier, la méthode est très conservatrice car l'emprise thermique théorique couvre une surface importante et, par conséquent, la densité de sondes qu'il est théoriquement possible d'implanter par hectare de terrain diminue avec le carré de l'espacement entre ces dernières.

Mode 2

La méthode de calcul permet d'estimer la puissance exploitable sur 30 ans avec un espacement fixe de 20 m entre les sondes. Pour les forages limités à 30 m de profondeur, une distance de 15 m a été considérée (limitation du programme EED). La simulation a été effectuée pour 100 sondes espacées de 20 m, soit une densité de 25 sondes par ha. Ces résultats peuvent être extrapolés sur l'ensemble du territoire.

La puissance exploitable par mètre de sonde (altitude de référence Neuchâtel) varie entre 25.5 et 34.6 W·m⁻¹. Cette variation est due aux différentes profondeurs de forage et aux conditions géologiques. Par rapport au mode 1, la puissance exploitable par sonde est inférieure, mais le nombre de sondes qu'il est théoriquement possible d'implanter par unité de surface est plus élevé, si bien que l'énergie finale exploitable est supérieure. Sur la base des puissances exploitables fournies au Tableau 2.4, il est possible d'observer que la température du sous-sol diminue en moyenne de 3 °C après 30 ans et que l'équilibre entre ce qui est prélevé et la recharge naturelle n'est pas atteint. Ce mode de calcul sous-entend que l'installation ne pourra être utilisée avec le même rendement après 30 ans d'exploitation. La sonde sera donc abandonnée après 30 ans, afin de permettre au terrain de se recharger de lui-même durant une période égale (mode 3).

Mode 3

Le mode 3 reprend les mêmes paramètres que ceux utilisés pour calculer le mode 2. Cependant il prend en compte une recharge du terrain pendant une durée égale à celle de l'exploitation (30 ans). De ce fait, nous avons divisé par 2 la puissance exploitable par mètre de sonde pour que le système soit équilibré à long terme. Ces valeurs ne représentent donc pas la puissance instantanée réelle qu'il est possible d'obtenir, mais la puissance moyenne sur 60 ans. Cette approche relativement conservatrice est considérée comme la plus raisonnable pour calculer le potentiel exploitable

durablement, sans recharge ni stockage thermique. C'est ce mode qui est utilisé pour la plupart des analyses qui suivront car il est le plus représentatif.

Tableau 2.4. Résultats des simulations du potentiel exploitable par mètre de sonde dans les conditions particulières du canton de Neuchâtel.

Lithologie	Profondeur de forage (m)	Flux géothermique (W/m ²)	Etat de saturation en eau	Mode 1			Mode 2 ⁴⁾		Mode 3 ⁴⁾	
				P _{sonde} ¹⁾ (W·m ⁻¹)	ΔP _{sonde} ²⁾ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Espacement min. entre les sondes ³⁾ (m)	P _{sonde} ¹⁾ (W·m ⁻¹)	ΔP _{sonde} ²⁾ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	P _{sonde} ¹⁾ (W·m ⁻¹)	ΔP _{sonde} ²⁾ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
Calcaire	60	0	Sec	38.5	3.3	33	30.6	2.7	15.3	1.4
		0.07	Sat.	41.7	3.2	33	32.7	2.6	16.4	1.3
	120	0	Sec	37.5	3.2	54	26.3	2.3	13.2	1.2
		0.07	Sat.	43.4	3.1	58	30.2	2.3	15.1	1.2
	180	0	Sec	38.4	3.2	55	25.5	2.3	12.8	1.2
		0.07	Sat.	47.0	3.1	61	31.1	2.2	15.6	1.1
Molasse	60	0.07	Saturé	39.3	2.8	31	31.2	2.2	15.6	1.1
	120			41.4	2.5	56	29.6	1.9	14.8	1.0
	180			45.5	2.2	63	31.2	1.7	15.6	0.9
Terrains meubles	30	0.07	Saturé	35.9	2.8	16	30.5	2.2	15.3	1.1
	60			36.4	2.7	31	29.2	2.1	14.6	1.0
Marno-calcaires	30	0.07	Sec	35.6	3.3	16.6	30.0	2.2	15.0	1.1
			Inter.	38.5	3.1	16.6	32.3	2.4	16.2	1.2
			Sat.	41.3	2.8	16.5	34.6	2.6	17.3	1.3
	60	0.07	Sec.	35.9	2.5	31.2	28.0	1.9	14.0	1.0
			Sat.	41.3	3.0	31.3	32.2	2.3	16.1	1.2

(1) Puissance qu'il est possible de soutirer au terrain par mètre linéaire de sonde à l'altitude de Neuchâtel sans recharge saisonnière.

(2) Puissance supplémentaire qu'il est possible de soutirer au terrain par mètre linéaire de sonde et pour une différence de température moyenne de l'air de 1 °C.

(3) Espacement nécessaire entre chaque sonde afin d'éviter, dans l'absolu, toute influence d'une installation sur l'autre.

(4) L'espacement entre les sondes a été fixé à 20 m sauf pour les lithologies suivantes : Terrain meubles 30 m, ainsi que Marno-calcaire 30 m sec et Intermédiaire. Pour les lithologies, l'espacement a été fixé à 15 m.

Les cases grisées représentent les valeurs obtenues par extrapolation des valeurs de simulation.

2.4.2 Potentiel cantonal des sondes géothermiques verticales

Le potentiel cantonal a été évalué pour quatre approches différentes, soit une approche très générale basée sur le flux géothermique moyen et les trois modes de simulation EED exposés au point 2.3.1. Les valeurs obtenues ont alors été comparées à la demande d'énergie cantonale établie dans le chapitre 6, potentiel des aquifères profonds (APR).

Calcul de l'énergie dissipée par le flux géothermique

Dans une approche très conservatrice, il est possible de calculer l'énergie dissipée à l'état naturel par le flux géothermique. Ce flux de chaleur représente la part d'énergie utilisable durablement sans que la température du milieu ne soit modifiée. Ainsi le prélèvement ne sera effectué que sur ce qui est dissipé naturellement et rien ne sera prélevé dans la réserve thermique du sous-sol. Il n'y aura aucune manifestation de l'exploitation de cette chaleur, car il n'y aura aucun refroidissement à long terme du sous-sol, ceci en ne tenant compte que de la recharge naturelle. Il faut considérer également qu'une partie de l'énergie captée jusqu'à environ 20 m de profondeur est fournie par le rayonnement solaire. Le calcul est le suivant :

Flux géothermique moyen :	0.07 W·m ⁻²
Arrondi pour tenir compte du flux solaire :	0.1 W·m ⁻²
Energie annuelle (8760 h·an ⁻¹) :	9 MWh·ha ⁻¹ ·an ⁻¹
Surface cantonale (excepté lac de Neuchâtel et secteurs strictement interdits) :	62'700 ha
Energie exploitable sur l'ensemble du canton :	554 GWh/an

Approches par modélisation numérique

Le tableau ci-dessous permet de comparer les résultats obtenus en fonction des différents modes d'exploitation.

Tableau 2.5. Comparatif des différents modes d'utilisation des sondes géothermiques verticales. La quantité exprimée représente l'énergie soutirée au terrain.

Type d'exploitation	Mode Flux	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Energie théorique exploitable sur l'ensemble du territoire (GWh/an)	554	2'750	8'100	4'050
Demande cantonale sur l'ensemble du territoire (GWh/an) ¹⁾	1'590			
Couverture de la demande (%)	35	173	509	255

(1) La demande cantonale annuelle en énergie de chauffage a été établie grâce à la carte de densité de volume construit (cf. chapitre 6) en considérant une consommation moyenne de 30 kWh·m⁻³·an⁻¹. La demande calculée ici est considérée comme l'énergie à fournir à l'évaporateur de pompes à chaleur conventionnelles (COP=4), énergie qui sera prélevée dans le sous-sol.

De manière très théorique, l'exploitation de l'ensemble du territoire cantonal par sondes géothermiques verticales, y compris les zones non-constructibles et éloignées de toute habitation, permettrait de fournir :

- 35 % de la demande en énergie de chauffage, pour le cas où l'on n'exploite que le flux géothermique moyen à la surface du territoire cantonal (méthode très conservative).
- de 170 % à 510 % de la demande, selon le refroidissement moyen du terrain considéré et la durabilité de l'exploitation. Les résultats fournis par les trois modes de simulation numérique sont du même ordre de grandeur.
- Les nombres donnés ici sont des valeurs moyennes réparties sur l'ensemble du canton. Il est bien évident que dans les secteurs habités, on ne pourra pas répondre à tous les besoins sans recharge saisonnière du terrain.

2.4.3 Potentiel communal

Le potentiel communal a été calculé en utilisant les résultats des simulations (modes 1 à 3) et en se basant sur les périmètres d'urbanisation de chaque commune du canton. L'hypothèse étant que, selon toute vraisemblance, les SGV seront implantées à l'intérieur de ces périmètres. Les communes ont été regroupées par régions climatiques, afin de faciliter la lecture. La demande a été calculée en suivant la même méthode que celle utilisée pour déterminer la demande cantonale (chapitre 6), mais en ne considérant que les bâtiments présents dans les zones d'urbanisation. L'énergie potentielle théoriquement disponible annuellement pour chaque mode de calcul a, quant à elle, été obtenue en implantant le maximum possible de sondes à la profondeur maximale autorisée dans ces zones d'urbanisation. Les secteurs où elles sont strictement interdites n'ont cependant pas été considérées (Figure 2.4). La valeur potentielle ainsi obtenue comprend également le potentiel des secteurs soumis à dérogation. Pour ces derniers, la profondeur du forage devant être inférieure à 60 m, le calcul du potentiel a été effectué en fixant la profondeur à une valeur moyenne, soit 30 m. La part de l'énergie potentielle représentée par ces secteurs pour chaque mode de calcul est présentée dans une colonne à part nommée « soumis à dérogation ». La colonne « part couverte » est le pourcentage de la demande couverte par l'énergie exploitable selon chaque méthode de calcul.

Région climatique de la vallée de la Brévine

Sur le territoire de la commune de la Brévine se trouvent deux périmètres d'urbanisation. Il s'agit du village lui-même et du lieu dit « Chez Guenet ». Le périmètre du village est majoritairement en zone interdite avec de petites zones possibles jusqu'à 60 m (vers le cimetière et « Chobert »). Au lieu dit « Chez Guenet », il s'agit de calcaires et l'autorisation de forer est de 180 m; c'est donc cette zone qui représente l'essentiel du potentiel. L'utilisation de SGV devrait y être recommandée tout en respectant les spécificités locales pour le dimensionnement.

La situation est légèrement différente sur le territoire communal du Cerneux-Péquignot : le village est une zone favorable à l'implantation de SGV tant par la lithologie que par la profondeur de forage autorisée. Au lieu dit « Le Gigot » le forage est soumis à dérogation : l'implantation de SGV y est par conséquent moins intéressante. Le Tableau 2.6 permet de constater qu'au minimum 48 % de la demande communale peut-être couverte (mode 3). L'utilisation de SGV pourrait donc être promue pour le village.

À la Chaux-du-Milieu, trois zones différentes sont observées : au sud de la route (village et lieu dit « La Forge »), au nord de la route (Village) et la Porte des Chaux. Le potentiel communal est important car il permettrait de couvrir au minimum 45 % de la demande communale. Les zones les plus propices se situent au sud de la route (village et « La Forge ») et à la Porte des Chaux lorsque le forage n'est pas interdit.

Tableau 2.6. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique de la Brévine. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
La Brévine	4.3	0.3	0.0	5	1.1	0.0	26	0.6	0.0	10
Le Cerneux-Péquignot	1.5	0.4	0.1	29	1.5	0.1	95	0.7	0.0	48
La Chaux-du-Milieu	1.5	0.4	0.0	20	1.8	0.0	120	0.9	0.0	45
Total	7.3	1.1	0.1	15	4.3	0.1	60	2.2	0.0	30

Région climatique de La Chaux-de-Fonds

L'implantation de SGV dans la vallée où se situe la ville de La Chaux-de-Fonds est, en règle générale, soumise à dérogation et, dans les environs de l'aéroport des Eplatures, le forage y est même interdit. De ce fait, une part importante du potentiel présenté dans le Tableau 2.7 est soumis à dérogation (env. 30 %). Il existe cependant deux bandes, au nord et au sud de la vallée, où le forage est autorisé et l'implantation des SGV devrait y être recommandée surtout dans les quartiers où la densité d'habitation est moins élevée.

Pour la commune du Pâquier, un seul périmètre d'urbanisation est répertorié. L'implantation des SGV y est soit interdite, soit soumise à dérogation; le potentiel communal calculé dépend donc de cette dérogation et n'est pas très important. Dans le cas d'une volonté forte d'implanter des SGV dans le village, il est recommandé d'effectuer une étude géologique locale afin de déterminer le plus précisément possible quelle serait la profondeur de forage possible et ainsi recalculer ce potentiel.

La situation est tout autre aux Planchettes, car le village se trouve au-dessus de calcaires et l'autorisation de forer est de 180 m. De ce fait, le potentiel est très important puisqu'il couvre au minimum 70 % de la demande communale.

Tableau 2.7. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique de La Chaux-de-Fonds. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
La Chaux-de-Fonds	299.5	45.6	30.8	15	99.6	32.1	33	49.8	16.0	17
Le Pâquier	1.6	0.6	0.6	37	0.6	0.6	39	0.3	0.3	19
Les Planchettes	0.8	0.3	0.0	34	1.1	0.0	138	0.5	0.0	69
Total	301.9	46.4	30.8	15	101.3	32.1	34	50.7	16.0	17

Région climatique du littoral Est

La situation est similaire pour les trois communes de cette région climatique : la profondeur de

forage autorisée augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la Thielle. Pour les communes de Cornaux et de Cressier, le potentiel présenté dans le Tableau 2.8 doit être considéré avec précaution. En effet, au niveau des villages, l'autorisation de forer est soit soumise à dérogation, soit autorisée jusqu'à 60 m ce qui n'est pas très favorable. Une bonne partie de ce potentiel reflète donc les possibilités de forer qui existent dans les zones industrielles mais qui ne seront, vraisemblablement, pas réalisées. Cette constatation n'est pas valable pour Le Landeron car au sud, là où le potentiel est intéressant, il s'agit d'habitations et l'utilisation des SGV devrait y être encouragée.

Tableau 2.8. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique du Littoral Est. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
Cornaux	23.3	7.4	0.0	32	23.8	0.0	102	11.9	0.0	51
Cressier	29.3	8.0	2.1	27	23.5	2.1	80	11.7	1.1	40
Le Landeron	27.7	9.3	2.0	34	21.8	2.1	79	10.9	1.0	39
Total	80.3	24.7	4.1	31	69.1	4.2	86	34.6	2.1	43

Région climatique du littoral Ouest

Il est possible de diviser les communes de cette région en deux groupes :

Nord-est : Bevaix, Boudry, Bôle, Cortaillod et Colombier.

Sud-ouest : Vaumarcus, Fresens, Montalchez, St Aubin-Sauges et Gorgier – Chez-le-Bart.

Pour le groupe sud-ouest, la plupart des périmètres d'urbanisation se situent en zone soumise à dérogation et le potentiel n'y est, par conséquent, pas très important. Dans le cas d'une volonté d'implanter des SGV dans ces communes, il est recommandé d'effectuer une étude géologique locale afin de déterminer le plus précisément possible quelle serait la profondeur de forage possible et ainsi permettre de recalculer ce potentiel. Il existe cependant une exception : la commune de St Aubin-Sauges, car dans le village de Sauges ainsi qu'au bord du lac à St Aubin, il est possible de forer à 60 m cependant, 50 % du potentiel présenté au *Tableau 2.9* reste soumis à dérogation.

La situation des communes du nord-est est beaucoup plus favorable, à l'exception de la commune de Bôle, car la profondeur de forage n'y est que de 60 m. À Bevaix, les régions les plus propices se situent au nord-est du village et sur le littoral, car l'autorisation de forer est de 120 m. L'implantation des SGV y est recommandée, car le potentiel est important (au minimum 46 %) et la lithologie favorable.

Les localités de Boudry et de Colombier sont construites principalement sur la molasse et il est généralement possible de forer à grande profondeur. Cela se traduit par un potentiel important mais qui est pondéré par la présence de terrains meubles aux abords de l'Areuse et dans son delta.

À Cortaillod, on trouve des terrains meubles au sommet de la colline où se situe la localité et au lieu dit « Bas de Suchet ». Le potentiel communal reste cependant élevé car l'autre lithologie présente est la molasse et il est possible de forer jusqu'à 180 m au sud-ouest du village.

Tableau 2.9. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique du Littoral Ouest. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
Bevaix	21.8	5.8	0.3	26	20.3	0.3	93	10.1	0.2	46
Bôle	11.1	3.0	0.0	26	7.2	0.0	64	3.6	0.0	32
Boudry	37.7	6.3	0.1	17	23.1	0.1	61	11.5	0.1	31
Colombier	34.4	6.4	0.0	19	26.2	0.0	76	13.1	0.0	38
Cortailod	38.0	6.3	0.0	17	23.6	0.0	62	11.8	0.0	31
Fresens	2.7	1.0	1.0	36	1.0	1.0	37	0.5	0.5	19
Gorgier - Chez-le-Bart	12.1	5.4	5.0	45	6.0	5.1	50	3.0	2.6	25
Montalchez	1.4	0.5	0.5	33	0.5	0.5	34	0.2	0.2	17
Saint-Aubin – Sauges	16.5	6.2	4.2	38	8.6	4.3	52	4.3	2.1	26
Vaumarcus	2.1	1.2	1.1	59	1.4	1.1	65	0.7	0.6	33
Total	177.9	42.0	10.7	24	117.8	10.9	66	58.9	5.5	33

Région climatique du Locle

Du point de vue du potentiel des SGV, les trois communes qui constituent cette région climatique sont similaires. En effet, la majorité du potentiel de ces communes présenté au Tableau 2.10 est soumis à dérogation (plus de 60 %). Il est de ce fait recommandé d'effectuer une étude géologique locale afin de déterminer le plus précisément possible quelle serait la profondeur de forage possible et ainsi recalculer ce potentiel. Il existe cependant des zones réduites où l'implantation de SGV est favorable. Elles se situent sur les flancs de la vallée au niveau de la ville du Locle, au nord du Col des Roches et au sud du village des Verrières.

Tableau 2.10. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique du Locle. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
La Côte-aux-Fées	4.4	1.8	1.8	42	2.2	1.9	49	1.1	0.9	25
Le Locle	91.4	14.3	12.0	16	20.6	12.6	22	10.3	6.3	11
Les Verrières	10.1	4.7	4.3	47	5.4	4.4	53	2.7	2.2	26
Total	105.9	20.8	18.1	20	28.1	18.9	27	14.1	9.4	13

Région climatique de Neuchâtel

Les conditions géologiques des communes de la région neuchâteloise permet de former deux groupes. Les communes du Littoral : Auvignier, Corcelles-Cormondèche, Hauterive, Neuchâtel, Peseux et St Blaise et les communes de la plaine de la Thielle : Marin-Epagnier et Thielle-Wavre.

La majorité des périmètres d'urbanisation des communes du Littoral à l'exception d'Auvignier sont classés en zones soumises à dérogation. La part du potentiel soumis à dérogation allant de près de 50 % pour la commune de Neuchâtel à près de 100 % pour celle de Peseux. Ce potentiel étant relativement important, des études géologiques devraient être menées afin que ces communes disposent d'une carte des profondeurs de forage autorisées en accord avec les spécificités géologiques locales. Il existe cependant deux zones qui ne sont pas soumises à dérogation et où l'utilisation des SGV devrait être encouragée. Il s'agit du bord du lac, raison pour laquelle la commune d'Auvignier est au bénéfice d'un potentiel intéressant avec une part couverte minimale de 29 % et presque pas soumise à dérogation. D'autres zones sont également favorables :

- Serrières
- La région comprise entre le port de Neuchâtel et La Maladière
- La région littorale comprise entre Monruz et St Blaise

Ces zones apparaissent sur les cartes lithologiques de l'Annexe 2.6 dans la classe calcaire 60 m. Il existe encore une zone particulièrement favorable au nord de la commune de Neuchâtel. Elle s'étend du jardin botanique jusqu'aux Cadolles, à la Pierre à Bot et aux Plaines Roches. Elle est cadastrée en calcaire avec une autorisation de forer de 180 m, ce qui représente des conditions particulièrement favorables.

Les communes de la plaine de la Thielle, quant à elles, bénéficient de conditions optimales car la profondeur de forer est en règle générale relativement profonde, qu'aucune zone n'est soumise à dérogation et que la lithologie est favorable (molasse). Les potentiels calculés sont donc importants avec une part couverte potentielle minimale de 37 % et 57 % pour les communes de Marin-Epagnier et de Thielle-Wavre respectivement. L'utilisation de SGV devrait par conséquent y être fortement encouragée.

Tableau 2.11. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique de Neuchâtel. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
Auvernier	11.8	3.2	0.3	27	6.8	0.4	57	3.4	0.2	29
Corcelles-Cormondrèche	26.3	11.8	11.0	45	13.0	11.2	49	6.5	5.6	25
Hauterive	14.6	5.1	4.2	35	6.1	4.3	42	3.1	2.2	21
Marin-Epagnier	43.1	5.9	0.0	14	32.0	0.0	74	16.0	0.0	37
Neuchâtel	257.4	47.0	35.5	18	78.1	36.4	30	39.1	18.2	15
Peseux	31.9	8.5	8.3	27	8.8	8.6	28	4.4	4.3	14
Saint-Blaise	23.4	5.9	4.6	25	7.4	4.7	32	3.7	2.4	16
Thielle-Wavre	5.2	1.0	0.0	20	5.9	0.0	113	2.9	0.0	57
Total	413.7	88.5	64.0	21	158.1	65.7	38	79.1	32.8	19

Région climatique du Val-de-Ruz

Les périmètres d'urbanisation des communes du Val-de-Ruz sont généralement situés en zones favorables pour l'implantation des SGV et ce tant du point de vue de la lithologie que de la profondeur de forage autorisée. La part couverte minimale des besoins de chauffage atteignant même 77 % pour la commune de Lignières (Tableau 2.12) et étant généralement comprise entre 30 et 50 %. Trois communes font exception : Boudevilliers, Cernier et Enges. En effet, le potentiel de ces trois communes est plus faible et une part importante (> 20 %) est soumise à dérogation. Pour la commune d'Enges, le potentiel peut même être considéré comme nul. Le détail des secteurs et de leurs lithologies simplifiées est présenté pour chaque commune dans l'Annexe 2.1.

Deux communes font également partie de la région climatique du Val-de-Ruz (www.ne.ch), il s'agit de la commune de Rochefort et de celle des Brenets. Le potentiel de la commune de Rochefort est un peu particulier. En effet, les périmètres d'urbanisation du village et de ses alentours est en zone interdite au forage. Le potentiel calculé (Tableau 2.12) concerne donc plus les périmètres d'urbanisation du village de Montézillon et de Chambrelien. La part couverte minimale pour ces deux villages doit être plus proche de 50 % comme à Montmollin que des 28 % calculés pour la commune et ce malgré une part importante (env. 40 %) soumise à dérogation. Aux Brenets, la situation est relativement similaire, car le village lui-même est en zone interdite. L'implantation n'est donc possible qu'aux abords du lac des Brenets (Bourg-Dessous et camping) et une bonne partie du potentiel présenté est soumis à dérogation (32 %).

Tableau 2.12. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique du Val-de-Ruz. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
Boudevilliers	7.9	1.7	0.8	21	3.8	0.8	47	1.9	0.4	24
Cernier	15.4	4.6	3.2	30	6.1	3.3	40	3.1	1.7	20
Chézard - Saint-Martin	10.8	3.5	0.1	33	5.7	0.1	53	2.8	0.0	26
Coffrane	5.5	1.8	0.3	33	3.2	0.4	58	1.6	0.2	29
Dombresson	9.8	2.7	0.1	28	4.6	0.1	47	2.3	0.1	24
Enges	1.7	0.1	0.1	6	0.1	0.1	6	0.1	0.1	3
Engollon	1.8	0.4	0.0	20	2.0	0.0	108	1.0	0.0	54
Fenin - Vilars - Saules	5.5	1.2	0.0	22	5.5	0.0	99	2.7	0.0	49
Fontainemelon	10.1	1.8	0.0	17	7.2	0.0	71	3.6	0.0	36
Fontaines	7.1	2.6	0.0	37	4.0	0.0	57	2.0	0.0	28
Les Brenets	8.0	1.3	0.9	17	2.9	0.9	37	1.5	0.5	18
Les Geneveys-sur-Coffrane	11.4	2.9	1.0	25	10.3	1.1	90	5.1	0.5	45
Les Hauts-Geneveys	5.5	1.2	0.0	21	5.8	0.0	104	2.9	0.0	52
Lignièrès	7.0	3.6	2.0	51	10.8	2.1	154	5.4	1.1	77
Montmollin	3.3	1.3	0.0	39	3.1	0.0	91	1.5	0.0	46
Rochefort	7.0	1.9	1.5	27	3.9	1.6	55	1.9	0.8	28
Savagnier	7.8	1.7	0.0	21	7.7	0.0	98	3.9	0.0	49
Valangin	3.5	0.6	0.0	18	1.9	0.0	54	0.9	0.0	27
Villiers	2.4	1.1	0.0	45	1.8	0.0	75	0.9	0.0	37
Total	131.8	36.0	10.2	27	90.3	10.5	69	45.2	5.3	34

Région climatique de la vallée de la Sagne

Les conditions géologiques de la vallée de la Sagne sont relativement favorables à l'implantation de SGV avec la présence de molasse au milieu et de calcaire sur les flancs. Cependant, les périmètres d'urbanisation et les localités de la Sagne, de Brot-Dessous, de Plamboz et des Ponts-de-Martels sont traversés par des marno-calcaires où l'autorisation de forer est soumise à dérogation. De ce fait, le potentiel est plus faible que la situation géologique l'aurait fait espérer et une part conséquente est soumise à dérogation, entre 15 et 50 %. Une étude géologique de détail permettrait vraisemblablement de mieux préciser les limites d'utilisation des SGV pour ces communes.

Tableau 2.13. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique de la vallée de la Sagne. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
Brot-Plamboz	1.4	0.4	0.2	29	0.6	0.2	43	0.3	0.1	21
La Sagne	6.7	1.4	1.1	21	2.3	1.2	34	1.1	0.6	17
Les Ponts-de-Martel	9.9	2.2	1.0	22	5.8	1.1	58	2.9	0.5	29
Total	18.0	4.0	2.3	22	8.7	2.4	48	4.3	1.2	24

Région climatique du Val-de-Travers

Géologiquement, le Val-de-Travers n'est pas très propice à l'implantation de SGV. Cela est dû à d'importants dépôts de terrains meubles qui contiennent, entre autres, la nappe de l'Areuse. De ce fait, pour une bonne partie des périmètres d'urbanisation des différentes localités de la commune, l'implantation des SGV est soumise à dérogation ce qui en diminue le potentiel et l'intérêt. Certaines zones restent cependant intéressantes et ont un potentiel qu'il ne faudrait pas négliger. Il s'agit du sud de Fleurier et de Couvet, ainsi que du sud-est de Môtiers. Les localités de St Sulpice et des Bayards, quant à elles, sont dans des contextes géologiques différents et elles sont plus favorables à l'implantation des SGV, surtout la partie est-nord-est des Bayards où l'autorisation de forer est de 180 m (cf. Annexe 2.1). Le périmètre d'urbanisation de la commune de Brot-Dessous est en zone interdite, son potentiel est par conséquent nul.

Tableau 2.14. Potentiel des sondes géothermiques verticales pour la région climatique du Val-de-Travers. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Commune	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
Brot-Dessous	0.5	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0
Val-de-Travers	110.5	33.6	12.0	30	36.4	12.5	33	18.2	6.3	16
Total	111.0	33.6	12.0	30	36.4	12.5	33	18.2	6.3	16

2.4.4 Résumé par région climatique

Tableau 2.15. Résumé du potentiel des sondes géothermiques verticales pour les différentes régions climatiques du canton de Neuchâtel. Toutes les énergies sont exprimées en GWh_{th} par an.

Région climatique	Demande	Mode 1	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 2	Soumis à dérogation	Part couverte (%)	Mode 3	Soumis à dérogation	Part couverte (%)
Vallée de la Brévine	7.3	1.1	0.1	15	4.3	0.1	60	2.2	0.0	30
La Chaux-de-Fonds	301.9	46.4	30.8	15	101.3	32.1	34	50.7	16.0	17
Littoral Est	80.3	24.7	4.1	31	69.1	4.2	86	34.6	2.1	43
Littoral Ouest	177.9	42.0	10.7	24	117.8	10.9	66	58.9	5.5	33
Le Locle	105.9	20.8	18.1	20	28.1	18.9	27	14.1	9.4	13
Neuchâtel	413.7	88.5	64.0	21	158.1	65.7	38	79.1	32.8	19
Val-de-Ruz	131.8	36.0	10.2	27	90.3	10.5	69	45.2	5.3	34
Vallée de la Sagne	18.0	4.0	2.3	22	8.7	2.4	48	4.3	1.2	24
Val-de-Travers	111.0	33.6	12.0	30	36.4	12.5	33	18.2	6.3	16
Total	1347.7	296.9	152.2	22	615.6	157.4	46	307.9	78.7	23

Par rapport au potentiel global très théorique, où l'implantation de sondes dans les secteurs autorisés sur toute la surface du canton permettrait de répondre à l'ensemble des besoins, l'implantation de sondes sur l'ensemble des secteurs urbanisés couvre :

Pour l'ensemble des zones d'urbanisation, un minimum de 23 % des besoins dans le cas où la ressource est exploitée de manière équilibrée (mode 3) sans recharge thermique saisonnière.

Les zones les plus favorables pour l'implantation des SGV sont la plaine de l'Areuse (littoral Ouest), celle de la Thielle (littoral Est) et le Val-de-Ruz. Pour les autres régions, le potentiel est plus faible. Cependant, la part soumise à dérogation est parfois élevée, et dans le cas où l'implantation de sondes de faible profondeur est envisageable techniquement et autorisée, la part de l'énergie exploitable peut considérablement augmenter. On peut également souligner que la carte des autorisations est relativement conservative. A l'avenir, en fonction de l'expérience accumulée, il est possible que certains secteurs actuellement interdits sur des critères non-légaux puissent être un jour autorisés (cas de La Chaux-de-Fonds).

Il faut cependant faire attention à l'effet d'échelle : les potentiels et les besoins ont été calculés sur des surfaces de 1 ha. Pour des demandes localement élevées, par exemple immeubles sur des parcelles de surface réduite, l'exploitation ne pourra être réalisée que par des champs de sondes géothermiques avec recharge saisonnière.

2.4.5 Guide d'aide au dimensionnement

Une brochure intitulée « *Sondes géothermiques verticales : guide d'aide au dimensionnement des ouvrages de petite dimension et procédures d'autorisation dans le Canton de Neuchâtel* » a été réalisée dans le cadre de ce programme (Annexe 2.6).

Ce guide d'aide au dimensionnement a pour objectif de promouvoir l'utilisation de la chaleur par sondes géothermiques verticales et d'informer les utilisateurs (entreprises, propriétaires, professionnels actifs dans le domaine de l'énergie, services de l'Etat) sur les principes généraux d'exploitation. Il fait état des procédures d'autorisation en vigueur dans le canton de Neuchâtel, donne quelques règles de dimensionnement et fait la synthèse des informations nouvellement disponibles à l'échelle du canton (cartes, documentation). Le document a été distribué à tous les participants aux séminaires PDGN (cf. chapitre 7) et peut être téléchargé sur le portail du canton.

Un document important sur les sondes géothermiques verticales est maintenant à disposition. En effet, la norme SIA 384/6 a été publiée dans sa version allemande en décembre 2009. Elle est en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2010. La version française est parue en juin 2010 (SIA, 2010).

2.5 Synthèse et conclusions

L'application de méthodes diverses et variées a permis de démontrer que l'énergie exploitable par sondes géothermiques verticales est fortement dépendante du mode d'exploitation et de la gestion du stock de chaleur disponible.

Dans le Tableau 2.16, les résultats du potentiel exploitable dans le canton de Neuchâtel sont récapitulés et les approches simulées dans cette étude sont comparées avec des modes d'exploitation plus évolués, prenant en compte la recharge thermique du sous-sol. Dans chaque cas, la technologie utilisée pour prélever la chaleur du sous-sol (échangeur de chaleur vertical) reste la même.

Plusieurs modes d'exploitation plus ou moins évolués ont été considérés pour le calcul du potentiel des sondes géothermiques verticales et les résultats sont évidemment très différents en passant d'un mode à l'autre. Le mode du flux géothermique n'envisage que l'exploitation de la ressource et de sa recharge naturelle, sans refroidissement à long terme. Le mode 1 considère la distance nécessaire entre chaque SGV pour éviter toute interaction et accepte, après 30 ans d'exploitation, un refroidissement de 1 °C à proximité des forages. Ces deux premiers modes sont très conservatifs et ne sont pas pris en compte dans la synthèse du potentiel, car peu réalistes. Le mode 2 calcule la puissance exploitable sur 30 ans avec un espacement fixe entre les SGV et suppose une durée d'exploitation de 30 ans. Le mode 3 reprend les conditions du mode 2, mais en divisant par 2 la puissance par mètre de sonde, ce qui revient à calculer une puissance moyenne sur 60 ans. C'est ce mode 3 qui est considéré comme le plus raisonnable pour le calcul du potentiel régional et cantonal, car il permet une exploitation à long terme. Les modes décrits ci-dessus ne prennent pas en compte une recharge thermique du système.

L'énergie exploitable sur l'ensemble des zones habitables est de 54 GWh·an⁻¹ à 616 GWh·an⁻¹ pour les modes simples, sans recharge thermique saisonnière. C'est la valeur de 308 GWh·an⁻¹ (mode 3) qu'il faut retenir comme référence. C'est elle qui correspond le mieux au mode d'exploitation qui devrait être pratiqué en cas de densification d'installations de sondes individuelles, sans recharge saisonnière. Ce mode d'exploitation est le plus répandu actuellement et devrait permettre de produire, au moyen de PAC standard, près de 410 GWh_{th}·an⁻¹, et de couvrir à terme près de 20 % des besoins en chaleur.

Avec l'exploitation du sous-sol sans recharge, la puissance qu'il est théoriquement possible d'extraire localement, dans des secteurs de moyenne à haute densité d'habitation, est limitée. De plus, il faudra compter avec un refroidissement moyen à long-terme du sous-sol de l'ordre de 1 °C et des effets d'interaction entre installations voisines de plus en plus difficilement contrôlables.

Par des moyens simples, tels que la recharge thermique (freecooling, solaire thermique, ...), il est possible de s'affranchir de toute interaction, d'éviter le refroidissement du terrain à long terme et de multiplier jusqu'à un facteur 10 l'énergie thermique exploitable par unité de surface. Il est d'autre part possible de valoriser le froid du terrain pour rafraîchir les bâtiments.

Pour les systèmes de champs de sondes géothermiques les plus évolués fonctionnant sur le principe du stockage thermique saisonnier, on peut recharger le volume de roche exploité de manière artificielle et le maintenir à un niveau de température suffisant..

Les données thermiques du collège des Coteaux à Peseux (Annexe 2.7) ont été prises comme référence servant au calcul de l'énergie exploitable par unité de surface. Dans cet ouvrage de très bonne efficacité énergétique, la recharge du volume du stock (29'000 m³ constitués de 30 sondes de 60 m de profondeur espacées de 3.8 m) est assurée grâce à 306 m² d'absorbeurs solaires sans vitrage. La chaleur extraite du stock est de 107'000 kWh·an⁻¹. Rapporté à une surface du stock de 350 m², la chaleur exploitable par unité de surface est de plus de 3'000 MW·ha⁻¹, soit 50 fois plus élevée que l'exploitation sans recharge (mode 3). Cette installation date des années 1995-1996 et très

peu de réalisations similaires sont recensées, ce qui démontre qu'en matière d'exploitation de la chaleur du sous-sol, nous sommes encore loin d'une gestion efficace, malgré l'existence de technologies relativement simples à appliquer.

Ainsi, dans le cas où l'on décide d'exploiter la chaleur du sous-sol de façon performante et efficace, le potentiel de chaleur exploitable est en principe illimité, avec une valeur de 16'270 GWh_{th}·an⁻¹ sur l'ensemble des zones constructibles, soit largement plus de 100 % de la demande.

Localement, le potentiel exploitable restera limité par l'aménagement du territoire, et notamment par la carte des autorisations de forage. En considérant que l'exploitation par stockage saisonnier puisse répondre au 100% des besoins dans les secteurs autorisés, on pourra produire :

- 909 GWh_{th}·an⁻¹ d'énergie de chauffage soit 43 % des besoins cantonaux.
- Les utilisateurs potentiels situés en secteurs interdits représentent 102 GWh_{th}·an⁻¹, soit 4.8 % de la demande cantonale. Ces besoins ne pourront en principe jamais être comblés par ce mode d'exploitation de la chaleur du sous-sol.
- Les utilisateurs potentiels situés en secteurs interdits avec dérogation possible représentent 1'111 GWh_{th}·an⁻¹, soit 52 % de la demande cantonale. Il reste éventuellement possible de combler une partie de ces besoins par la réalisation de sondes de faible profondeur.
- La principale limitation pour le développement de tels systèmes reste la puissance limitée qu'il est possible d'extraire par unité de surface. Ainsi, si la ressource est disponible, le potentiel thermique devrait provenir de ressources en eau souterraine et en eaux de surface (cf chapitres 4 à 6 concernant l'exploitation de ces ressources).

En guise de conclusion, les commentaires suivants peuvent être énoncés :

- L'exploitation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales a un fort potentiel de développement et leur implantation dans le canton de Neuchâtel doit être encouragée.
- Pour un dimensionnement correct des installations, se reporter au guide d'aide au dimensionnement édité dans le cadre de ce programme (Annexe 2.6)
- Sur la base des résultats de cette étude, on rappellera au législateur l'importance de se réserver le droit d'exiger une recharge thermique lors de l'octroi d'autorisations.
- Pour l'établissement par étapes du calcul du potentiel, des cartes numériques ont été produites et ces dernières pourront être valorisées. On citera en particulier la carte des lithologies rencontrées à des profondeurs données (Figure 2.8), pouvant servir d'outil informatif à l'intention du projeteur. On pourra également mettre à disposition les valeurs de puissance soutirable en W·m⁻¹ de sonde pour chaque secteur. On insistera toutefois sur le fait que les renseignements donnés par la carte sont approximatifs et ne remplacent pas l'avis du géologue. La carte de zones de flux nul (Figure 2.9) et celle des températures annuelles moyennes (Figure 2.10) pourront également se révéler intéressantes pour l'usage des professionnels.

Tableau 2.16. Potentiel de chaleur exploitable par sondes géothermiques verticales dans le canton de Neuchâtel avec synthèse des résultats fournis selon plusieurs approches.

Mode ou calcul correspondant dans la présente étude	Approche	Variation locale de la température du sous-sol			Energie exploitable en moyenne par unité de surface ⁽¹⁾ MWh·ha ⁻¹	Energie exploitable sur l'ensemble de la surface du canton, excepté lac et secteurs interdits ⁽¹⁾ GWh·an ⁻¹	Energie exploitable sur l'ensemble des zones constructibles ⁽¹⁾ GWh·an ⁻¹	Pourcentage des besoins en chaleur du canton couverts ⁽²⁾ %
		Moyenne à long terme	Hiver	Été				
			°C					
Exploitation du flux géothermique.	Gestion équilibrée, très conservative	0	0	0	615	54	3.4	
Mode 3 : exploitation de type minier avec période de régénération, durable.	Gestion équilibrée, conservative	-2	-5	0	3'997	308	19	
Mode 2 : exploitation de type minier avec dégradation progressive de la ressource thermique, non durable.	Gestion non équilibrée, conservative	-3	-8	0	8'100	616	39	
Recharge partielle en été, free cooling.	Gestion équilibrée et efficace	0	-3	+5	~12'300	~1'085	68	
Stockage thermique saisonnier.	Champ de sondes géothermiques avec recharge par solaire thermique et stockage saisonnier	0	-5	+10	~184'500	~16'270	> 100	

(1) Calcul pour la production de chaleur seulement.

(2) Approximation globale : production de chaleur par installation PAC standard, avec un COP de 4.

2.6 Références

- AJENA & PLANAIR, 2005. Les énergies renouvelables au service du développement durable, région Val de Ruz. Potentiel de production d'énergies renouvelables et autonomie énergétique, 3 pp.
- BMIC SA, 2010. Carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales sur le territoire du canton de Neuchâtel, avec notice. Edition provisoire, Etat de Neuchâtel, Service de la protection de l'environnement.
- Eskilson P., Hellström G., et al., 2000 Earth Energy designer (EED V2.0), logiciel de simulation numérique.
- 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.
- Hellström G. & Sanner B., 2000. Earth Energy Designer (EED). User manual. Version 2.0, 43 pp.
- Király L., 1973. Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel, suppl. du Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., tome 96, IGUN, CHYN.
- Király L., 1966. Remarques sur la tectonique de la région de Saint-Blaise (Neuchâtel), Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., N° 89, p. 121-128.
- OFEV, 2009. Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol, Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie, brochure N° UV-0910-F, 53 pp.
- SIA, 2010. Sondes géothermiques. Norme Suisse 384/6. Société Suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 76 pp.
- Signorelli S., 2004. Geoscientific Investigations for the use of shallow low-enthalpy systems. Ph. D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 159 pp.
- 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, vol.1 Rapport final, 191 pp, Vol. 2 : Annexes, 90 pp.

3. Potentiel des géostructures énergétiques (GEN) et tunnels

3.1 Introduction

Le potentiel exploitable des géostructures énergétiques sur le territoire du canton de Neuchâtel a fait l'objet d'un examen lors de l'étude PGN, Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel, publiée en 2008. Un potentiel intéressant de géostructures énergétiques avait été identifié le long du Littoral, entre Colombier et Le Landeron, ainsi que dans la vallée du Locle – La Chaux-de-Fonds.

Suite à ces conclusions, les objectifs fixés dans la phase d'étude PDGN sont de passer en revue les projets de développement concrets. Ces projets ont subi un examen plus ciblé des éventuels potentiels et, si l'état d'avancement le permettait, un modèle de valorisation de l'énergie géothermique pouvant servir de référence lors de l'établissement du concept énergétique du projet a été élaboré. Outre les projets de développement urbain, cette démarche englobait les ouvrages de circulation d'envergure en tunnel.

Dans un premier temps, l'étude a consisté à recenser les projets de développement concernés, en étroite collaboration avec les administrations et les organes de promotion impliqués, en particulier les services cantonaux et communaux (Aménagement du territoire, Energie, Environnement, Ponts et Chaussées, Transport, Urbanisme) et les directions des ouvrages.

Au cours de cette première étape, un important projet urbain situé dans une des zones potentielles de l'étude PGN (2008) et qui venait d'obtenir l'autorisation de passer à la phase de réalisation a pu être identifié. Il s'agit du projet Le Corbusier à La Chaux-de-Fonds, comprenant de nombreux bâtiments situés dans des périmètres définis par le Plan spécial. Cela a permis d'évaluer l'apport calorifique escompté par les éventuels pieux de fondation équipés en échangeur thermique. D'autres projets urbains ont été étudiés mais ils se sont révélés être en deçà d'un niveau de planification suffisant, ou à un stade de réalisation trop avancé pour une telle valorisation.

Dans le domaine des tunnels, 15 importants ouvrages existants ou en projet ont été recensés et examinés du point de vue de leur potentiel de géostructure énergétique et de l'exploitation thermique des eaux de drainage, pour ce qui concerne les plus intéressants d'entre eux.

Le présent chapitre 3 décrit les résultats des démarches évoquées ci-dessus. La première partie, soit le point 3.2, est un rappel de la technologie des pieux et autres géostructures énergétiques. Elle contient aussi une présentation des principaux développements récents dans le domaine des géostructures énergétiques en Suisse, en complément à ce qui est mentionné dans l'étude PGN.

Le point 3.3 est consacré à l'évaluation du potentiel géothermique dont pourraient bénéficier les futurs bâtiments du projet Le Corbusier à La Chaux-de-Fonds grâce à l'utilisation des pieux énergétiques.

L'examen du potentiel géothermique des tunnels est exposé au point 3.4, tant en ce qui concerne les ouvrages en béton enterrés, que la présence et les conditions d'utilisation des venues d'eau souterraines.

Le point 3.5 contient la synthèse et les conclusions de la présente étude.

La liste de références du point 3.6 énumère les documents et les publications d'actualité relatives au présent chapitre. Les annexes citées dans le texte sont regroupées dans le deuxième volume de ce rapport.

3.2 Les géostructures énergétiques

3.2.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation du concept général des géostructures énergétiques. Il décrit également les développements intervenus sur quelques projets significatifs, depuis la publication du rapport de l'étude PGN.

Le dimensionnement thermique et les aspects économiques des projets sont traités dans les chapitres 3.2.2 à 3.2.4 du rapport PGN.

3.2.2 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 préfabriquées

Dalles

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

Cadres en béton armé

- Murs
- Radiers

En principe, tous ces éléments et, d'une façon générale, toutes constructions en contact avec le sol peuvent être équipées en échangeur de chaleur géothermique. Elles sont alors appelées géostructures énergétiques (GEN).

C'est le béton qui est le plus souvent utilisé pour construire des géostructures énergétiques. En effet, sa conductivité thermique et sa capacité de stockage en font un matériau de construction idéal pour des échangeurs thermiques. A partir d'une profondeur comprise entre 15 et 20 m, la température du sous-sol n'est plus soumise aux variations journalières et saisonnières. A cette profondeur et avec notre climat, la température est comprise entre 9 et 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.

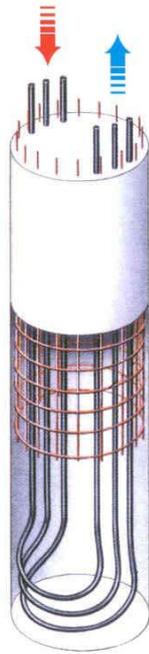


Figure 3.1. Schéma de principe d'un pieu énergétique moulé dans le sol avec sa cage d'armature et les conduites de circulation du fluide caloporteur.

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

Ces conduites, qui sont normalement des tuyaux en matière synthétique, sont reliées à un collecteur qui alimente une ou plusieurs pompes à chaleur (Figure 3.3). 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 (Figures 3.4 et 3.5). Pour les pieux en béton centrifugé, les circuits de tubes sont placés dans la cavité centrale du pieu (Figure 3.6). L'espace restant est ensuite rempli avec un matériau ad hoc, possédant une bonne conductibilité thermique.

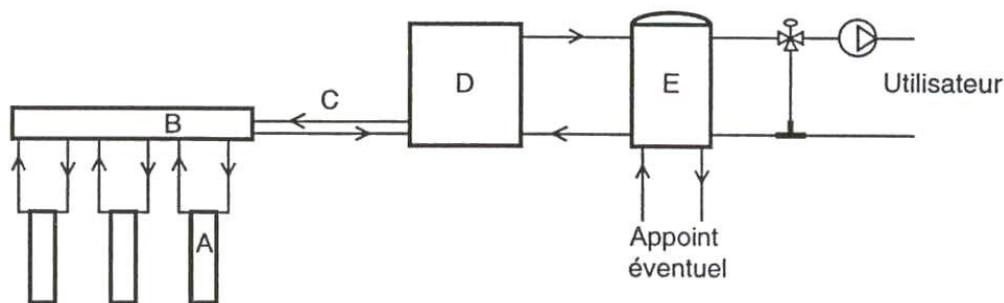


Figure 3.3. Schéma de principe d'une installation de pieux énergétiques avec pompes à chaleur. A : pieux énergétiques, B : collecteur, C : conduites de liaison, D : pompe à chaleur, E : stockage tampon (Pahud, 2002).



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



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

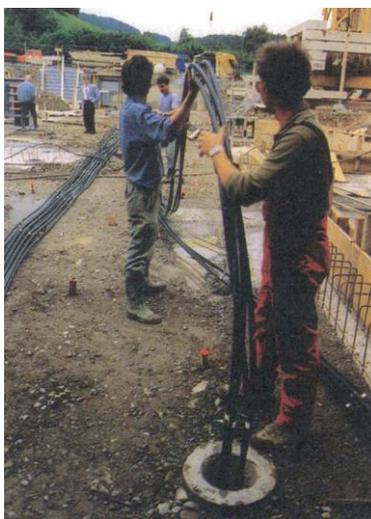


Figure 3.6. Pose de la conduite de circulation du fluide caloporteur dans la cavité intérieure d'un pieu battu dans le sol (photo SACAC AG, Lenzburg).

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 compris entre 0.4 et 1.5 m et leur longueur peut atteindre 30 m, voire plus. Les parois moulées sont le plus souvent réalisées avec une épaisseur de 60 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 20 à 50 $W \cdot m^{-1}$, suivant l'écartement des pieux et les caractéristiques du sous-sol, notamment. Chaque mètre de pieu produit ainsi entre 40 à 90 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.

3.2.3 Projets et développements récents

En complément aux projets décrits dans le rapport de l'étude PGN, les développements significatifs intervenus depuis sa publication sont présentés ci-dessous.

Terminal Dock Midfield de l'aéroport de Zurich (Pahud & Hubbuch, 2007)

Des mesures de performances énergétiques ont été réalisées entre 2005 et 2006 sur l'installation à pieux échangeurs du nouveau terminal Dock Midfield de l'aéroport de Zurich. Sur les 440 pieux de fondation de près de 30 m de longueur et d'un diamètre compris entre 90 et 150 cm, plus de 300 sont utilisés en échangeurs thermiques dans le but de contribuer au chauffage et au refroidissement du bâtiment. Les installations ont été mises en service en automne 2003.

Les résultats des mesures montrent 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. Les indices de performance du système sont excellents. Le coefficient de performance annuel de la PAC est mesuré à 3.9. L'efficacité annuelle de geocooling, définie par le rapport de l'énergie de geocooling sur l'énergie électrique consommée par les pompes de circulation, est exceptionnellement élevée avec une valeur de 60. L'efficacité globale annuelle du système, définie par le rapport de l'énergie thermique et de refroidissement sur l'énergie thermique totale pour le faire fonctionner, pompes de circulation incluses, est de 5.1.

Le résumé détaillé du rapport final est reproduit dans l'annexe du présent rapport (Annexe 3.1).

CEVA, Genève (Kohl & Baujard, 2008)

Une étude du potentiel géothermique valorisable par les géostructures des tunnels et des stations projetés dans le cadre du projet de liaison ferroviaire entre la gare Cornavin de Genève et la ville d'Annemasse, en France, a été effectuée en 2008 (Bassetti & al., 2009). Elle a permis de vérifier les conditions dans lesquelles l'énergie géothermique pourrait contribuer à l'approvisionnement en chaleur et en froid des constructions environnantes. Les conclusions de cette étude sont résumées au point 3.4.2 du présent rapport, car il traite de la future gare souterraine de Cernier (Val-de-Ruz) du projet Transrun dont les caractéristiques présentent une grande similitude avec le projet CEVA.

Centre Aldi à Domdidier (PGN 2008 et Borel 2009)

La firme allemande Aldi a achevé en 2008 la construction de son important centre de logistique pour la Suisse occidentale à Domdidier. Ce complexe comporte principalement une grande halle de tri des marchandises, des chambres froides et un bâtiment administratif (Figure 3.7).

Des pieux de fondation équipés en échangeurs thermiques contribuent à satisfaire les besoins en chaleur et en froid des bâtiments qui sont couverts par une pompe à chaleur de 500 kW et par deux chaudières à mazout et à gaz d'une puissance de 800 kW chacune (Figure 3.8).



Figure 3.7. Le centre de logistique Aldi est opérationnel depuis août 2008.



Figure 3.8. Pompes à chaleur et chaudières d'appoint.

La pompe à chaleur extrait l'énergie thermique, via un échangeur et circuit intermédiaire, de l'eau pure du circuit de fluide caloporteur, qui circule dans les 378 pieux énergétiques au moyen de 60'000 m de conduites en polyéthylène. Ces pieux moulés, d'un diamètre de 26 cm et espacés de 6.66 m, ont une longueur de 34 mètres.

La Figure 3.9 montre le schéma de principe de l'installation. Les rejets de chaleur des installations frigorifiques contribuent au rechargement du stock thermique, par l'intermédiaire des pieux énergétiques.

Le centre logistique a été mis en service au début de l'année 2009. Le fonctionnement constaté depuis lors est conforme aux prévisions.

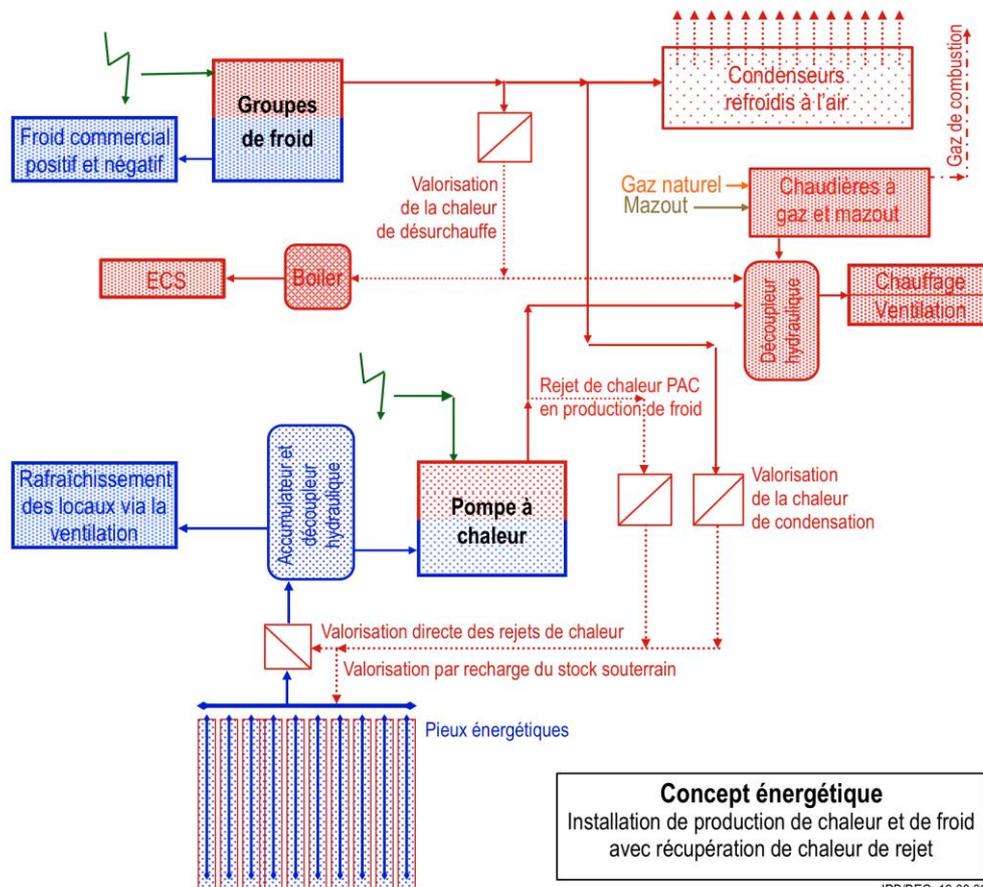


Figure 3.9. Centre Aldi, Domdidier. Concept énergétique (Borel, 2009).

Bâtiments sur PE à Delémont

Deux bâtiments construits sur pieux énergétiques sont en voie d'achèvement à Delémont. Il s'agit de constructions sur 4 niveaux, qui reposent sur 50 pieux de 15 m de longueur et d'un diamètre de 90 cm (Figure 3.10). L'énergie thermique des pieux sert d'appoint à une chaudière à gaz. Les bâtiments abriteront des locaux commerciaux et d'habitation.

Il s'agit d'une première dans l'arc jurassien. L'énergie renouvelable valorisée par les pieux est considérée comme une valeur ajoutée, comme en témoigne la documentation de promotion (Annexe 3.2). La mise en service est prévue en 2010.



Figure 3.10. Pieu énergétique en cours d'exécution à Delémont (photo Compatible SA).

3.3 Le projet de développement Le Corbusier

3.3.1 Introduction

Lors de l'établissement du projet PGN (Potentiel géothermique du canton de Neuchâtel) de 2008, les zones et les projets de développement pouvant présenter un intérêt pour la valorisation du potentiel thermique du sous-sol par des géostructures énergétiques ont été passées en revue. Les secteurs identifiés sont indiqués sur la Figure 3.11. A côté de la région du Littoral, entre Colombier et Cressier-Wavre, la zone la plus prometteuse se trouve dans la vallée Le Locle - La Chaux-de-Fonds.

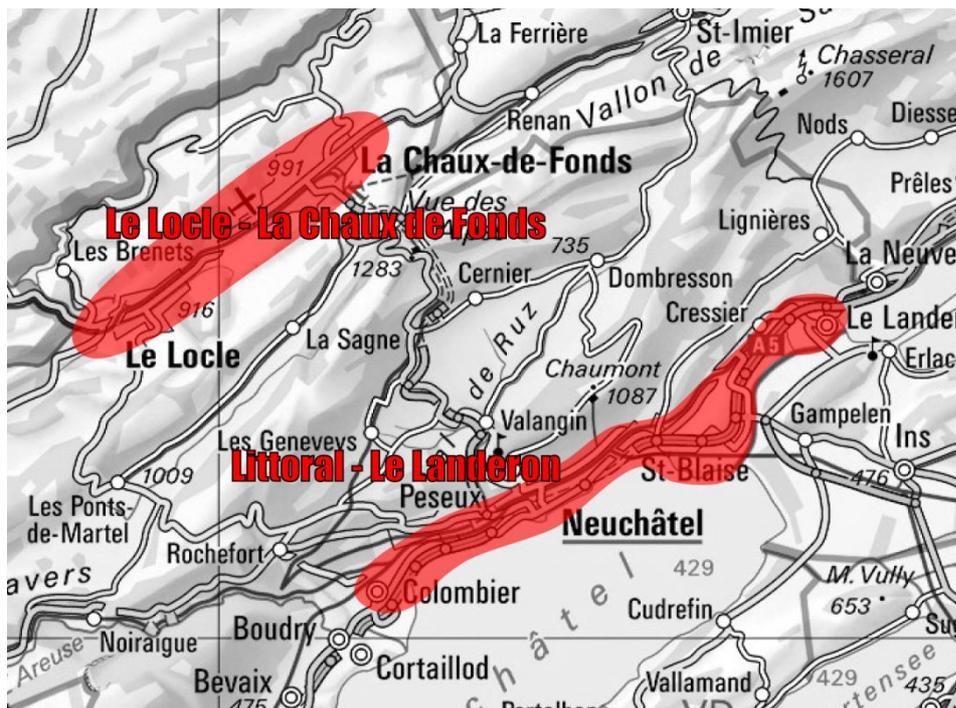


Figure 3.11. Zones potentielles de géostructures énergétiques (PGN, 2008).

Suite aux recommandations de ce projet, l'objectif retenu pour la présente étude était de sélectionner un projet de développement important et suffisamment avancé, pour pouvoir quantifier le potentiel valorisable et l'inclure dans la liste des vecteurs énergétiques à considérer comme possibilité d'approvisionnement.

Après examen avec les autorités cantonales et communales concernées, en particulier la direction du service de l'aménagement du territoire, il est apparu, qu'au moment de l'étude, un seul projet – soit celui de Le Corbusier à La Chaux-de-Fonds – se trouvait à un niveau de développement approprié pour réaliser une telle évaluation. En effet, au terme de plusieurs années de préparatifs et de démarches administratives, le dossier venait d'être homologué, ouvrant ainsi la porte au travail de planification détaillée des ouvrages et des infrastructures. C'est ce projet qui a été retenu pour cette analyse en accord avec les autorités locales.

Les points qui suivent contiennent une évaluation chiffrée du potentiel géothermique des pieux énergétiques envisageables dans le cadre de ce développement.

3.3.2 Le projet de développement

Description du projet

Un nouveau quartier qui portera le nom de Le Corbusier verra le jour, ces prochaines années, à La Chaux-de-Fonds sur une vaste surface désaffectée de la gare aux marchandises (Figure 3.12).



Figure 3.12. Projet Le Corbusier – Vue d’ensemble de la zone d’aménagement.

Il s’agit d’une surface de près de 49'000 m² s’étendant au sud de l’avenue Léopold-Robert, parallèlement à cette artère, sur une longueur de 700 m et une largeur d’environ 70 m, entre la place de la gare et Coop-Entilles. Le quartier sera traversé d’est en ouest par une rue « verte ». Par étape, des constructions y seront implantées dans les 15 à 20 prochaines années. Ces constructions abriteront des logements et des bâtiments divers : lieux de formation, de loisirs et d’activités socioculturelles, structures d’accueil industrielles et hôtelières, locaux administratifs, petits commerces et autres.

La planification de ce projet d’urbanisation est traduite par l’établissement d’un plan spécial, déterminant les règles de construction et d’aménagement, ainsi que les affectations. Le plan d’implantation de ce futur quartier est visible sur la Figure 3.13 (Annexe 3.3).

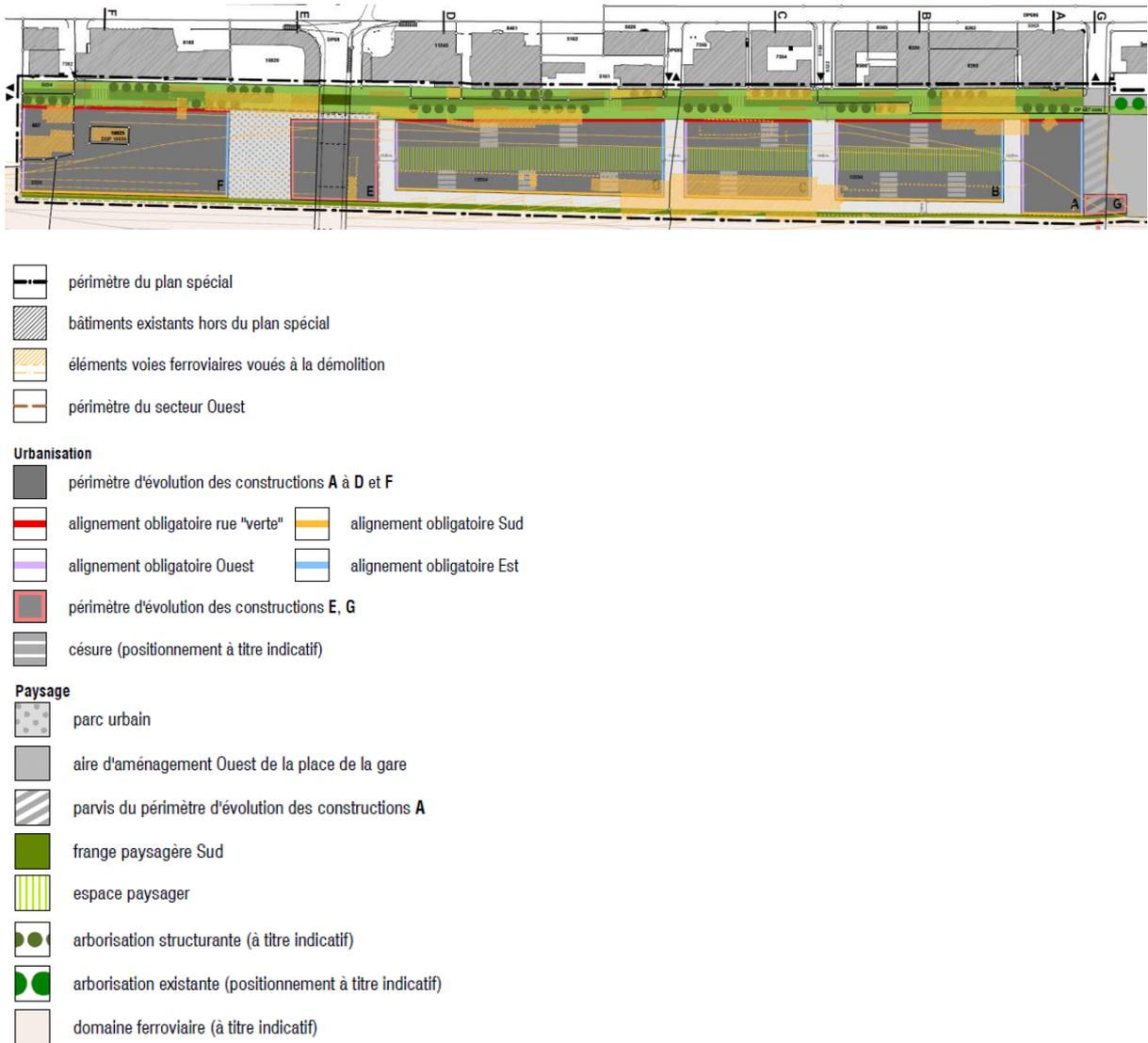


Figure 3.13. Plan spécial – Le Corbusier - Plan d'implantation.

Le concept choisi intègre une succession d'îlots reliés entre eux dans le sens de la longueur par une rue « verte », sorte de zone de rencontre fortement végétalisée. Dans le sens nord-sud, une passerelle sur les voies CFF reliera le quartier au parc des Crêtets et, d'une manière plus générale, le nord et le sud de la ville.

Le périmètre du plan spécial "Le Corbusier" figure en traitillé noir sur le plan d'implantation. Ce plan visualise également les périmètres d'évolution des constructions A, B, C, D, E et F. Chaque périmètre comprendra un nombre variable de bâtiments à la volumétrie déterminée. L'affectation de chaque bâtiment défini sera déterminée dans une phase ultérieure du projet. Le périmètre G est réservé à la passerelle.

Avec une hauteur maximale de 11 m, les constructions au sud du site seront moins hautes que celles au nord (20 m) pour que celles-ci, ainsi que la zone jardinée entre deux, bénéficient d'un ensoleillement maximal.

Approvisionnement énergétique

Selon le plan spécial, les nouvelles constructions devront être raccordées sur le réseau de chauffage à distance. Le chauffage à distance provient de l'usine d'incinération des ordures ménagères

CRIDOR à l'est de la ville et de la chaudière à bois située aux Eplatures, à l'ouest de la ville. Il n'y a aucune conduite existante sur le site, mais trois raccordements sont envisageables. Une puissance supplémentaire devra être installée pour couvrir les besoins en chauffage. Celle-ci peut être complétée par un appoint en gaz. Un local technique sera construit pour la chaudière qui peut être groupé avec celui pour l'électricité.

L'utilisation du chauffage à distance est recommandée car cette énergie est disponible mais le Règlement d'application de la Loi cantonale sur l'énergie RSN 740.10 prescrit l'utilisation d'au moins 20% d'énergie renouvelable. Cette énergie pourrait être fournie, par exemple, par des géostructures énergétiques.

Compte tenu de la nature du sous-sol, il existe une forte probabilité que les bâtiments soient construits sur des pieux de fondation. En y incorporant des échangeurs de chaleur, ils pourraient servir de source d'énergie complémentaire pour le chauffage. Ils pourraient également contribuer au refroidissement des bâtiments. Cette ressource est de plus en plus utilisée en combinaison avec d'autres sources d'énergie, comme l'énergie solaire ou le chauffage à distance.

Estimation du potentiel des pieux énergétiques des bâtiments

La démarche suivante a été retenue pour définir les caractéristiques des pieux de fondation des futures constructions, ainsi que pour estimer leur potentiel énergétique par rapport à la couverture des besoins de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire :

- Définitions des conditions géologiques et fondations.
- Sélection des bâtiments concernés et définition des structures porteuses.
- Détermination des caractéristiques des pieux de fondation par bâtiment.
- Estimation des besoins énergétiques de chaque bâtiment.
- Calcul du potentiel énergétique des pieux et comparaison avec les besoins énergétiques.

Les paragraphes ci-après sont consacrés à la description de ces étapes.

Conditions géologiques et fondations

La géologie dans le centre de La Chaux-de-Fonds est visible sur la Figure 3.14. La ville s'étire le long du synclinal du Locle – La Chaux-de-Fonds. Le fond de ce synclinal est constitué par les marnes et craies lacustres tertiaires de l'Oeningien (Molasse d'eau douce supérieure, Tortonien) qui reposent sur les marnes rouges (Molasse marine supérieure, Helvétique).

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 également être localement aquifères avec des niveaux piézométriques proches de la surface (-2 à -5 m).



Figure 3.14. Projet Le Corbusier – Géologie et situation des forages existants (BMIC).

Des forages de reconnaissance exécutés dans la zone du Grand-Pont et de la Gare (Figure 3.14), à des profondeurs de 25 à 30 m, mettent en évidence la grande diversité des conditions géologiques. L'interprétation des profils de forage disponibles permet d'estimer, par interpolation, la constitution du sous-sol dans la zone du projet, jusqu'à une profondeur de 25 m, comme suit :

0.00 – 3.00 m	Remblais
3.00 – 6.50 m	Tout-venant à débris de calcaire marneux
6.50 – 15.00 m	Marne à débris de craie marneuse
15.00 – 25.00 m	Craie marneuse

Les craies marneuses sont jugées de bonne portance à partir de quelques mètres de profondeur. Sur la base de ces indications, il a ainsi été admis que les futurs bâtiments seront construits sur des pieux forés jusqu'à la cote – 23 m pour les bâtiments de 20 m de haut et – 21 m pour les bâtiments de 11 m de hauteur.

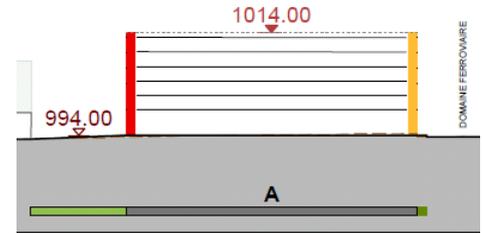
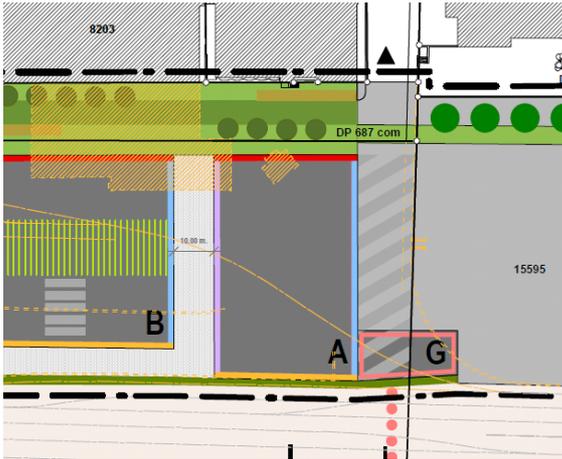
Périmètres et bâtiments concernés

Parmi les sept périmètres du projet, cinq comprennent des bâtiments à plusieurs étages, susceptibles d'être construits sur des pieux de fondation. Les périmètres concernés et le nombre de bâtiments prévus sont récapitulés dans le Tableau 3.1 ci-dessous.

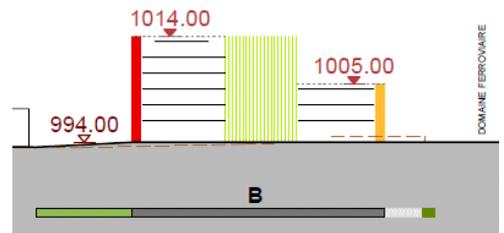
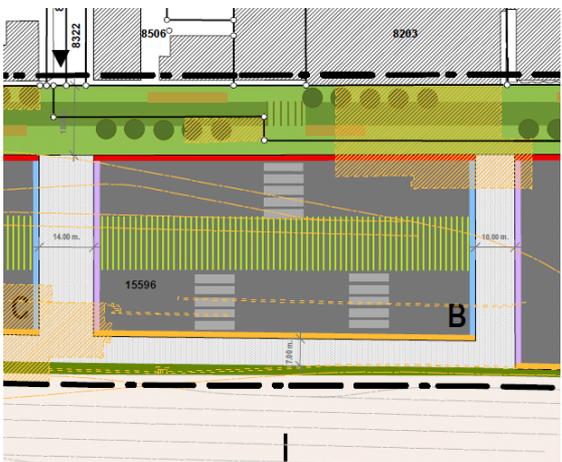
Tableau 3.1. Projet Le Corbusier – Plan spécial - Périmètres et nombre de bâtiments

Périmètre	Nombre de bâtiments	Nombre d'étages
A	1	6
B	5	2 x 6 / 3 x 3
C	4	2 x 6 / 2 x 3
D	7	3 x 6 / 4 x 3
F	1	6

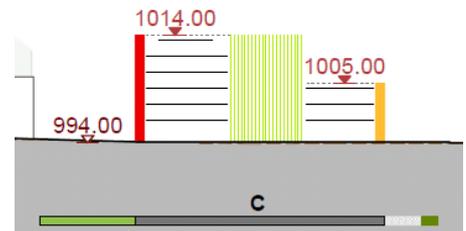
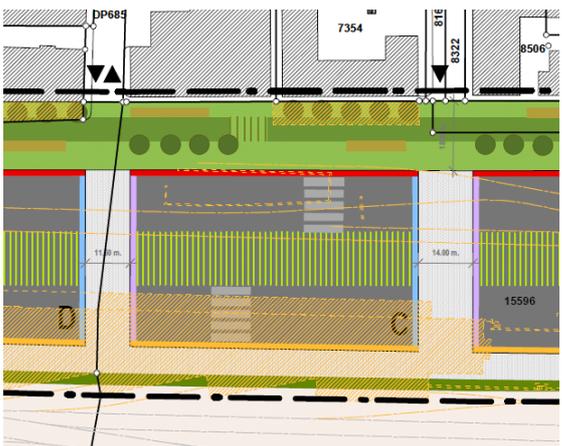
La hauteur libre du périmètre E, limitée par le Grand-Pont, ne permet pas d'envisager des bâtiments nécessitant des fondations sur pieux. Les Figures 3.15 et 3.16 montrent la situation en plan des cinq périmètres avec la position des bâtiments et leur coupe en travers, telle que définie dans le plan spécial.



Périmètre A (1 bâtiment)

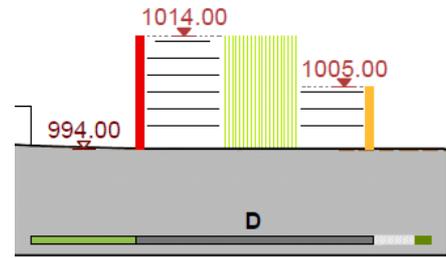
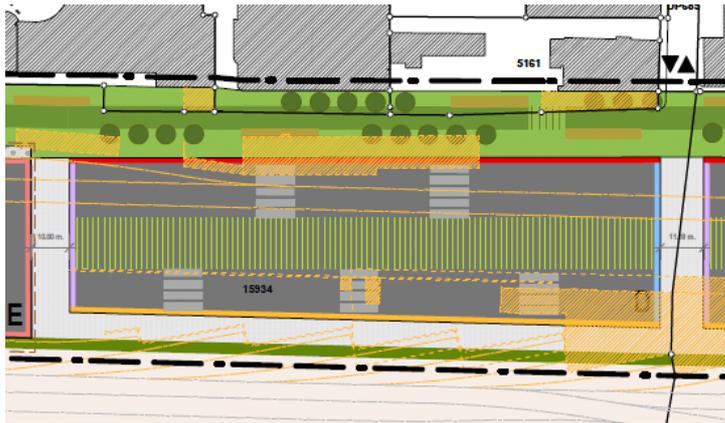


Périmètre B (5 bâtiments)

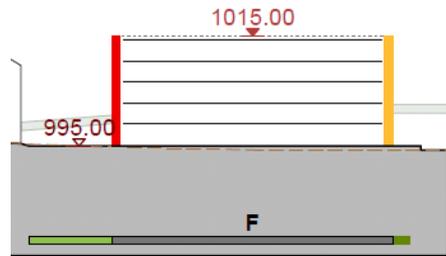
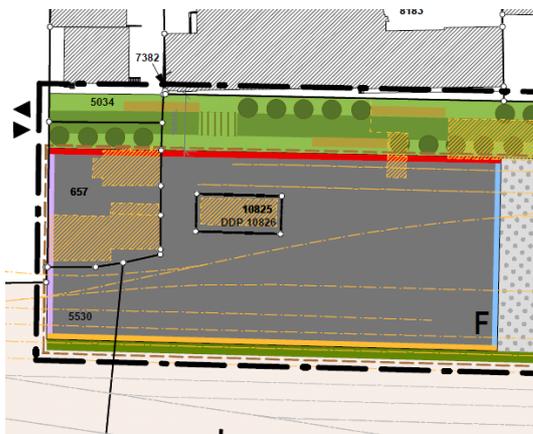


Périmètre C (4 bâtiments)

Figure 3.15. Projet Le Corbusier – Plan spécial – Vue en plan des périmètres A, B et C et coupe en travers des bâtiments.



Périmètre D (7 bâtiments)



Périmètre F (1 bâtiment)

Figure 3.16. Projet Le Corbusier – Plan spécial – Vue en plan des périmètres D et F et coupe en travers des bâtiments.

Structures porteuses des bâtiments – Caractéristiques des pieux

Compte tenu des conditions géologiques et de la géométrie des bâtiments, on a admis pour les structures porteuses un maillage en plan de 5 x 5 m en moyenne, avec un pieu de fondation à chaque croisement du maillage. La Figure 3.17 indique le système de maillage ainsi constitué, à l'exemple des 5 bâtiments B1 à B5 du périmètre B.

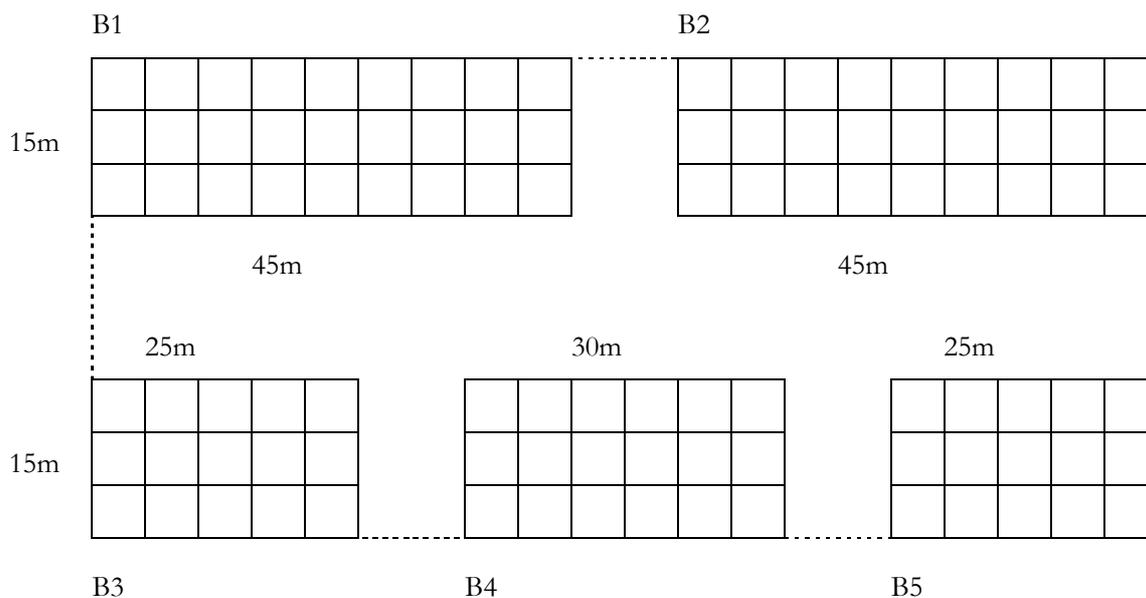


Figure 3.17. Projet Le Corbusier - Périphérie B - Schéma du maillage des pieux de fondation des bâtiments (~ 5 x 5 m).

La coupe longitudinale en élévation de la Figure 3.18 montre le schéma de principe des structures, superstructures et géostructures (pieux de fondation) du bâtiment B1, admis dans les calculs des potentiels.

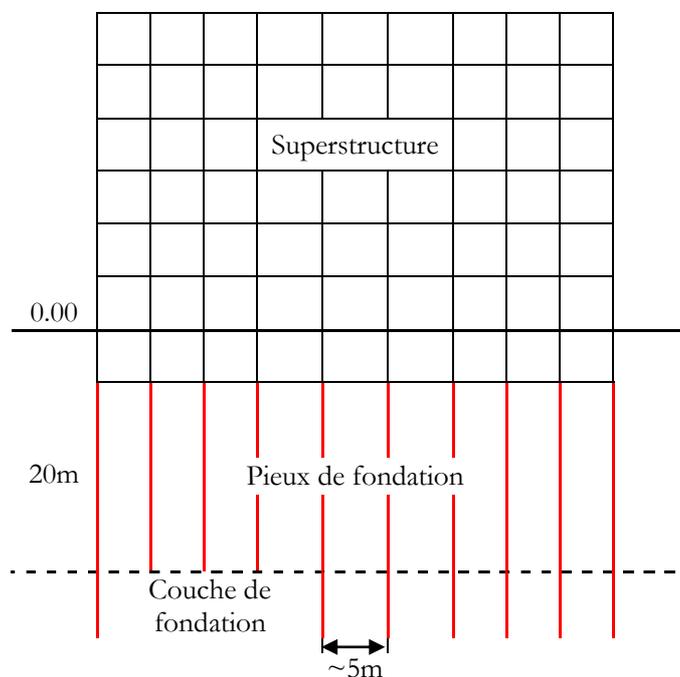


Figure 3.18. Projet Le Corbusier - Bâtiment B1 - Typologie des structures - Coupe en long.

Cette définition typologique a permis de calculer le nombre de pieux pour chaque bâtiment du projet. Les valeurs correspondantes figurent dans les Tableaux 3.2 et 3.3 ci-après.

Caractéristiques des pieux de fondation

Compte tenu d'un niveau en sous-sol du bâtiment, la tête des pieux est située à -3 m, ce qui donne une longueur de pieux de 20 m pour les bâtiments de 20 m de haut. Cette longueur est réduite à 18 m pour les bâtiments hauts de 11 m.

Il est admis des pieux battus de 50 cm de diamètre, avec 4 paires de tubes servant d'échangeur thermique. En raison de la nature du sous-sol, la quantité de chaleur annuelle pouvant être produite par ce type de pieu, dans des conditions d'exploitation normales, peut être estimée à environ 50 kWh par mètre. Suivant le système énergétique retenu, la quantité de froid produite en mode de réinjection estivale sera de l'ordre de 10 kWh par an et par mètre.

Bilan énergétique des bâtiments

Les potentiels estimés sur la base des données ci-dessus sont résumés dans les Tableaux 3.2 et 3.3. Le premier tableau est un récapitulatif concernant l'ensemble des cinq périmètres, le deuxième est un exemple, bâtiment par bâtiment, des constructions du périmètre B.

Ces tableaux contiennent des indications sur les bâtiments et leurs périmètres, ainsi que des hypothèses de calcul.

Bâtiments

- surface brute de plancher
- nombre de niveaux
- surface brute totale
- surface de référence énergétique
- consommation annuelle de chaleur.

Pieux

- nombre de pieux
- longueur active d'un pieu
- longueur active totale des pieux du bâtiment
- production annuelle totale de chaleur
- quantité de chaleur produite en pourcent de la demande.

Hypothèses de calcul

- la surface de référence énergétique représente 90% de la surface brute
- la consommation spécifique de chaleur annuelle est admise uniformément à $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$
- la longueur active d'un pieu est la longueur totale moins 2 m
- les hypothèses ci-dessus sont appliquées uniformément à l'ensemble des bâtiments
- pour des raisons géologiques, la longueur active des pieux des bâtiments de faible hauteur ne diminue pas dans les mêmes proportions que les surfaces (16 m au lieu de 18)
- la composition du sous-sol est uniforme sur toute la surface du projet.

Dans certains cas et pour des raisons de simplification des calculs, les données géométriques retenues ne sont pas rigoureusement identiques à celles du projet. Toutefois, elles se trouvent toujours dans une fourchette compatible avec celles des autres hypothèses de base.

Tableau 3.2. Périmètres A à D et F – Bâtiments et pieux – Dimensions et caractéristiques thermiques.

Pér.	Sb.	Niv.	St.	SRE	Cons. chaleur	N	L	Pieux Ltot	Chaleur	
N°	(m ²)	(-)	(m ²)	(m ²)	MWh·an ⁻¹	(-)	(m)	(m)	MWh·an ⁻¹	%
A	2'000	6	12'000	10'800	324	104	18	1'872	94	29
B	2'750	6/3	12'630	11'367	341	137	16/18	2'352	125	37
C	2'040	6/3	9'180	8'262	248	128	16/18	2'176	109	44
D	3'830	6/3	18'198	16'377	442	196	16/18	3'360	168	34
F	6'058	5	30'290	27'261	818	275	18	4'950	248	30
Total	16'678		82'298	74'067	2'173	840		14'710	744	34

Tableau 3.3. Périmètre B – Bâtiments et pieux – Dimensions et caractéristiques thermiques.

Pér.	Sb.	Niv.	St.	SRE	Cons. chaleur	N	L	Pieux Ltot	Chaleur	
N°	(m ²)	(-)	(m ²)	(m ²)	MWh·an ⁻¹	(-)	(m)	(m)	MWh·an ⁻¹	%
1	730	6	4'380	3'942	118	40	18	720	40	31
2	730	6	4'380	3'942	118	40	18	720	40	31
3	420	3	1'260	1'134	34	18	16	288	14	42
4	500	3	1'500	1'350	41	21	16	336	17	41
5	370	3	1'110	999	30	18	16	288	14	48
Total	2'750		12'630		341	137		2'352	125	37

Bâtiments Bât. : Numéro de bâtiment

Sb : surface brute de plancher

Niv. : Nombre de niveaux

St : surface brute totale

SRE : surface de référence énergétique = 0.9 x St

Cons. chaleur : consommation annuelle de chaleur (avec 30 kWh·m⁻²·an⁻¹)

Pieux N : nombre de pieux par bâtiment

L : longueur active d'un pieu

Ltot : longueur active totale des pieux du bâtiment

Chaleur MWh par an : production annuelle totale de chaleur (avec 50 kWh·m⁻¹·an⁻¹), PAC comprise

Chaleur % : quantité de chaleur produite en pourcent de la demande

Conclusions

Il ressort de ce qui est exposé ci-dessus, que la demande annuelle d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude de l'ensemble des bâtiments des périmètres A, B, C, D et F représente 2'173 MWh·an⁻¹. Les pieux énergétiques peuvent en produire 744, ce qui correspond à une couverture de 34 % en moyenne. D'un périmètre à l'autre, le taux de couverture varie entre 29 et 44 %, car la longueur des pieux des bâtiments à faible hauteur ne diminue pas proportionnellement avec les surfaces à chauffer. En considérant les bâtiments individuellement, le taux de couverture varie par exemple entre 31 et 48 % dans le cas des bâtiments B1 ou B2 et le B5.

Les hypothèses de calcul seront à vérifier lors de l'établissement des projets des bâtiments, en particulier en ce qui concerne l'intégration des différents apports énergétiques. Les pieux énergétiques de plusieurs bâtiments pourront être couplés à une ou plusieurs pompes à chaleur, dont l'emplacement sera à déterminer en fonction de celui des autres installations énergétiques.

Enfin, les caractéristiques géologiques et géothermiques des terrains, à la base du dimensionnement statique et thermique des pieux, devront faire l'objet d'un examen approfondi dans le cadre des investigations géotechniques du sous-sol, spécialement en ce qui concerne l'influence des travaux d'assainissement des zones polluées. Il est notamment recommandé d'inclure dans le programme de forage à venir des mesures de température et de conductivité thermique des terrains concernés. Ce n'est qu'en possession de ces éléments que le potentiel énergétique réel des pieux pourra être déterminé.

3.4 Tunnels - Eaux souterraines et géostructures

3.4.1 Recensement des tunnels du canton

Un recensement des tunnels routiers et ferroviaires importants sur le territoire du canton de Neuchâtel a été effectué grâce à la consultation des propriétaires et des administrations concernés. Les 15 tunnels identifiés, dont 1 en construction et 4 en état de projet, figurent dans le Tableau 3.4 ci-dessous.

Tableau 3.4. Grands tunnels routiers et ferroviaires (L > 1000m)

No	Catégorie / Nom	Longueur (m)	Nombre de tubes	Admin. (1)
Tunnels en service				
Tunnels ferroviaires				
1	St-Aubin – Sauges	2'278	1	CFF
2	Loges	3'260	1	CFF
3	Mont-Sagne	1'354	1	CFF
4	Crosettes	1'618	1	CFF
Tunnels routiers				
5	A5 – Neuchâtel Est	2'610	2	SPC
6	A5 – Neuchâtel Ouest	745	2	SPC
7	A5 – Sauges	1'850	2	SPC
8	A5 – Gorgier	2'850	2	SPC
9	H20 – Mont Sagne	1'610	1	SPC
10	H20 – Vue-des-Alpes	3'240	1	SPC
Tunnels projetés ou en construction				
Tunnels ferroviaires				
11	TransRUN – La Chaux-de-Fonds – Val-de-Ruz	5'500	1	OCT
12	TransRUN – Cernier – Neuchâtel	5'500	1	OCT
Tunnels routiers				
13	A5 – Serrières	1'100	2	SPC
14	H20 – Le Locle	3'700	1	SPC
15	H20 – La Chaux-de-Fonds	3'440	2	SPC

(1) Administration concernée :

CFF : CFF, Lausanne et Neuchâtel

SPC : Service cantonal des ponts et chaussées, Neuchâtel

OCT : Office cantonal des transports

La Figure 3.19 permet de localiser les 15 ouvrages sur le territoire cantonal. Les numéros font référence au Tableau 3.4 ci-dessus.

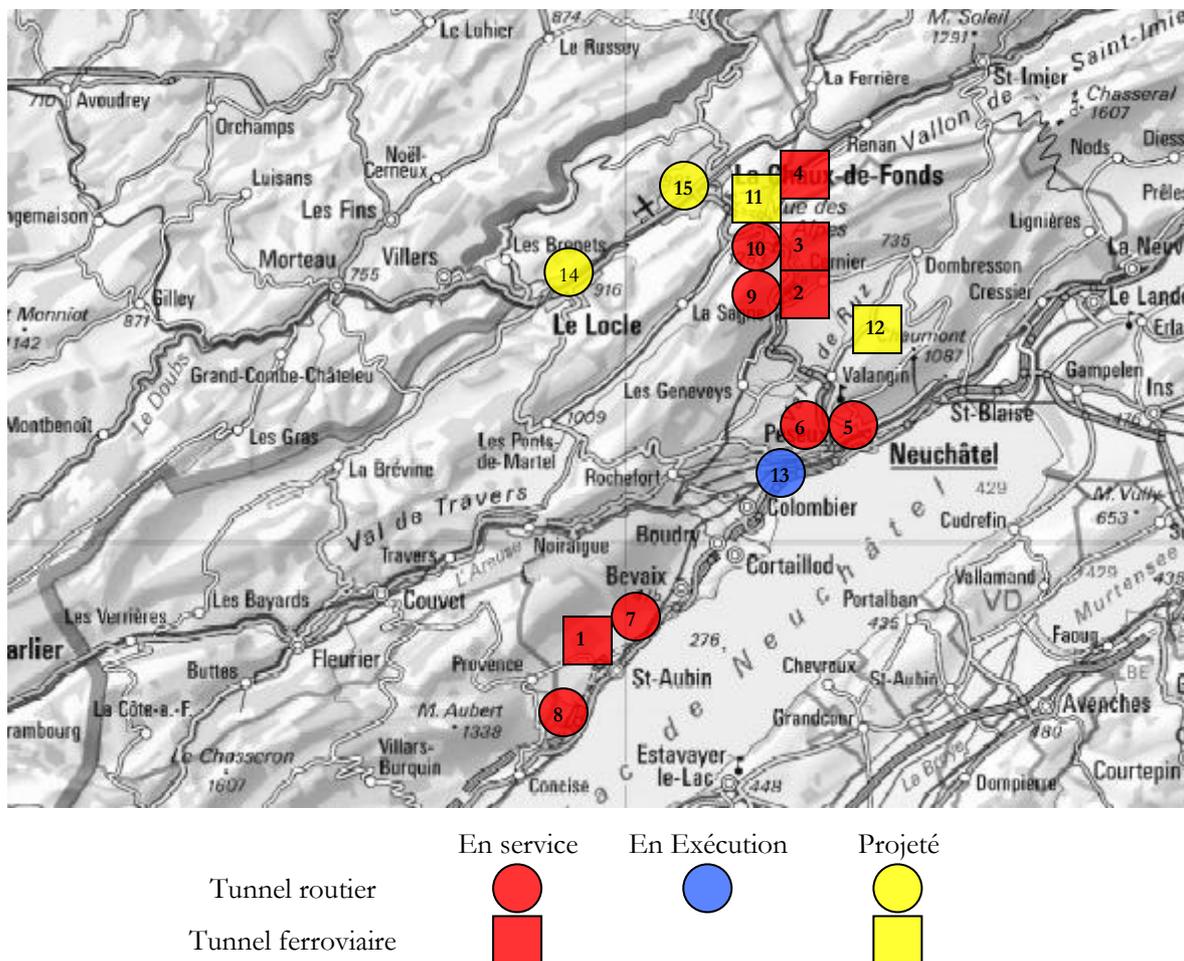


Figure 3.19. Situation des tunnels recensés (voir Tableau 3.4).

Des informations sur les ouvrages existants sont disponibles pour la totalité des tunnels en service. En revanche, peu de données sur le débit et la température des venues d'eau à l'intérieur des ouvrages ou au droit des portails sont à disposition.

Des observations et des mesures effectuées dans le tunnel des Loges entre 1978 et 1996 indiquent des venues d'eau inférieures à $5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ et des températures de l'ordre de 11 à 12 °C à 130 m des Convers, dans le Callovien (Dogger).

La Figure 3.20 indique les températures d'eau mesurées par le CHYN, entre 1992 et 2005 aux tunnels CFF et A5 de St-Aubin-Sauges. Les valeurs minimales oscillent entre 6 et 10 °C.

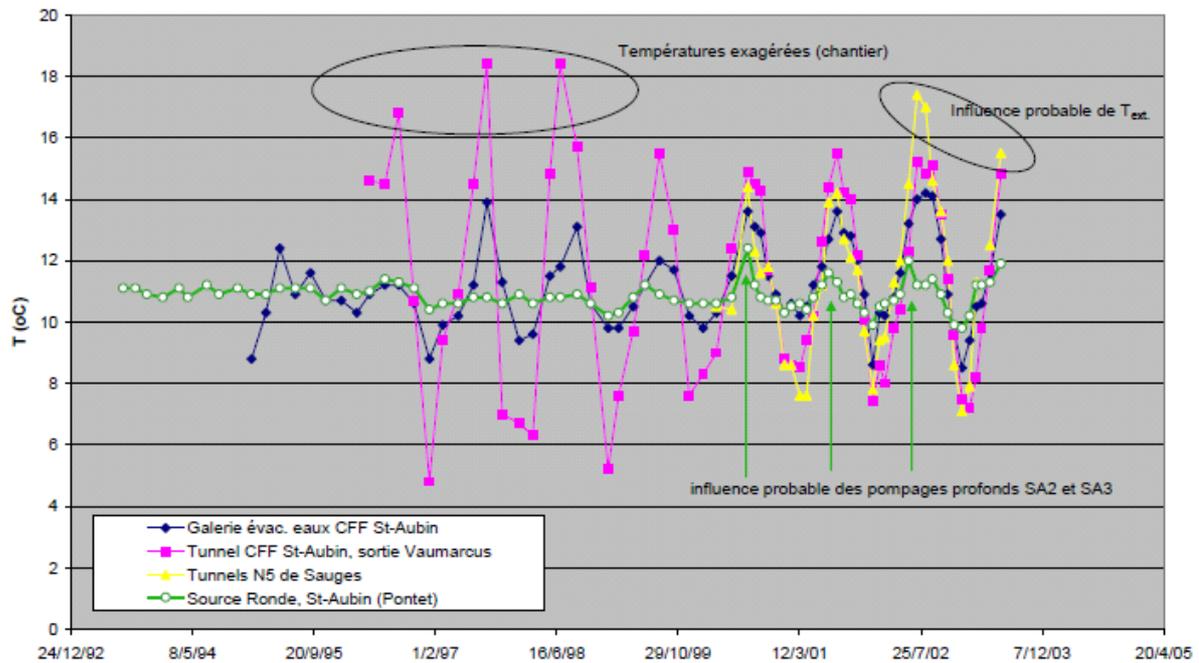


Figure 3.20. Tunnels CFF et A5 de St-Aubin-Sauges – Relevé des températures d'exhaure (CHYN).

Ces valeurs, relevées en partie en cours de travaux et dans certains cas à l'intérieur du tunnel, ne peuvent pas être considérées comme représentatives des températures actuelles au droit des portails.

Ces indications n'excluent pas que, dans certains cas comme, par exemple, à l'extrémité sud du tunnel des Loges, il n'existe de l'eau en quantité et à une température suffisante, soit 6-8 l·s⁻¹ et 8-10 °C, permettant d'envisager une valorisation thermique. Des mesures de débit et de température à la sortie des tunnels devraient être effectuées afin de vérifier cette hypothèse. Toutefois, l'ampleur des interventions, surtout pour les ouvrages ferroviaires, ne semble pas justifier d'entreprendre de tels travaux sur les tunnels existants.

En revanche, un programme d'investigation et de valorisation de l'énergie géothermique devrait être inclus dans la planification des nouveaux ouvrages. Une première analyse des potentialités des projets TransRUN et des contournements routiers de La Chaux-de-Fonds et du Locle, ainsi que des tunnels de Serrières de la A5, est exposée dans les paragraphes ci-après.

3.4.2 Projet TransRUN – Tunnels et gare de Cernier

Potentiel géothermique

Ce projet comporte deux sortes d'ouvrages susceptibles d'utiliser la chaleur du sous-sol. Il s'agit d'un côté de deux longs tunnels avec la possible présence d'eau souterraine dont le débit et la température pourraient justifier une exploitation thermique. Par ailleurs, les géostructures de la gare semi-enterrée de Cernier pourraient être équipées en échangeur thermique, pour approvisionner en chaleur et en froid ses propres locaux et/ou des futurs consommateurs proches de la station. Ces deux possibilités sont examinées ci-dessous.

Les ouvrages du projet TransRUN

Le projet TransRUN est constitué, entre la gare de Neuchâtel et celle de La Chaux-de-Fonds, d'une

liaison ferroviaire à une voie, construite en grande en partie en souterrain. Le tracé, visible sur la Figure 3.21, est long de près de 17 km (Annexe 3.4). Une gare intermédiaire est située à Cernier.

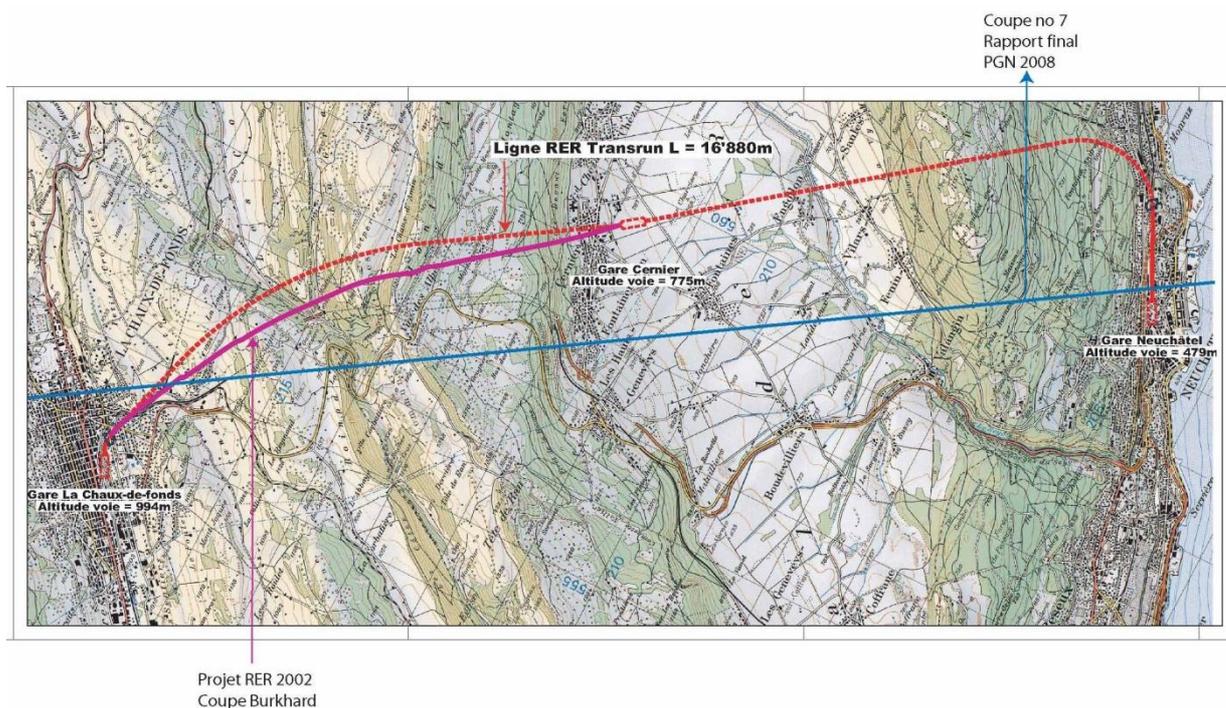


Figure 3.21. TransRUN – Plan de situation du tracé entre Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds (TransRUN et Blant 2009).

Dans la variante de base (2005), deux tunnels de l'ordre de 5'600 m. chacun sont prévus entre Neuchâtel et le Val-de-Ruz et entre ce dernier et La Chaux-de-Fonds; la traversée du Val-de-Ruz se faisant en surface. La variante de 2008, au profil en long abaissé, propose un tracé entièrement souterrain, y compris la traversée du Val-de-Ruz, qui serait en tranchée couverte. Cette variante (tout en rouge sur la figure) se distingue en outre par un tracé déplacé au nord, à la hauteur des Convers, par rapport à celui de 2002 (tracé rose). Dans les deux variantes, le tunnel aval, sous Chaumont, est en pente de 4 %, le tunnel amont de 3 % environ. Des études actuellement en cours, comprenant en particulier des investigations géologiques, ont pour but le choix d'un tracé définitif.

Le profil des tunnels est une section excavée au moyen d'un tunnelier avec pose de voussoirs (éléments préfabriqués) en béton étanche. Il est en outre prévu d'exécuter une galerie de secours carrossable parallèle au tunnel et reliée à ce dernier par des galeries transversales espacées de 500 m. Dans l'état actuel du projet, le tunnel est prévu étanché et non drainé.

Potentiel d'exploitation thermique des eaux captées par les tunnels

De par leur longueur et un recouvrement de terrain non encore atteint par d'autres ouvrages dans le canton, le potentiel thermique des eaux souterraines des deux tunnels pourrait présenter un intérêt pour une utilisation dans la région des portails inférieurs des ouvrages, soit aux Portes-Rouges pour Neuchâtel (Figure 3.22) et à Cernier pour le tunnel amont (Figure 3.24).

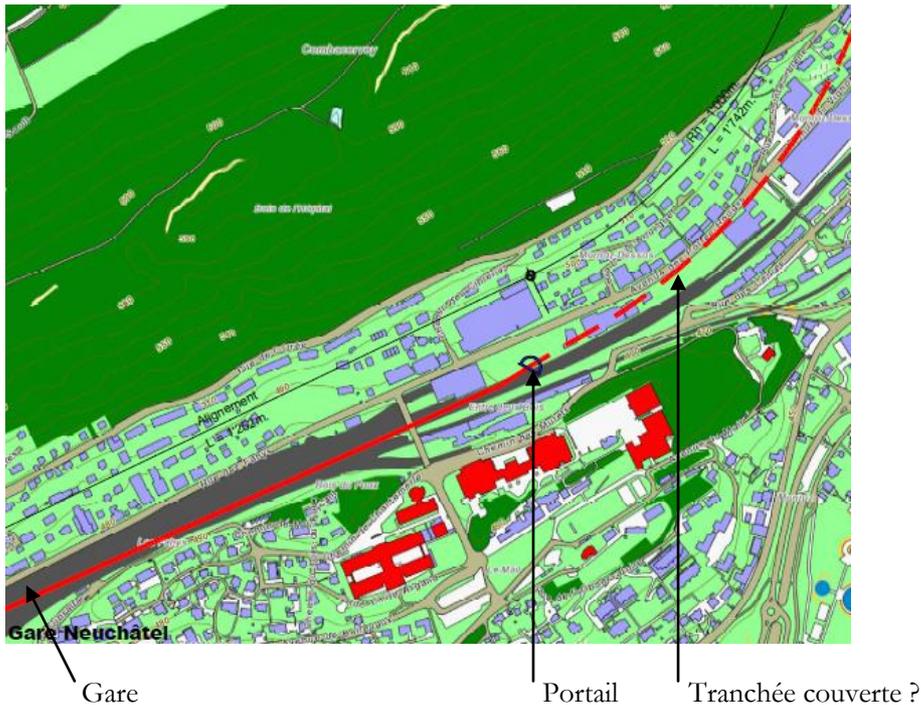


Figure 3.22. TransRUN – Plateforme ferroviaire et portail du tunnel à Neuchâtel.

Les formations géologiques dans lesquelles les ouvrages seront construits sont extrêmement diversifiées et vont du Lias (Jurassique inférieur) au Quaternaire. Elles ont fait l'objet d'études préliminaires par divers experts (Prof. M. Burkhard, Dr B. Matthey, Dr J. Meia). La Figure 3.23 reconstitue un profil en long géologique issu des esquisses du Prof. Burkhard. Il est comparé au profil géologique de l'étude PGN de 2008 (coupe n°7), situé un peu plus au Sud. Les deux coupes sont localisées sur le plan de situation de la figure 3.21 (Annexe 3.5).

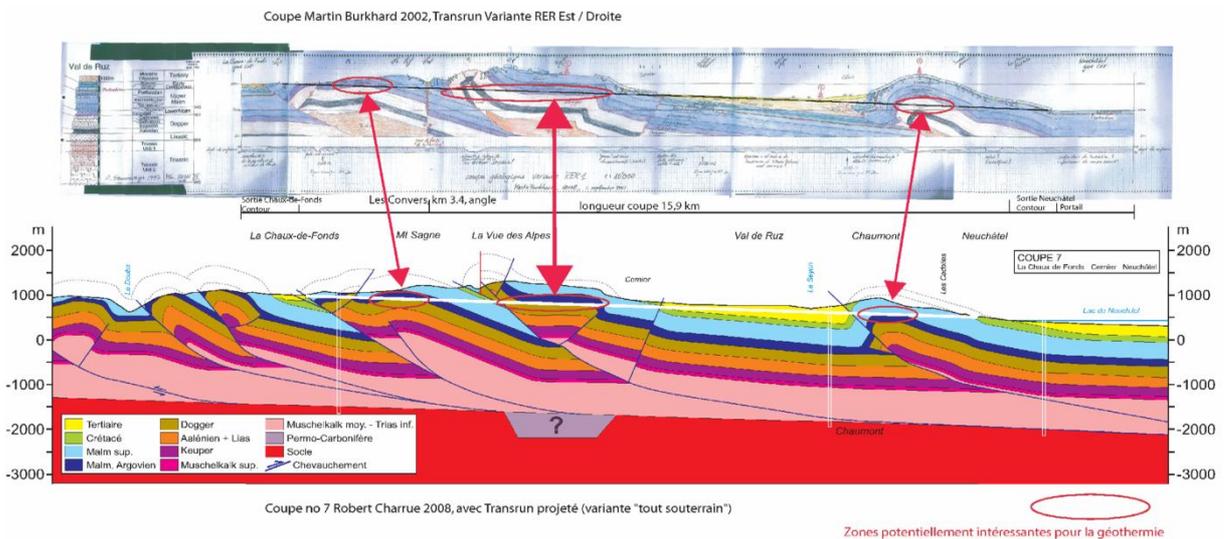


Figure 3.23. TransRUN – Profils en long géologiques comparés et zones potentiellement intéressantes pour la géothermie (PGN 2008 et Blant 2009).

Les informations disponibles ne donnent actuellement que des ordres de grandeur des débits minimums attendus. Selon Matthey (communication personnelle), ils seraient de 130 à 400 l·min⁻¹ dans les deux tunnels (2 - 7 l·sec⁻¹). Toutefois, ces débits dépendront beaucoup de l'altitude des différentes nappes (zones saturées en eau) et il y a des raisons de penser que le débit minimum sera plus élevé, car la drainance de nappes perchées pourrait sensiblement l'augmenter.

En ce qui concerne les températures, entre La-Chaux-de-Fonds et Cernier, plusieurs passages dans le Dogger, voire certains niveaux de l'Argovien, devraient être intéressants (Mt-Sagne, Convers – Vue-des-Alpes). Le décrochement de La Ferrière (Les Convers) devrait quant à lui plutôt drainer des eaux plus froides. Sur certains tronçons, les températures pourraient atteindre voire dépasser 10 °C. Une venue d'eau à 10-11 °C a été mesurée par Alleman dans le tunnel de La Vue-des-Alpes en 1990 (TM 3108, à 130 m du portail Convers).

Entre Cernier et Neuchâtel, une température de 10 °C en étiage serait également possible, en tout cas dans la partie située sous l'Argovien de l'anticlinal de Chaumont (Dogger).

Ainsi, les données actuellement disponibles permettent de penser qu'il existe un potentiel d'exploitation thermique des eaux drainées par les deux tunnels du projet TransRUN, en particulier dans les zones identifiées sur le profil en long de la Figure 3.23. Ces données demandent à être vérifiées au cours des études géologiques à venir. A cet effet, les investigations devraient comprendre, dans la mesure du possible, l'observation et l'interprétation des températures le long du tracé et au niveau des futurs tunnels. Il s'agira également d'obtenir des précisions sur le régime hydrologique et la nature des ouvrages terminés.

Le problème au niveau de l'utilisation du potentiel de chaleur risque d'être lié à un mélange d'eaux tantôt froides (6-8 °C), tantôt « tièdes » (10 °C et plus), le long de l'ouvrage. Par ailleurs, si l'étanchéité des tunnels devait être assurée par des injections systématiques du massif, cela affectera ou rendra caduque les perspectives d'utilisation thermique des eaux souterraines.

En admettant que les informations complémentaires et les réponses à ces questions confirment l'existence du potentiel, l'étape suivante consistera à planifier les dispositions constructives au niveau du projet. Cela devra se faire par l'observation des venues d'eau et des températures dans la galerie pilote, suivie par des mesures constructives adaptées, comme le captage et le drainage des eaux de différentes températures, comme cela pourrait être le cas entre l'anticlinal de La Vue-des-Alpes et Cernier.

Géostructures énergétiques pour la gare de Cernier et comparaison avec le projet CEVA

La gare de Cernier est prévue au sud du village, à proximité des grandes surfaces de l'Ecole d'agriculture et du site Evologia (Figure 3.24). La distance au centre du village est inférieure à 300 m. La gare est semi-enterrée à 15 m de profondeur. Elle comprend des embranchements couverts. Dans sa version de base, la longueur des quais est de 200 m, permettant l'arrêt de rames doubles de plus de 75 m chacune.

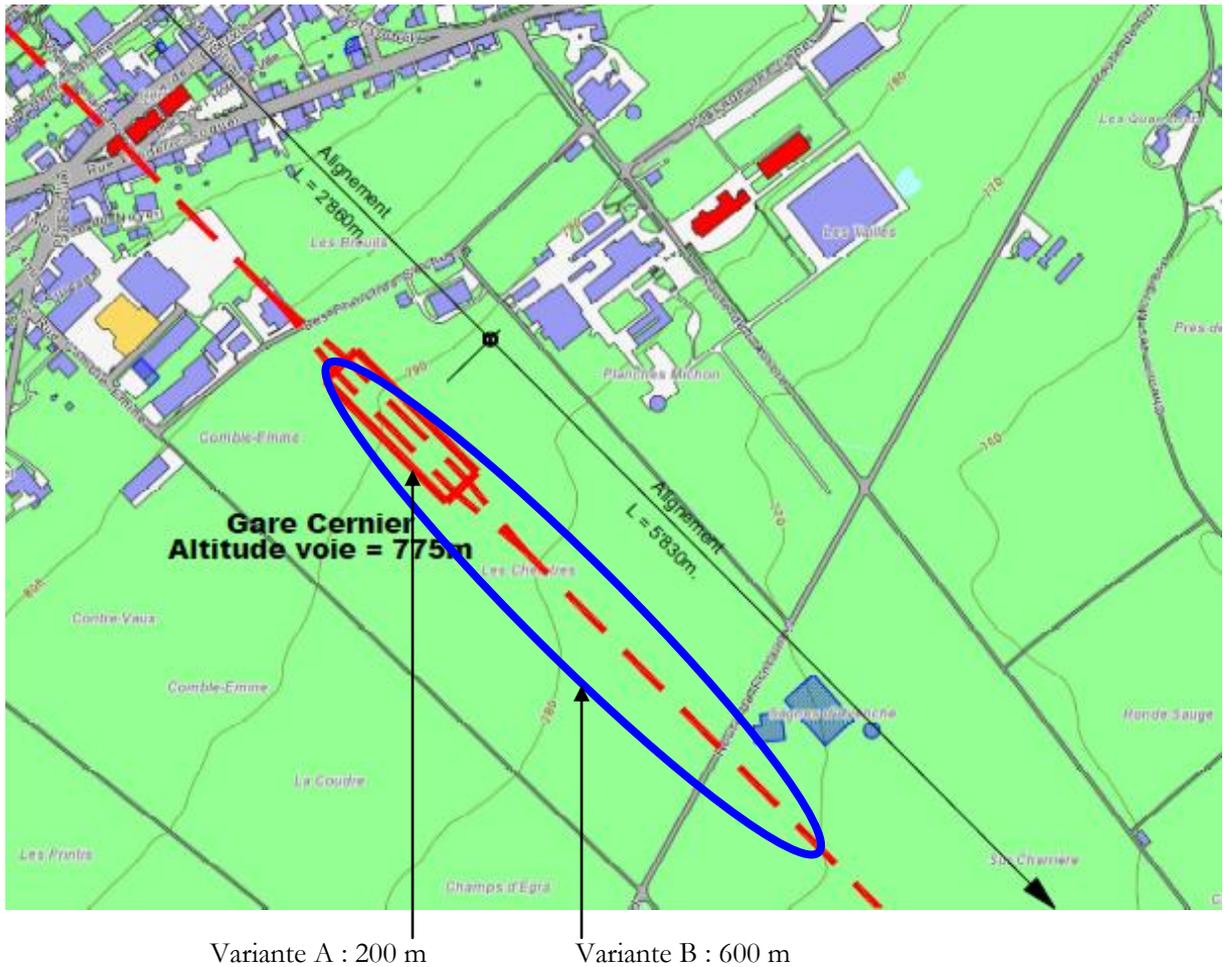


Figure 3.24. TransRUN – Situation de la gare de Cernier.

Le concept de la gare est en cours d'étude. Suivant le mode d'exploitation de la ligne, sa longueur pourrait être portée à plus de 600 m. En fonction de la disposition retenue, elle pourrait s'apparenter à celle des gares de la liaison ferroviaire CEVA, à Genève.

Le projet CEVA est le nom donné à un projet genevois visant la construction d'une ligne de RER reliant la gare de Cornavin au quartier des Eaux-Vives puis, finalement, à Annemasse. Plusieurs gares de cette liaison, tout comme la ligne elle-même sur plus de 6 km, devraient être construites en souterrain. Cela implique l'utilisation de cadres en béton armé, constitués de deux parois moulées, un radier et une dalle de couverture (Figure 3.25). Le projet prévoit d'utiliser ces géostructures comme échangeurs thermiques avec le sous-sol, à l'exemple de plusieurs réalisations de ce type à l'étranger (par ex. le métro de Vienne), permettant d'approvisionner en chaleur et en froid les locaux de service ou des consommateurs tiers situés à proximité de l'ouvrage.

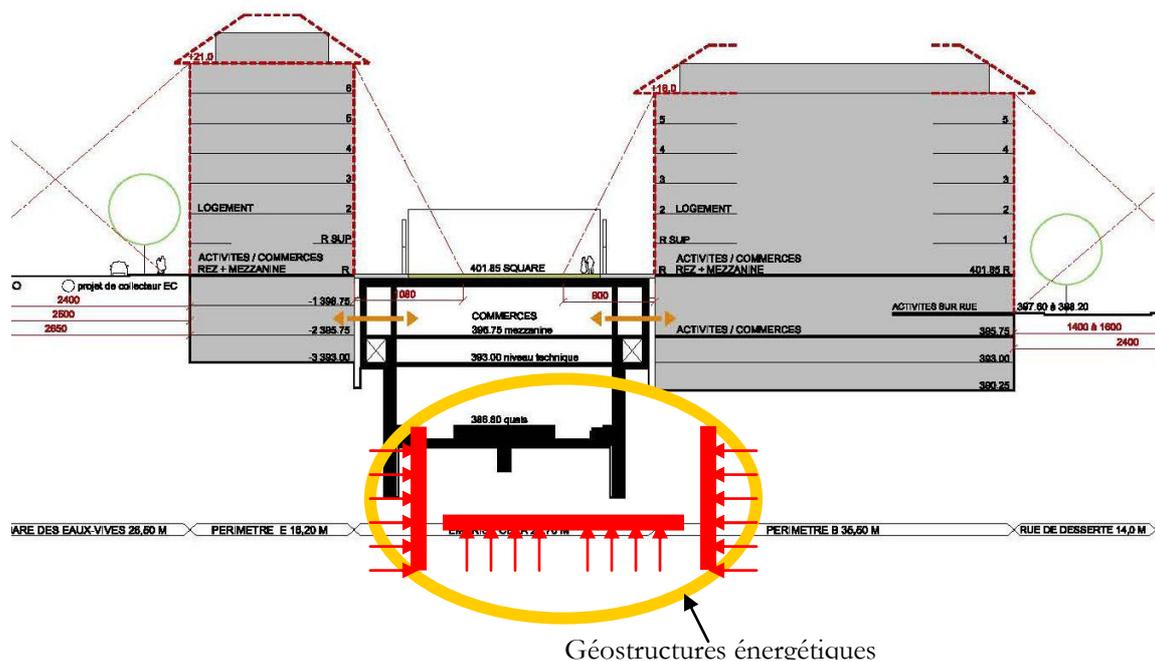


Figure 3.25. CEVA - Liaison ferroviaire Cointrin – Eaux-Vives – Annemasse à Genève. Coupe en travers de la gare des Eaux-Vives avec les géostrutures énergétiques planifiées (parois moulées et dalle de radier).

Le potentiel énergétique de cette future gare des Eaux-Vives a fait l'objet d'une évaluation chiffrée, compte tenu des conditions locales et des caractéristiques spécifiques du sous-sol, bien documentée par des études et des investigations géologiques.

Pour pouvoir calculer le potentiel énergétique de telles structures, plusieurs points ont dû préalablement être éclaircis dans le cadre d'investigations détaillées lors de l'étude :

- Estimation de la température du sol.
- Estimation de la température dans le tunnel CEVA.
- Evaluation du coefficient de transfert thermique entre l'air du tunnel et le béton des parois.
- Influence de la température de l'échangeur thermique sur la température dans le tunnel.

Des modèles numériques bidimensionnels ont été créés afin de simuler le fonctionnement du système tunnel-parois-échangeurs-sol. Ces modèles ont permis d'estimer au plus près la réponse thermique du sol face aux contraintes thermiques (Figure 3.26) et les quantités d'énergie pouvant être exploitées du tunnel. Plusieurs scénarios ont été examinés selon différents objectifs d'utilisation, permettant ainsi de définir les températures imposées. On a également comparé des variantes avec ou sans radier équipé en échangeurs.

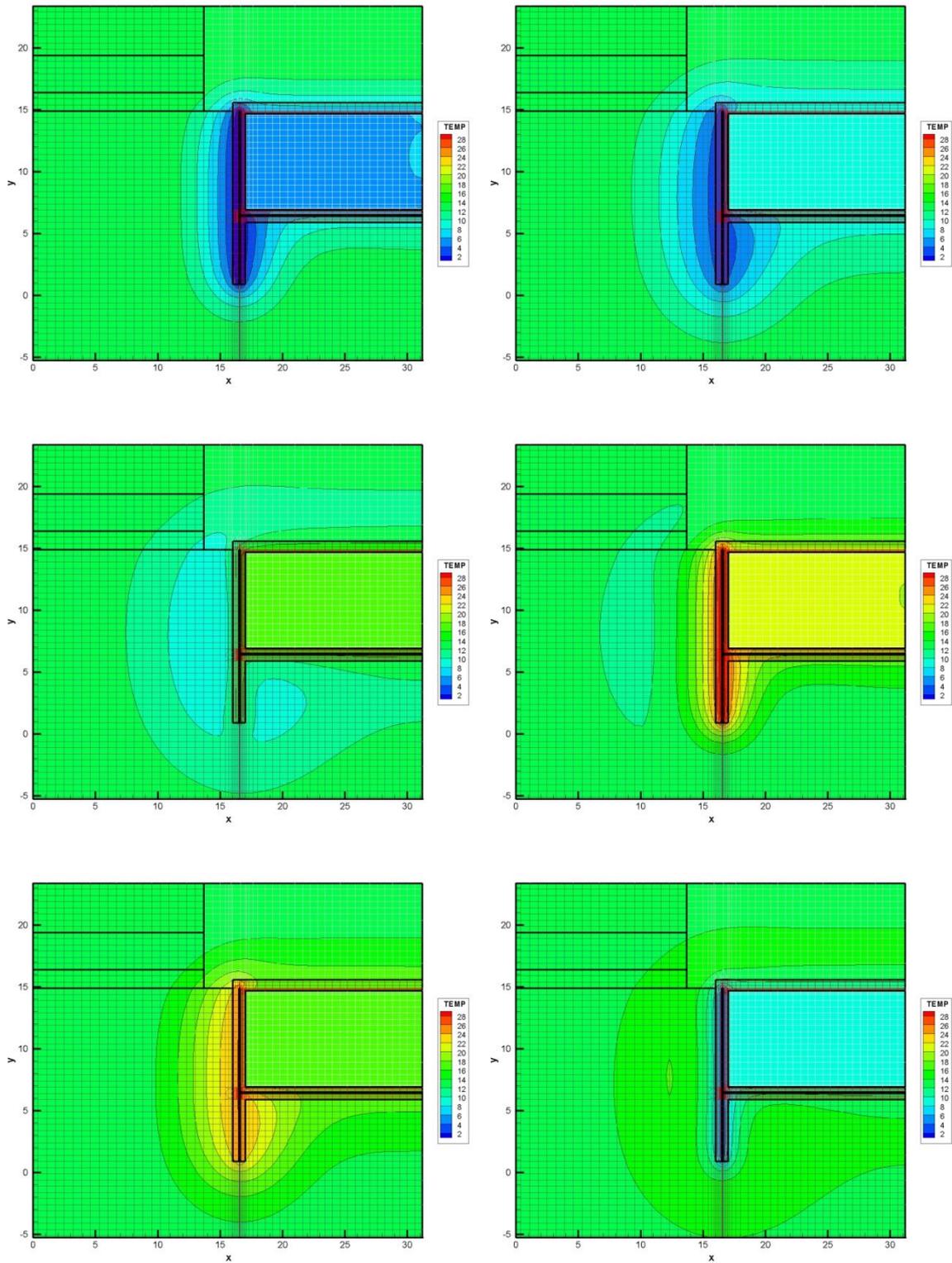


Figure 3.26. Distribution de la température autour du tunnel lors de la dixième année d'utilisation, échangeurs thermiques dans les parois seulement. De gauche à droite, puis de haut en bas, en février, avril, juin, août, octobre, décembre (Baujard et al. 2009).

Les résultats obtenus ont permis de montrer que de tels systèmes étaient énergétiquement intéressants et leurs particularités ont été mises en évidence. Ainsi, entre un tiers et la moitié de l'énergie fournie aux échangeurs provient de l'air du tunnel et dépend donc de la température de cet

air. Il a également été démontré que l'utilisation du radier permettait de pratiquement doubler les quantités d'énergie pouvant être récupérées dans le cas étudié.

Le secteur de la gare étant voué à un important développement urbain, l'énergie thermique pourrait être utilisée par des consommateurs des bâtiments voisins. Des études sont en cours pour chiffrer les avantages financiers d'une telle solution.



Figure 3.27. Vue intérieure d'une gare ferroviaire souterraine de CEVA Genève - Image de synthèse de la station Eaux-Vives (bauart 2007).

Au vu des constructions existantes et dans la perspective du développement de la zone située autour de la future gare de Cernier, un tel examen serait à prévoir dans les phases ultérieures du projet TransRUN.

Conclusions

La future liaison ferroviaire TransRUN entre Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds pourrait présenter un intérêt pour la valorisation du potentiel géothermique, soit par l'utilisation des eaux souterraines, soit par des échangeurs de chaleur incorporés dans les géostructures. Les ressources disponibles et le mode d'utilisation dépendent de la nature des ouvrages retenus au terme de l'étude préliminaire en cours.

En ce qui concerne le potentiel d'exploitation thermique des eaux de drainage, il est recommandé d'inclure dans le programme des investigations en préparation, des mesures de température et des observations hydrologiques à effectuer dans les forages. Cela permettra de déterminer le potentiel réel (régime et caractéristiques des eaux souterraines) et d'en tenir compte, le cas échéant, dans le concept des ouvrages.

Par ailleurs, suivant la variante de tracé retenu, les géostructures de la gare de Cernier pourraient être équipées d'échangeurs thermiques pour approvisionner en chaleur et en froid des locaux internes et/ou des utilisateurs tiers situés dans le voisinage. En revanche, la section de tunnel en tranchée couverte aux autres portails, dont la longueur ne devrait pas dépasser quelques dizaines de mètres, ne justifie pas de les équiper en échangeur de chaleur.

3.4.3 Les tunnels du projet H2O

Cadre général

En 2007, le Canton a décidé d'entamer une procédure en vue d'inscrire la liaison H2O dans le

réseau des routes nationales. Une « Etude préalable », préparée à cet effet concernant la réalisation du tronçon Col des Roches – Bas-du-Reymond, a été publiée en mars 2009. Elle est la base pour l'élaboration de la 2^{ème} étape d'étude, à savoir le dossier de mise à l'enquête publique, y compris l'étude d'impact sur l'environnement. Le projet tient compte et intègre le développement projeté sur le secteur d'étude, en particulier le projet Européen du Col-des-Roches et le projet Golden Green Valley au Crêt du Locle (Figure 3.28).

Compte tenu des études et des démarches administratives à venir, ainsi que de la durée d'exécution prévue, les ouvrages pourraient être mis en service au cours de la première moitié de la décennie 2020.

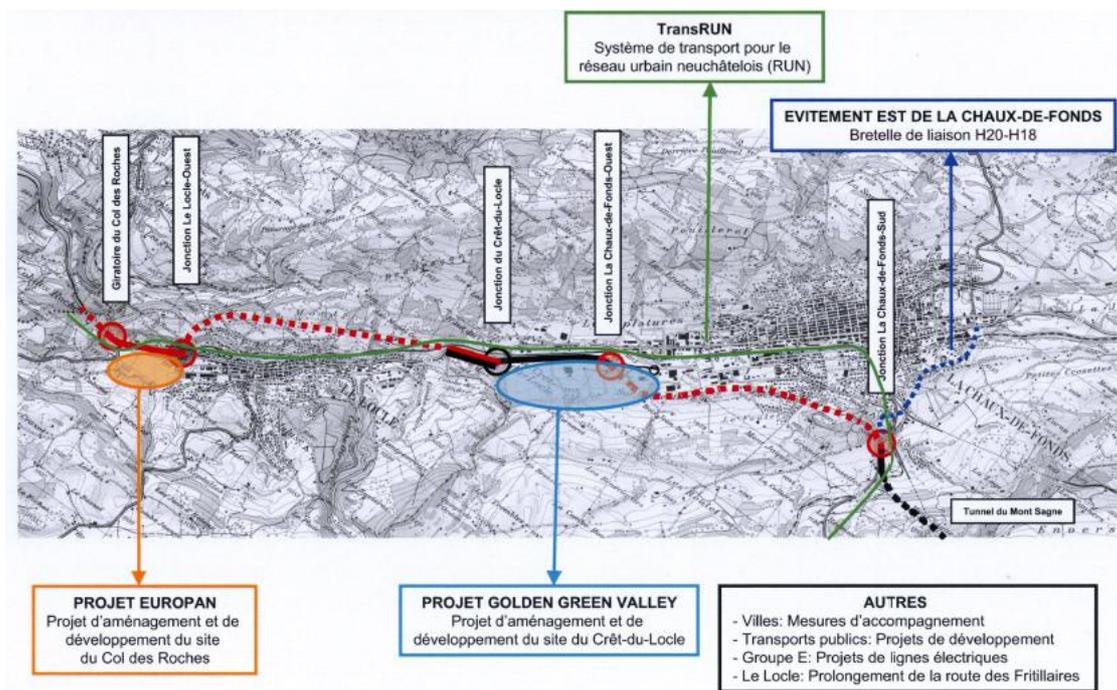


Figure 3.28. H20 – Situation générale et développement des tiers intégrés dans le projet (plan SPC).

Description du projet

Les pièces maîtresses du projet sont les deux évitements des villes de La Chaux-de-Fonds et du Locle. Dans les deux cas il s'agit de tunnels bitubes de plus de 3000 m de long, à deux voies chacun. Le profil des tunnels est circulaire, avec un rayon intérieur de 11 m. Le revêtement est constitué d'un soutènement à l'excavation, d'une couche d'étanchéité et d'un anneau de béton intérieur. La largeur totale de la chaussée est de 7.75 m.

Le tunnel de La Chaux-de-Fonds s'étend sur 3740 m, entre le portail du Bas-de-Reymond et celui des Alisiers, dont 300 m en tranchée couverte (Figure 3.29). Son profil en long accuse une pente descendante depuis les portails vers un point bas situé à 1 km environ de l'entrée ouest.

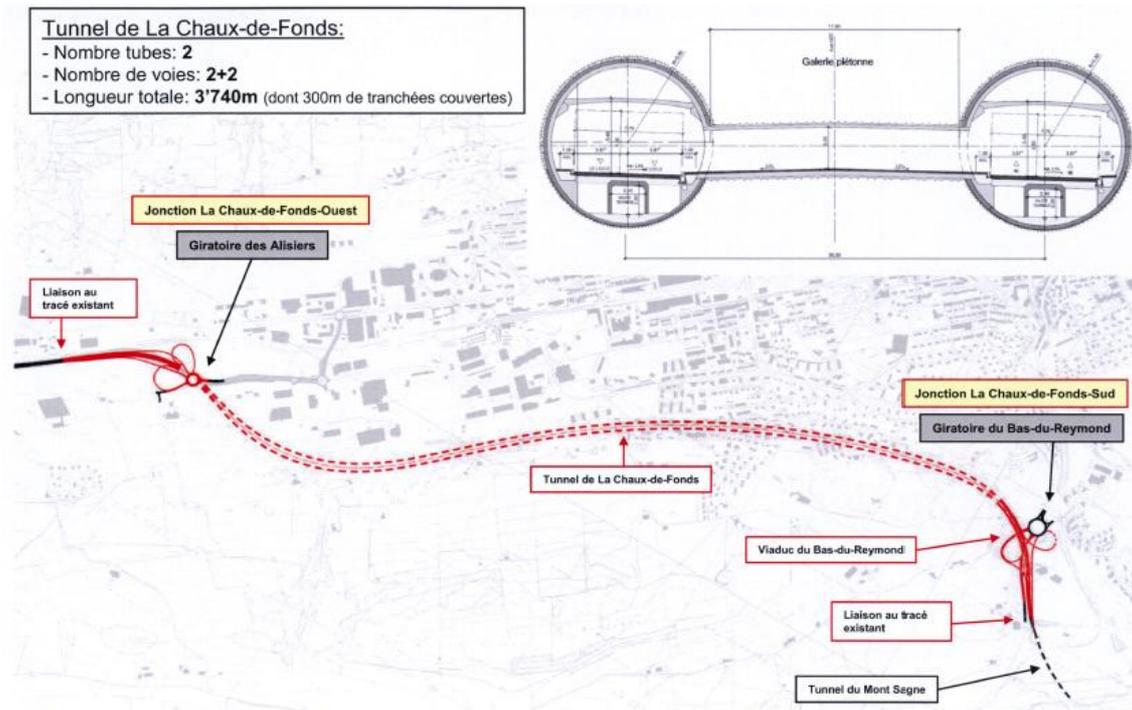


Figure 3.29. H20 - Evitement de la Chaux-de-Fonds – Situation générale et coupe en travers des tunnels (plan SPC).

Le tunnel du Locle aura une longueur de 3700 m. Seul un des deux tubes sera réalisé en première étape, le second sera remplacé temporairement par une galerie de sécurité (Figure 3.30). Le profil en long présente une pente variant entre 3.7 et 1.0 % vers l'ouest.

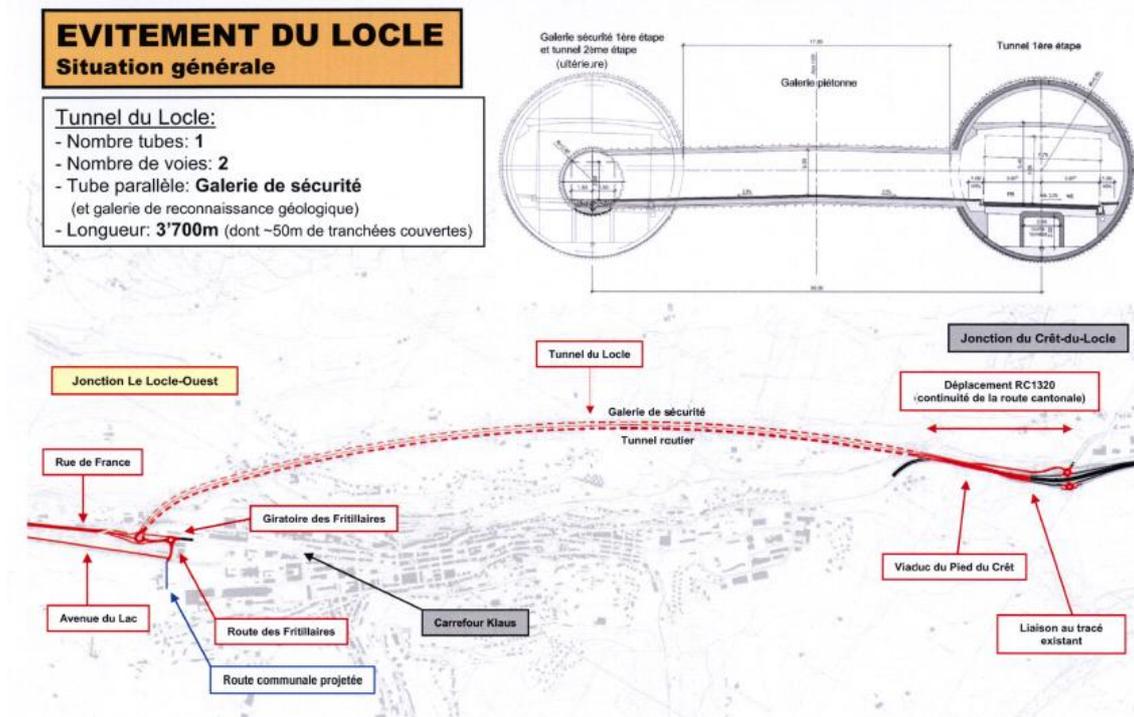


Figure 3.30. H 20 - Evitement du Locle – Situation générale et coupe en travers du tunnel (plan SPC).

Géologie et géothermie

Les tunnels sont implantés dans des roches constituées essentiellement par des formations du Malm, mais également de formations tertiaires (gompholite, Oeningien). La Figure 3.31 donne un aperçu des formations concernées, sur la base des données de la documentation existante. La campagne d'investigation géologique réalisée en 2009, dont les résultats détaillés ne sont pas encore connus, permettra de préciser ces informations.

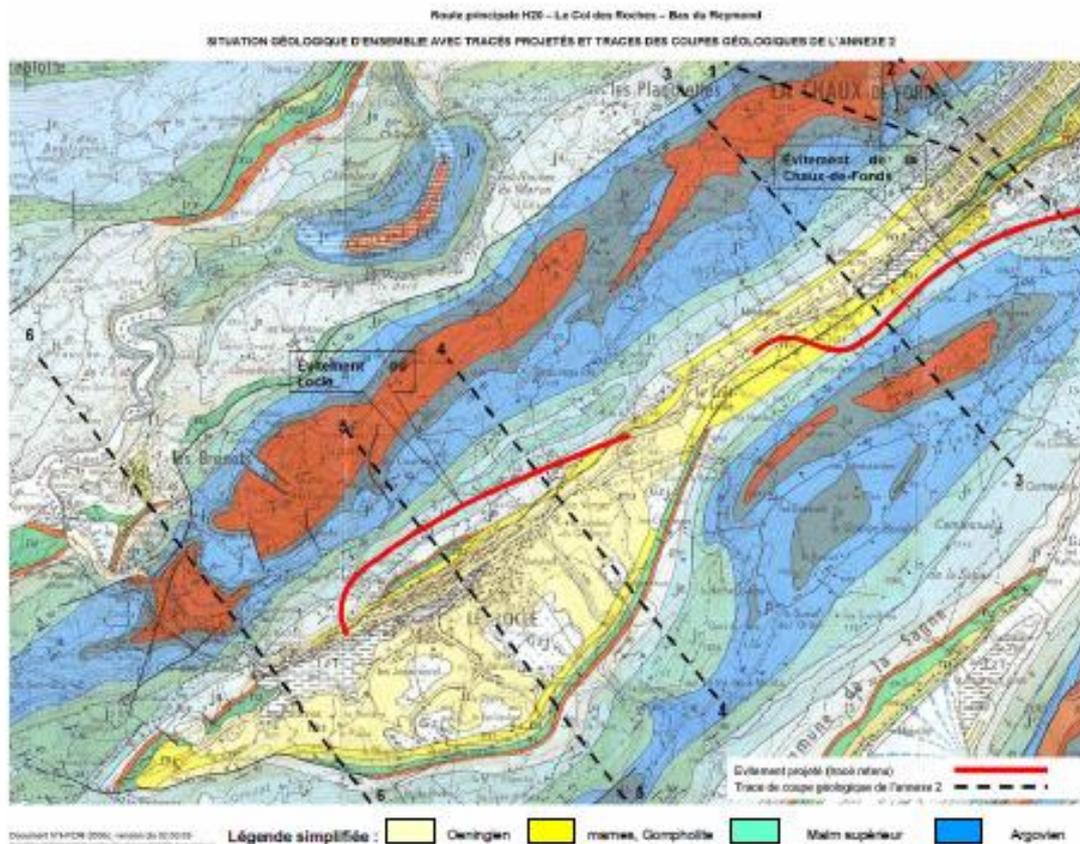


Figure 3.31. H20 - Evitement de la Chaux-de-Fonds et du Locle – Géologie générale (plan Hydrogeos).

Dans le cadre de cette campagne, une série de mesures de température a été réalisée dans les forages de reconnaissance, au moyen d'une sonde de diagraphie de 100 m de longueur. Les mesures concernaient 5 forages, dont deux à La Chaux-de-Fonds (LCDF-T4, prof. 60 m et LCDF-PE2, prof. 40 m) et trois au Locle (LL-PW2, prof. 59 m, LL-T1, prof. 100 m et LL-T2, prof. 100 m). Les Figures 3.32 et 3.33 montrent le profil en long des tunnels avec l'emplacement des forages et les températures relevées au fond des trous.

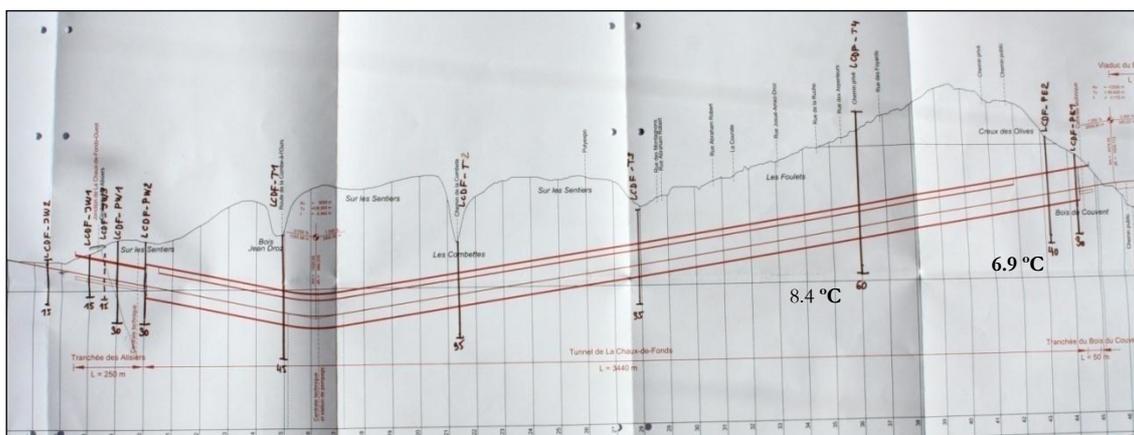


Figure 3.32. H20 – Profils en long des tunnels de La Chaux-de-Fonds avec l'emplacement des forages de reconnaissance (plan Hydrogeos).

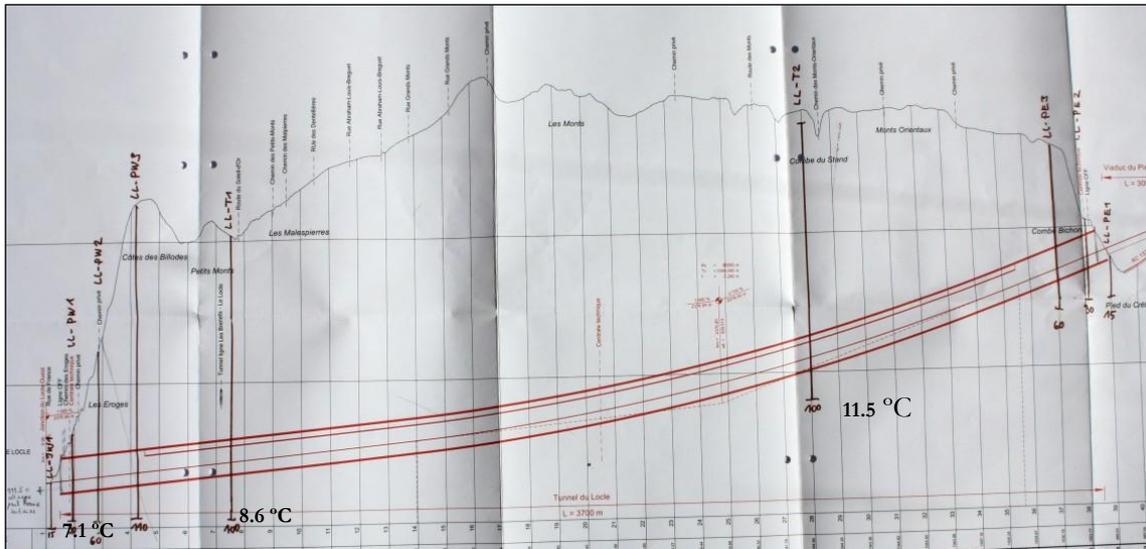


Figure 3.33. H2O – Profils en long du tunnel du Loche avec l'emplacement des forages de reconnaissance (plan Hydrogeos).

Les résultats des mesures sont donnés dans le Tableau 3.5 ci-dessous. Les forages étant secs, on a observé des paliers de stabilisation de 1 heure pour chaque mesure. On peut ainsi considérer que les températures de l'air mesurées dans les forages sont assez représentatives de celles du massif, du moins au niveau des futurs tunnels. Les mesures ont été réalisées pendant l'été, mais à une profondeur de 50 à 100 m, les températures en hiver ne devraient pas baisser notablement.

Tableau 3.5 : Mesures de température dans les forages de reconnaissance du tracé de la H2O (Hydrogéos).

Forage	LL-PW2		LL-T1		LL-T2		LCDF-T4		LCDF-PE2	
	59 m, sec		100 m, sec		100 m, sec		60 m, sec		40 m, sec	
Profondeur, mesure (m) et température (°C)	-1	13.8	-1	14.8	-1	12.6	Ext.	14	Ext.	21
	-30	7.8	-33	9.8	-33	9.6	-30	9.7	-20	8.6
	-59	7.1	-66	8.4	-66	10.1	-60	8.4	-40	6.9
	-	-	-100	8.6	-100	11.5	-	-	-	-
Date de mesure	24.06.09		10.07 et 13.07.09		13.08.09		23.06.09		12.06.09	
Géologie prédominante	Molasse saumâtre et marine		Calcaire très fracturé		Calcaire peu fracturé		Calcaire peu fracturé		Calcaire très fracturé	
Equipement	Inclinomètre		-		-		-		-	

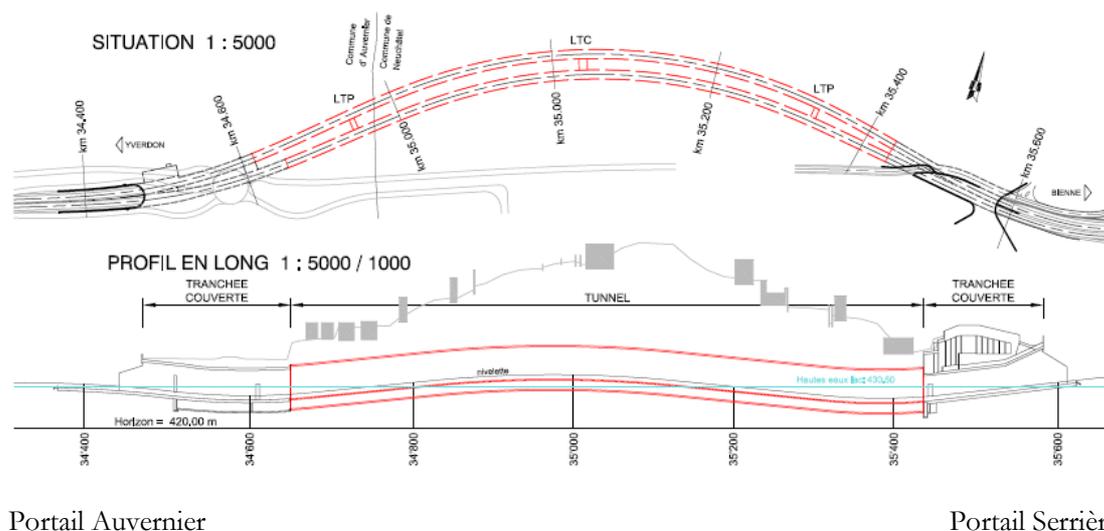
Conclusions

Les niveaux de température observés et l'absence d'eau souterraine montrent qu'il n'y a pas lieu, à ce stade, d'envisager des aménagements spécifiques pour une utilisation de la chaleur dans ces

ouvrages. On ne peut toutefois pas entièrement exclure de rencontrer des conditions plus favorables lors d'investigations supplémentaires, ou en cours de travaux. Par exemple, une nappe d'eau plus chaude, non décelée par les forages ponctuels. Il est donc recommandé de porter attention à cette possibilité dans la suite du projet pour décider, le cas échéant, des éventuelles mesures constructives à prendre.

3.4.4 A5 - Tunnels de Serrières

Le tronçon Auvernier est – Serrières complète la traversée de Neuchâtel par l'A5. Il s'agit de deux tunnels à double voie, de l'ordre de 1'100 m de long chacun, dont environ 800 m excavés en souterrain. Les quatre sections en tranchée couvertes, à l'extrémité des tunnels, ont une longueur de 140 à 180 m (Figure 3.34).



Portail Auvernier

Portail Serrières

Figure 3.34. A5 – Tunnels de Serrières – Situation et profil en long.

L'excavation de la calotte du tube nord sera terminée à fin 2009 et l'ouverture au trafic de l'A5 est prévue à fin 2013. Les profils en long des deux tubes sont partiellement situés sous le niveau du lac. Soumis aux actions de la nappe lacustre au droit des portails et d'une nappe fissurale dont le niveau se situe à 5 m sous la surface topographique dans la zone centrale, les deux tubes sont pourvus d'un revêtement annulaire en béton non drainé, muni d'une étanchéité périphérique complète.

En cours d'excavation du tunnel nord, au TM 480, une faible venue d'eau avec un débit d'env. $0,5 \text{ l}\cdot\text{sec}^{-1}$ et une température de $11,8 \text{ }^\circ\text{C}$ a été rencontrée. Les observations ont démontré qu'il s'agit des eaux de la source FTR, dont le brusque arrêt et la baisse des niveaux piézométriques aux alentours se sont produits simultanément avec le recoupement de la nappe dans le tunnel. Le régime hydrologique originel devrait être rétabli après l'achèvement des travaux d'étanchement du tunnel. Les prévisions n'autorisent pas de s'attendre à des venues plus significatives dans les phases ultérieures des travaux.

Dans ces conditions, l'utilisation des eaux souterraines pour une valorisation thermique n'entre pas en ligne de compte.

L'examen d'équiper en échangeurs de chaleur les géostructures du tunnel, en premier lieu dans les tranchées couvertes (cadres en béton et pieux de fondation), a montré que cette possibilité ne peut pas être envisagée, en raison principalement de l'état d'avancement du projet.

3.5 Synthèse et conclusions

La validation, en avril 2009, du projet de développement Le Corbusier à La Chaux-de-Fonds a permis d'avoir accès aux informations en vue de procéder à une évaluation du potentiel géothermique des pieux énergétiques. Le projet concerne une surface de près de 49'000 m² s'étendant au sud de l'avenue Léopold-Robert, parallèlement à cette artère, sur une longueur de 700 m et une largeur d'environ 70 m, entre la place de la gare et Coop-Entilles. Des constructions implantées dans les 15 à 20 prochaines années abriteront des logements et des bâtiments divers : lieux de formation, de loisirs et d'activités socioculturelles, structures d'accueil industrielles et hôtelières, locaux administratifs, petits commerces et autres.

La démarche suivante a été retenue pour définir les caractéristiques des pieux de fondation des futures constructions et pour estimer leur potentiel énergétique permettant de contribuer, le cas échéant, à la couverture des besoins de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire :

1. Définitions des conditions géologiques et fondations.
2. Sélection des bâtiments concernés et définition des structures porteuses.
3. Détermination des caractéristiques des pieux de fondation par bâtiment.
4. Estimation des besoins énergétiques de chaque bâtiment.
5. Calcul du potentiel énergétique des pieux et comparaison avec les besoins énergétiques.

La demande annuelle d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude de l'ensemble des 18 bâtiments des 7 périmètres représente environ 2'200 MWh. Les pieux énergétiques peuvent en produire 750, ce qui correspond à une couverture de 34 % en moyenne. D'un périmètre à l'autre, le taux de couverture moyen varie entre 29 et 44 %, car la longueur des pieux des bâtiments à faible hauteur ne diminue pas proportionnellement avec les surfaces à chauffer. En considérant les bâtiments individuellement, le taux de couverture varie par exemple entre 31 et 48 % dans le cas des bâtiments du périmètre B.

Les hypothèses de calcul seront à vérifier lors de l'établissement des projets des bâtiments, en particulier en ce qui concerne l'intégration des différents apports énergétiques. Les pieux énergétiques de plusieurs bâtiments pourront être couplés à une pompe à chaleur, dont l'emplacement sera à déterminer en fonction de celui des autres installations énergétiques.

Les caractéristiques géologiques et géothermiques des terrains, à la base du dimensionnement statique et thermique des pieux, devront faire l'objet d'un examen approfondi dans le cadre des investigations géotechniques du sous-sol, notamment en ce qui concerne l'influence des travaux d'assainissement des zones polluées. Il est notamment recommandé d'inclure dans le programme de forage à venir des mesures de température et de conductivité thermique des terrains concernés. Ce n'est qu'en possession de ces éléments que le véritable potentiel énergétique des pieux pourra être déterminé.

La future liaison ferroviaire TransRUN entre Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds pourrait présenter un intérêt pour la valorisation du potentiel géothermique, soit par l'utilisation des eaux souterraines, soit par des échangeurs de chaleur incorporés dans les géostructures. Les ressources disponibles et le mode d'utilisation dépendent de la nature des ouvrages retenus au terme de l'étude préliminaire en cours. Suivant la variante de tracé retenu, les géostructures de la gare de Cernier pourraient être équipées d'échangeurs thermiques pour approvisionner en chaleur et en froid des locaux internes ou des utilisateurs tiers situés dans le voisinage, à l'image de ce qui est prévu dans le cadre du projet de liaison ferroviaire Cornavin – Eaux-Vives – Annemasse à Genève.

En ce qui concerne le potentiel thermique des eaux de drainage, les données actuellement disponibles ne sont pas suffisantes pour certifier la présence d'eau souterraine thermiquement

utilisable en phase finale du projet. Les études permettent cependant de penser que cette éventualité existe dans les deux tunnels du projet TransRUN, en particulier dans trois zones identifiées par les études. Ces hypothèses demandent à être vérifiées au cours des études géologiques en préparation.

A cet effet, il est recommandé d'inclure dans le programme d'investigations des mesures de température et des observations hydrologiques à effectuer dans les forages. Cela permettra de déterminer le potentiel réel (régime et caractéristiques des eaux souterraines) et d'en tenir compte, le cas échéant, dans le concept des ouvrages.

L'examen des conditions hydrogéologiques des tunnels de contournement de La Chaux-de-Fonds et du Locle de la future liaison routière H20 et les mesures de température effectuées lors de la campagne d'investigation n'ont pas permis d'identifier l'existence de potentiel géothermique valorisable dans le cadre de ce projet.

3.6 Références

- Alleman G. & Muralt R. 1996 Etude du comportement de la zone non-saturée fissurée et karstique du tunnel sous la Vue-des-Alpes (NE, Suisse). Rapport du Chyn.
- Anstett M., 2001. Pieux énergétiques du centre scolaire de Fully ; Comptes-rendus de la 12ème 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.
- Baujard C. Kohl Th. & Wilhelm J., 2009. Projet CEVA. Estimation du potentiel géothermique. Géothermie CH, No 47, p. 13-14.
- Bilfinger + Berger & NEK Umwelttechnik GmbH, 1997. Energiepfähle für den Neubau der Landesbank Hessen-Thüringen, Frankfurt am Main ; Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, Mannheim.
- Blant, D., 2009. PDGN. Géothermie des tunnels. Rapport ISSKA, Neuchâtel.
- 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, p. 9-10.
- Borel, J.-P., 2009. Centre de logistique Aldi – Chauffage-rafraîchissement géothermique avec 378 pieux énergétiques. Bulletin Géothermie.CH, no 47, p. 19-21.
- Commune de La Chaux-de-Fonds, 2007. Plan spécial Le Corbusier. Règlement et documents explicatifs.
- 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, p. 387-421.
- 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.
- Groupement PGF, 2005. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg (PGF), Rapport final pour le Service des transports et de l'énergie, Fribourg.
- Groupement PGV, 2003. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud (PGV), Rapport final pour le Service de l'environnement et de l'énergie, Vaud.
- 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.
- Kohl T. & Baujard C., 2008. Liaison ferroviaire CEVA : potentiel géothermique. Quantification de l'énergie apportée par des géostructures énergétiques. Rapport final pour le ScanE, novembre 2008, Genève.
- 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, 2004. Chauffage et climatisation de l'école primaire de Fully. Office fédéral de l'Energie (OFEN), Berne.
- OFEN, 2006. L'utilisation de la chaleur terrestre. Aperçus, technologies, visions. Office fédéral de l'Energie (OFEN), Berne.
- Office des routes cantonales, 2009. H20 – Evitement du Locle et de La Chaux-de-Fonds. Dossier du projet préalable.
- Office des transports, 2009. Projet Transrun - Variante en souterrain. Rapport et annexes.
- Pahud D., 2001. Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs ; 12ème 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. & 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. Rapport final. SUPSI, Canobbio: 93 pp.
- Pahud D. & Hubbuch M., 2007. Dock Midfield. Performances mesurées des pieux énergétiques. Géothermie CH, No 42, p. 13-14.
- Preg R., 2001. Kunsthau 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. 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 SIADokumentation D 0190. Géothermie CH, No 40 : p. 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. Géostrukture énergétiques. Fiche technique. Société Suisse pour la Géothermie (SSG) : 2 pp.
- 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.
- 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. Potentiel thermique des nappes phréatiques (NAP)

4.1 Introduction et objectifs

Dans le canton de Neuchâtel, les nappes phréatiques exploitables comme ressource thermique par captage de faible profondeur sont d'extension limitée et le plus souvent utilisées pour la production d'eau potable.

En 2008, l'évaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN 2008) a permis de délimiter les secteurs favorables à l'exploitation de la ressource et de recenser les installations existantes qui font l'objet d'une concession. Les caractéristiques générales des nappes phréatiques du canton ont été ainsi définies et quelques principes de dimensionnement établis dans un but informatif afin de promouvoir l'exploitation de la ressource.

Les nappes phréatiques exploitables thermiquement s'étendent sur une surface de 14 km², soit 2 % de la surface du canton. Des résultats de l'étude PGN (2008), il faut retenir en particulier qu'en dépit du caractère très local de la ressource, le potentiel de développement de l'exploitation thermique des nappes phréatiques est élevé. En effet, la ressource est très souvent située à proximité immédiate d'utilisateurs potentiels et son exploitation actuelle est très peu développée (production de 1.5 GWh_{th}·an⁻¹ en 2009, soit ~0.7 ‰ des besoins en chaleur du canton).

Sur la base de ces constatations et du fort développement à prévoir à moyen terme des installations de captage thermiques sur nappe phréatique, le programme de développement de la géothermie dans le canton de Neuchâtel s'est fixé les objectifs suivants :

- Calcul du potentiel théorique de l'exploitation thermique des nappes phréatiques dans le canton de Neuchâtel par captage de faible profondeur avec rejet, sur la base de la carte des possibilités d'exploitation thermique des nappes phréatiques et des résultats du projet PGN (2008).
- Rédaction d'un guide intitulé : « *Exploitation de la chaleur des nappes phréatiques de faible profondeur : guide d'aide au dimensionnement des ouvrages de petite dimension et procédures d'autorisation dans le Canton de Neuchâtel* ». Le guide est fourni en annexe 4.1.

4.2 Méthodologie

4.2.1 Remarque préalable

Le calcul du potentiel thermique des nappes phréatiques nécessite la connaissance des processus hydrogéologiques détaillés (caractéristiques locales de l'aquifère, vitesses et direction des écoulements souterrains, mécanismes de recharge, etc.). La complexité des processus en jeu est difficile à maîtriser avec des formules analytiques simples et des approximations. Dans l'absolu, à la condition d'avoir les données suffisantes, la seule méthode fiable pour calculer le potentiel serait de simuler, dans le détail et de manière saisonnière, le comportement thermique de la nappe avec différents scénarios d'exploitation thermique. En réalité, les connaissances que nous avons des nappes phréatiques en 2009 sont bien souvent insuffisantes pour que l'on puisse appliquer de telles méthodes et le temps nécessaire dépasserait largement le cadre de ce programme.

Les méthodes appliquées dans ce travail sont par défaut des calculs simplifiés qui permettent d'approximer le potentiel d'exploitation des nappes du canton. Nous rendons le lecteur attentif que, pour une gestion plus précise de la ressource, une simulation détaillée par modèle numérique devrait être entreprise pour confirmer ces potentiels. Dans tous les cas, les potentiels calculés dans la présente étude sont indicatifs et ne doivent pas être considérés comme des valeurs limites d'exploitation servant à restreindre le nombre d'installations.

Ajoutons qu'au moment où la limite de la ressource naturelle serait atteinte, une recharge thermique à basse enthalpie par des moyens simples pourra toujours être envisagée.

4.2.2 Principes généraux

Avec le développement à prévoir du nombre d'installations fonctionnant sur la nappe phréatique, l'interaction d'un ouvrage sur l'autre devient un facteur limitant pour le développement des installations individuelles. Actuellement, la réinfiltration des eaux pompées dans le terrain de la nappe doit être exigée (OFEV, 2009), avec pour objectif justifié de préserver le stock d'eau souterraine et d'éviter les atteintes notamment aux ouvrages de captage d'eau potable. La grande majorité des installations d'exploitation thermique d'une nappe phréatique réalisées à ce jour ont leur rejet dans les canalisations d'eaux claires ou dans les eaux de surface. Cela ne porte actuellement pas à conséquence au vu du faible nombre d'installations.

L'exigence générale de réinfiltrer les eaux dans la nappe après leur utilisation thermique aura pour conséquences des modifications locales de la température de la nappe et la nécessité de prendre en compte l'interaction thermique d'une installation de rejet sur une concession voisine.

4.2.3 Bases pour le calcul du potentiel

Dans le projet PGN (2008), il a été confirmé que la puissance exploitable dans une nappe phréatique dépend principalement de trois paramètres : la perméabilité des terrains, l'épaisseur de la nappe et le gradient hydraulique. Ces valeurs déterminent non seulement le débit exploitable dans un ouvrage donné, mais surtout une emprise thermique théorique d'une installation de captage avec rejet dans la nappe. La surface et les dimensions de l'emprise thermique ont été calculées au moyen du logiciel GED (Colenco, 2006) et les résultats fournis au Tableau 4.1. Le calcul du potentiel des nappes s'appuie sur ces résultats dont les éléments principaux sont résumés ci-dessous :

- La surface d'emprise thermique après 30 ans d'exploitation est de très faible extension pour une nappe de grande épaisseur, de grande perméabilité et avec un gradient hydraulique, ou vitesses d'écoulement, élevé. Le panache thermique aura une très faible extension latérale et s'étendra vers l'aval jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Pour les nappes de faible épaisseur, l'emprise thermique est plus grande car l'extension du panache thermique vers l'aval peut théoriquement atteindre plusieurs kilomètres.

- La surface d'emprise thermique après 30 ans d'exploitation est de taille plus importante pour une nappe de faible épaisseur, de perméabilité moyenne et avec un gradient hydraulique, ou vitesses d'écoulement, moyen à faible. Le panache thermique aura une grande extension latérale et s'étendra jusqu'à plusieurs centaines de mètres vers l'aval.
- Pour les secteurs de nappe peu perméable ($K \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), la faible perméabilité des terrains constitue le facteur limitant et ne permet plus de pomper ni d'infiltrer le débit nécessaire pour une exploitation thermique.
- Pour une installation de puissance donnée et dans des conditions cadre bien définies, il est alors possible de calculer une puissance exploitable unitaire en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ en fonction de l'emprise thermique après 30 ans d'exploitation. Cette puissance unitaire pourra être ensuite appliquée dans chaque nappe ou secteur de nappe ayant des caractéristiques hydrauliques équivalentes.

Tableau 4.1. Surface d'emprise thermique après 30 ans d'une installation d'exploitation de la chaleur de la nappe phréatique. Calcul au moyen du modèle GED en fonction de la perméabilité, de l'épaisseur et du gradient hydraulique de l'aquifère.

P (kW)	Epaisseur (m)	Nb	D P-I (m)	D P-P (m)	DLong (m)	DLat (m)	Surface (m²)	P_u=P/S (W·m⁻²)
Perméabilité de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique $\sim 1'350 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$								
40	5	1	15	-	520	15	7'800	5.13
Perméabilité de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique $\sim 2'700 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$								
40	5	1	15	-	850	15	12'750	3.13
Perméabilité de $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique $\sim 300 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$								
40	5	2	20	10	5000	40	200'000	0.20
	10	1	20	-	1200	20	24'000	2.08
	15	1	20	-	500	15	7500	5.33
Perméabilité de $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique $\sim 600 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$								
40	5	1	20	-	2100	20	42'000	0.95
	10	1	20	-	490	11	5'390	7.42
	15	1	20	-	115	6	690	57.98
Perméabilité de $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique $\sim 30 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$								
40	5	5	100	75	950	410	389'500	0.10
	10	4	50	30	1000	170	170'000	0.23
	15	3	50	25	950	120	114'000	0.35
Perméabilité de $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique $\sim 60 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$								
40	5	8	50	25	2000	170	340'000	0.12
	10	3	50	25	1800	100	180'000	0.22
	15	2	50	25	1600	65	104'000	0.38
Perméabilité de $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique $\sim 5 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$								
40	5							
	10							
	15	5	100	75	230	460	105'800	0.38

Perméabilité de $1 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique $\sim 10 \text{ m} \cdot \text{an}^{-1}$								
40	5							
	10							
	15	5	50	75	250	410	102'500	0.39

- P** : puissance à l'évaporateur de la PAC prélevée à la nappe souterraine [kW]
Epaisseur : épaisseur de l'aquifère [m]
Nb : nombre de doublets nécessaires pour fournir le débit demandé
D P – I : distance nécessaire entre le puits de pompage et le puits de réinjection [m]
D P – P : distance nécessaire entre deux doubles [m]
D_{Long} : distance longitudinale d'influence thermique de l'installation après 30 ans [m]
D_{Lat} : distance latérale d'influence thermique de l'installation après 30 ans [m]
Surface : surface d'influence thermique de l'installation après 30 ans [m]
Pu : puissance unitaire exploitable sur l'ensemble d'un secteur de nappe [W/m^2]
En grisé : exploitation non réalisable car refroidissement de la nappe et nombre d'ouvrages trop important

Les résultats du Tableau 4.1 ont été obtenus avec les conditions cadre exposées ci-dessous :

- Installation de production de chaleur d'une puissance donnée de $50 \text{ kW}_{\text{th}}$, coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur (PAC) de 5, soit 40 kW de puissance extraite dans la nappe; durée de fonctionnement : $1'800 \text{ h} \cdot \text{an}^{-1}$ avec un débit de $143 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ et un ΔT de $4 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Débit rejeté à l'aval des écoulements souterrains à une distance suffisante pour éviter les phénomènes de recyclage thermique (temps de perçement thermique trop faible).

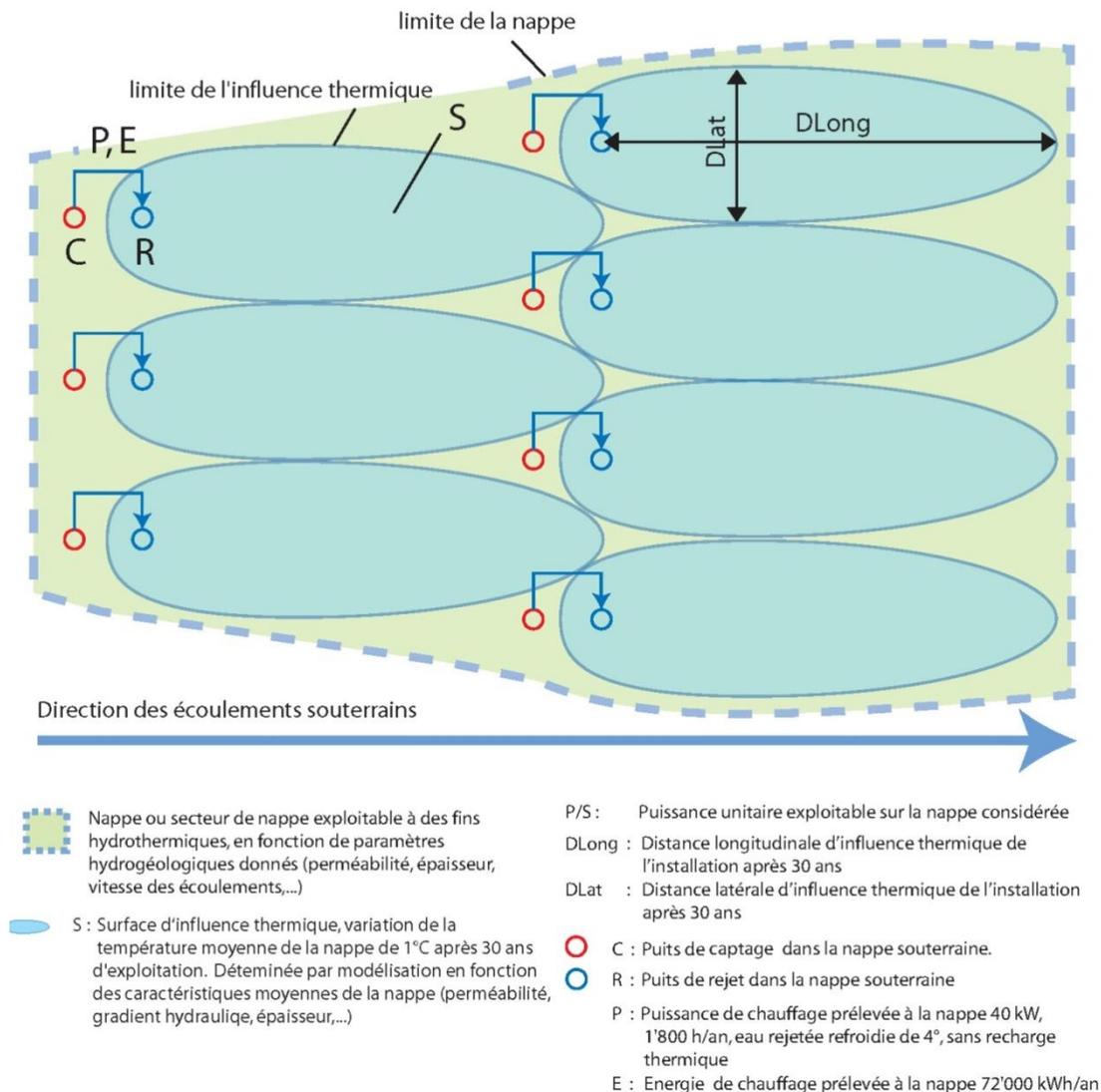


Figure 4.1. Méthode de calcul du potentiel d'exploitation de chaleur de la nappe phréatique par modélisation de la surface d'influence thermique après 30 ans d'exploitation au moyen du logiciel GED.

En principe, la surface de l'emprise thermique varie avec la puissance de l'installation de façon non linéaire. Ainsi, en théorie, la puissance unitaire exploitable par unité de surface est inférieure dans le cas de grandes installations (PGN, 2008). En réalité, il faut tenir compte de l'efficacité accrue des grandes installations et la diminution des risques d'influences thermiques mutuelles. Pour s'affranchir de telles considérations, nous avons considéré, pour notre calcul, une installation de puissance faible à moyenne avec un prélèvement de 40 kW dans la nappe.

Les limites de l'influence thermique sont fixées à un refroidissement, respectivement réchauffement, de la nappe $\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport à son état naturel après 30 ans d'exploitation (Figure 4.1).

L'impact thermique du rejet doit répondre aux exigences légales (OEaux, Annexe 4.2). La modification de la température de la nappe par rapport à son état naturel doit être inférieure à $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, au-delà d'un rayon de 100 m à partir du point de rejet. Aux abords immédiats du puits, le refroidissement/réchauffement peut être plus important. Afin de répondre à cette exigence, notamment dans les terrains moyennement perméables, le nombre de doublets de puits nécessaires pour fournir la puissance demandée a été parfois augmenté.

La simulation est réalisée dans un cadre très général, pour un milieu homogène et uniforme. Elle ne tient pas compte des conditions aux limites de l'aquifère, comme les phénomènes de recharge latérale, par les précipitations ou par les cours d'eau.

La simulation pour le calcul du potentiel unitaire est réalisée pour l'exploitation de la chaleur en hiver seulement. Elle ne tient pas compte des possibilités de recharge saisonnière et de gestion équilibrée de la chaleur et du froid de la nappe qui peuvent permettre d'augmenter considérablement, voire de multiplier, l'énergie exploitable durant la période de chauffage.

L'exploitation de la nappe pour la production de froid doit naturellement être considérée. Cependant, comme la réponse du milieu à un rejet de chaleur (sans recharge) est identique à un rejet de froid (sans recharge), nous n'avons pas effectué de simulations particulières en cas de production de froid, mais considéré que l'énergie exploitable pour la production de froid ou de chaleur est égale.

4.2.4 Approche choisie

L'approche retenue pour l'estimation du potentiel des nappes phréatiques comprend les étapes suivantes :

Localisation de la ressource.

Définition des secteurs favorables à l'implantation de captages hydrothermiques sur la base de la carte des secteurs où l'exploitation de la nappe peut être envisagée (PGN, 2008). Subdivision des nappes en unités à caractéristiques équivalentes.

Evaluation du potentiel de la ressource.

Calcul de l'énergie thermique exploitable dans les secteurs favorables en utilisant les résultats donnés au Tableau 4.1, soit la puissance unitaire exploitable par unité de surface de nappe. Application de facteurs correctifs en cas de conditions limites particulières, de chimie des eaux peu adéquates, et application de méthodes complémentaires en fonction des informations disponibles (c.f. 4.2.5). Au final, la méthode appliquée donne des résultats devant être considérés comme conservatifs. Il ne s'agit pas de calculer simplement l'énergie qui peut être fournie par la nappe, mais bien d'estimer la quantité de chaleur qui peut être prélevée et rejetée dans la nappe sans modifier son équilibre à long terme et ce, avec une approche très conservative.

Evaluation de la demande.

La demande en énergie de chauffage sur la surface du canton a été établie grâce à la carte de densité de volume construit en $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (voir chapitre APR). En considérant un volume construit de $70'767'500 \text{ m}^3$ et une consommation moyenne de $30 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{an}^{-1}$, la demande en énergie de chauffage est estimée à $2'123 \text{ GWh}_{\text{th}} \cdot \text{an}^{-1}$. Pour chaque nappe, une évaluation des besoins de chauffage à moins de 100 m de la ressource (utilisateurs potentiels) est réalisée. En ce qui concerne la demande de froid, aucune estimation n'a été donnée, à l'exception des besoins reconnus en Ville de Neuchâtel pour la nappe du Seyon (BMIC SA, 2009).

Confrontation des besoins avec la ressource disponible.

Par recoupement des utilisateurs potentiels avec la ressource disponible, on a pu évaluer dans quelle mesure la ressource peut être valorisée in situ, en principe sans adduction sur de grandes distances.

Potentiel exploitable.

Le potentiel exploitable a été déterminé sur l'ensemble du canton et pour chaque commune concernée par l'exploitation des nappes phréatiques. Comme le potentiel réel dépendra pour beaucoup de la gestion de l'exploitation (répartition spatiale des concessions et mode d'exploitation, recharge thermique saisonnière, etc.), des recommandations particulières sont formulées pour chaque commune.

4.2.5 Limites de la méthode et cas particuliers

Le degré de précision du calcul du potentiel thermique des nappes phréatiques dépend essentiellement de la connaissance des écoulements souterrains, des paramètres de l'aquifère et des conditions aux limites de ce dernier. Les informations disponibles sont très variables d'une nappe à l'autre avec, pour conséquence, l'application de méthodes diverses, parfois grossières pour le calcul du potentiel thermique.

Certains cas particuliers ont nécessité l'utilisation de méthodes complémentaires différentes des bases de la méthode exposée au point 4.2.3. Ils sont présentés de manière non exhaustive ci-après.

L'extension vers l'aval du panache thermique a été jugée irréaliste, notamment lorsque des cours d'eau s'infiltrent dans la nappe ou drainent les eaux souterraines. Nous avons considéré que le potentiel d'exploitation était supérieur aux valeurs fournies par le Tableau 4.1.

Pour les systèmes aquifères disposés perpendiculairement aux écoulements d'eau souterraine (cas des nappes périlacustres) et lorsque les vitesses sont moyennes à élevées, la méthode est peu réaliste, car elle ne tient pas compte du fait que l'influence du panache thermique vers aval n'a que peu d'importance. Dans ce cas, le calcul de l'énergie exploitable a été corrigé au cas par cas par des méthodes complémentaires (calcul du flux de chaleur, calcul volumétrique).

Dans les cas où les informations étaient lacunaires, ou la méthode du calcul GED jugée inadaptée, les valeurs de potentiel ont été ajustées au cas par cas par :

- Calcul du flux d'eau souterraine au travers d'une section de nappe donnée et calcul de la puissance correspondante avec un refroidissement de 3 °C par la PAC.
- Dans le cas de nappes où les vitesses d'écoulement sont très mal connues (p.ex. nappe du Seyon) : calcul de l'énergie délivrée pour un refroidissement donné de l'ensemble du volume aquifère (calcul volumétrique simple).

Pour les nappes perméables mais à faibles vitesses d'écoulement, les résultats fournis par le Tableau 4.1 sont trop conservatifs. Dans ces secteurs en particulier, il ne faut pas oublier pas que la recharge thermique saisonnière est alors très efficace et qu'il est possible d'extraire des puissances bien supérieures à celles prédites par le modèle.

Dans le cas où la chimie des eaux souterraines n'a pas été jugée adéquate sur la base d'informations avérées (eaux peu oxygénées, chargées en fer et manganèse dissous), le potentiel exploitable a été considéré comme nul (p.ex. zone industrielle à l'est de Fleurier). Lorsque qu'il ne s'agissait que de doutes ou que l'extension des secteurs problématiques n'était pas définie, le potentiel exploitable a été réduit de moitié.

4.3 Calcul du potentiel théorique exploitable des nappes phréatiques du canton de Neuchâtel

4.3.1 Principe

Les nappes phréatiques potentiellement exploitables à des fins thermiques ont été délimitées dans le programme PGN (2008). Dans ce chapitre, l'analyse du potentiel de chacune des nappes phréatiques du canton a été effectuée, en tenant compte des unités hydrogéologiques et en commençant par l'ouest du canton. Un calcul et une analyse détaillée du potentiel sont effectués pour les nappes les plus représentatives. Dans la mesure du possible, le regroupement de l'analyse du potentiel de la ressource par commune est réalisé; cela n'est malheureusement pas toujours faisable.

Pour les ressources de moindre importance en termes de potentiel, le calcul du potentiel n'est pas détaillé et le résultat présenté plus sommairement. Le point 4.4 contient cependant un récapitulatif des potentiels calculés pour chaque commune du canton.

L'extension et le potentiel des nappes exploitables à des fins thermiques sont représentés sur la carte fournie en annexe 4.2 et sous format numérique. Les nappes et secteurs de nappes sont classés par potentiel unitaire d'exploitation pour la production de chaleur, en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge thermique. Pour chaque nappe, dans l'ordre des chapitres suivants, une figure détaillée est fournie avec le potentiel unitaire exploitable par secteur de nappe.

4.3.2 Nappe de Fleurier

Généralités

La nappe phréatique de Fleurier comprend les nappes des Cornées et de la Binrée. Elle est constituée de dépôts alluviaux graveleux et sableux déposés par le Buttes et l'Areuse. Ces sédiments de bonne perméabilité (2 à $5 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$) reposent sur des limons lacustres imperméables et contiennent une nappe libre de 3 à 6 m d'épaisseur. Localement, les graviers peuvent atteindre une épaisseur supérieure à 15 m.

L'aquifère est alimenté par les précipitations, mais surtout par les versants calcaires. Les infiltrations de l'Areuse en hautes eaux constituent une faible part de l'alimentation de la nappe. Les eaux s'écoulent vers l'est (Boveresse) avec des vitesses de plusieurs kilomètres par an. Le front est de la nappe est exploité pour la production d'eau potable par les puits de captages communaux de Fleurier et de Boveresse (Figure 4.2).

Méthode utilisée pour le calcul du potentiel théorique

Les caractéristiques générales de la nappe (géométrie, épaisseur, perméabilité, vitesse des écoulements, qualité des eaux) sont relativement bien connues sur la base de quelques sondages de reconnaissance et puits de captage existants. Il subsiste toutefois des incertitudes sur les écoulements souterrains et sur les mécanismes d'alimentation par les flancs calcaires.

Le potentiel théorique minimal (production de chaleur uniquement) a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≤ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1). Les ordres de grandeur ont été validés par comparaison avec la méthode du flux.

En cas de production équilibrée de chaleur et de froid (recharge thermique saisonnière), l'énergie exploitable est estimée au moins comme le double de l'énergie exploitable sans recharge. Calcul

simplifié de la surface de l'influence thermique saisonnière (après 4 mois d'exploitation) au moyen du logiciel GED et de la vitesse du front thermique.

Caractéristiques de la nappe

Les caractéristiques de la nappe de Fleurier sont résumées sur le tableau suivant :

Tableau 4.2. Caractéristiques générales de la nappe de Fleurier et liste des paramètres hydrauliques représentatifs utilisés notamment pour le calcul du potentiel théorique.

NAPPE DE FLEURIER Commune de Val-de-Travers (Fleurier)				
Paramètres de la nappe				
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	1'014'600	m ²	
Altitude moyenne		742	m.s.m.	
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-5	M	
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	6-10	M	
Epaisseur de la nappe (zone saturée)	e	3-6	m	
Perméabilité	K	2-5·10 ⁻³	m·s ⁻¹	
Porosité efficace / coefficient d'emménagement	Φ	0.15	(-)	
Gradient hydraulique estimé	i	0.5-0.7	%	
Température de la nappe	moyenne	T _{moy}	8.6	°C
	minimale	T _{min}	7.0	°C
	maximale	T _{max}	14.0	°C
Vitesse estimée des écoulements souterrains	V	350-5'000	m·an ⁻¹	
Vitesse estimée du front thermique	V _{th}	70-1'000	m·an ⁻¹	

Potentiel d'exploitation théorique

Tableau 4.3. Potentiel d'exploitation théorique de la nappe de Fleurier.

NAPPE DE FLEURIER Commune de Val-de-Travers (Fleurier)			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Puissance unitaire exploitable moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	2.13	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	1'014'600	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	2.17	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	4.34	GWh _{th} ·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	5.42	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	4.34	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	8.68 - 25.70	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	10.85 - 32.12	GWh _{th} ·an ⁻¹

(1) Puissance soutirée à la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.

(2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.

(3) Production de froid par installation de type freecooling.

(4) Installation standard : somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

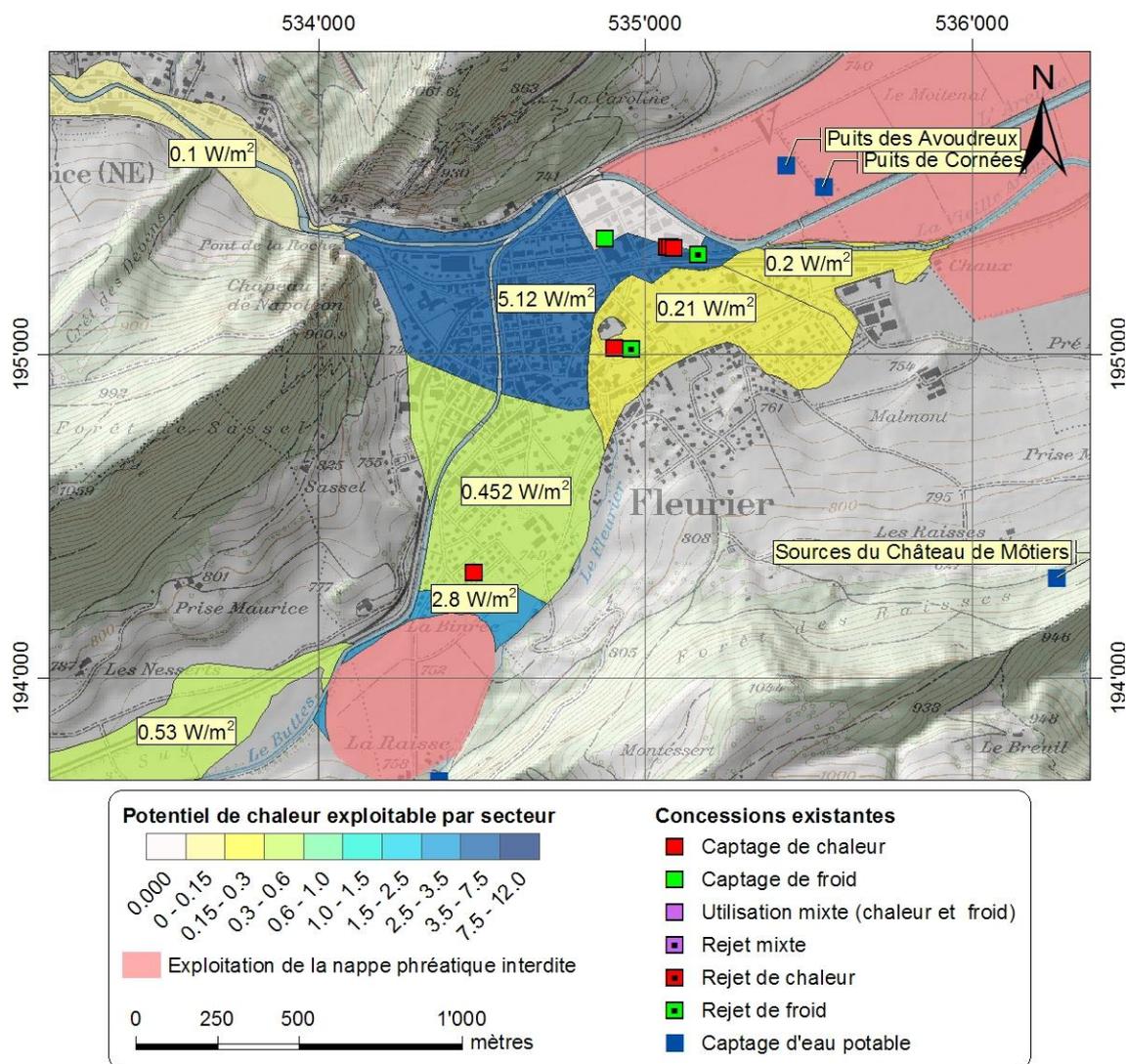


Figure 4.2. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Fleurier. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

La rapidité des écoulements souterrains dans les secteurs les plus perméables de la nappe de Fleurier a pour effet de renouveler l'eau de la nappe plusieurs fois par année (BMIC SA, 1994). Cependant, les vitesses d'écoulement élevées ont pour résultat d'étendre l'influence du panache thermique et de modifier la température de la matrice aquifère, en théorie jusqu'à plusieurs km vers l'aval après 30 ans. Latéralement, la largeur de l'influence thermique est réduite à quelques dizaines de mètres seulement. Le potentiel théorique est fortement influencé par l'extension aval du panache thermique, car cela représente des surfaces d'influence importantes. En réalité, l'extension du panache est limitée par mélange latéral, par la recharge des pluies et par les cours d'eau, ainsi que par la variation saisonnière de la direction des écoulements. Le calcul de la zone d'influence thermique aval donné par le modèle est donc plutôt pessimiste.

La chaleur soutirable à la nappe annuellement sans recharge thermique saisonnière est estimée à $4.34 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$ et permettrait de produire au moins $5.42 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$ d'énergie de chauffage au moyen de pompes à chaleur conventionnelles ($\text{COP} = 5$). La production potentielle de rafraîchissement par des systèmes freecooling est équivalente à l'énergie thermique exploitable, soit $4.34 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$.

Si la nappe est exploitée autant pour la production de chaleur que celle de froid, qu'elle est également exploitée de façon alternée et que le bilan thermique annuel est équilibré, c'est-à-dire que

le froid injecté en hiver équivaut à la chaleur réinjectée en été, le potentiel d'exploitation augmente considérablement. L'énergie exploitable avec production de chaleur et de froid équilibrée est au moins égale au double de la chaleur exploitable en hiver, soit 8.68 GWh·an⁻¹. En considérant qu'en cas de recharge thermique saisonnière l'exploitation de la nappe n'est limitée que par l'influence saisonnière d'une installation sur l'autre, on peut calculer que la chaleur exploitable est de 12.85 GWh·an⁻¹ soit le triple de la chaleur exploitable sans recharge saisonnière. Avec recharge thermique, l'énergie froide exploitable est également de 12.85 GWh·an⁻¹ et le total soutirable à la nappe de 25.7 GWh·an⁻¹.

Etat de l'exploitation en 2009

Tableau 4.4. Etat de l'exploitation thermique de la nappe de Fleurier en 2009.

NAPPE DE FLEURIER Commune de Val-de-Travers (Fleurier)					
Installations en fonction	Nb	Débit total exploité (débit de concession)	Energie totale exploitée, fournie par la nappe souterraine	Pourcentage de l'énergie exploitée par rapport au potentiel	Débit réinfiltré dans la nappe souterraine
		Q _{expl}	E _{expl}	E _{expl} /E _{tot} ·100	Q _{inf}
		l·min ⁻¹	MWh·an ⁻¹	%	l·min ⁻¹
Production de chaleur uniquement	3	378	250	5.7 ⁽¹⁾	340
Production de froid uniquement	1	500	100	2.3 ⁽¹⁾	0
TOTAL (2009)	4	878	350	4.0 ⁽²⁾	340

(1) Rapporté aux potentiels respectifs de chaleur ou de froid sans recharge saisonnière.

(2) Rapporté au potentiel total avec recharge saisonnière.

Le potentiel de la nappe de Fleurier est peu valorisé. En 2009, seulement deux installations implantées à l'Est de la gare de Fleurier sont recensées. Elles se situent en zone industrielle à l'aval de la nappe et produisent de la chaleur et du froid. Il y a également deux installations pour villa et petit immeuble dans le secteur amont de la nappe, qui alimentent des pompes à chaleur. La chaleur soutirée à la nappe est de 250 MWh·an⁻¹, soit le 5.7 % du potentiel de production de chaleur. L'énergie froide exploitée est de 100 MWh·an⁻¹, soit le 2.3 % du potentiel de production de froid.

Développement et gestion de l'exploitation

Tableau 4.5. Potentiel d'exploitation de la nappe de Fleurier et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DE FLEURIER Commune de Val-de-Travers (Fleurier)			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble de l'agglomération de Fleurier (2009)	$D_{th\ tot}$	48.00	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	44.50	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	5.42	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	11.20	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	12.20	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.31	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

Le potentiel d'exploitation de la nappe de Fleurier est élevé en raison de la qualité générale de la ressource et de son accessibilité. On relève en particulier que :

- Les conditions d'exploitation de la nappe sont favorables (faible profondeur de forages, chimie et température de la ressource adéquate).
- La demande totale en énergie de chauffage sur l'agglomération de Fleurier est estimée à 48 $GWh\cdot an^{-1}$. Une part importante de la demande potentielle de chaleur sur l'ensemble de la commune (92 %) est située à proximité immédiate de la ressource.

En principe, la totalité du potentiel thermique de la nappe pourrait être exploitée car la demande potentielle dépasse largement la ressource. A long terme, l'énergie totale exploitable dépendra fortement de l'efficacité avec laquelle on aura planifié l'exploitation de la nappe. Afin d'optimiser le potentiel exploitable de la nappe, on aura intérêt à :

- Favoriser, dans la mesure du possible, l'implantation d'installations « en ligne », perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe, car l'influence thermique d'une installation de rejet dans la nappe de Fleurier se fera principalement ressentir vers l'aval.
- Préférer en priorité l'implantation de grandes installations et/ou de réseau de distribution d'eau technique basse température vers des utilisateurs regroupés par quartiers et équipés de PAC individuelles. Ce mode d'exploitation permettra de mieux gérer les phénomènes d'influence entre ouvrages et d'optimiser le potentiel thermique de la nappe.
- Les secteurs suivants pourraient, par exemple, être envisagés pour l'implantation de grandes installations (Figure 4.2) :
 - « Longereuse », secteur Nord-Ouest de Fleurier vers l'école et la patinoire.
 - « Derrière la Gare », secteur au Nord de la gare, vers les immeubles d'habitation.
 - « La Binrée », secteur sud-ouest de Fleurier, vers les quartiers d'habitations et les nouvelles zones constructibles.

Il faut garder à l'esprit qu'une grande installation implantée à l'aval de la nappe (Nord et Est) aura un impact thermique restreint, car le panache thermique généré sera en partie atténué par l'influence de l'Areuse. Pour autant que l'impact thermique sur les captages communaux soit

admissible, ces derniers contribueront également à limiter l'extension du panache thermique vers l'aval, en direction de Boveresse.

En raison de la vitesse élevée des écoulements souterrains, le stockage thermique saisonnier sera peu efficace. En revanche, l'équilibre d'exploitation de chaleur et de froid sur l'ensemble de la nappe est intéressant, car il permettrait de stabiliser la température de la nappe à long terme et d'améliorer le potentiel d'exploitation.

Limitations du potentiel d'exploitation

La présence des captages communaux à l'aval des écoulements de la nappe exige que une réinfiltration des eaux dans la nappe. En cas d'exploitation thermique intensive de la nappe de Fleurier, l'influence thermique sur les captages communaux situés à l'aval des écoulements souterrains doit être maîtrisée. La portion de nappe exploitée pour l'eau potable est séparée par l'Areuse et les exfiltrations de la nappe vers la rivière. Les infiltrations dans la nappe de l'Areuse en hautes eaux également ont probablement pour effet de limiter l'extension du refroidissement vers l'aval.

Bien que la qualité générale des eaux pompées soit bonne, elle peut être altérée par la présence de sites pollués, notamment dans le secteur de la zone industrielle aval au lieu dit « entre-deux-rivières » et plus à l'est dans le secteur « Clos Donzel ». Dans ces secteurs, le potentiel d'exploitation a été considéré comme nul en raison de la mauvaise qualité de l'eau.

Même en présence de terrains perméables, la présence de terrains fins (limons) dans certains secteurs de la nappe peut parfois limiter le débit exploitable par ouvrage et peut nécessiter d'augmenter le nombre de puits de captage requis.

Etude complémentaire recommandée

Compte tenu de l'importance de la ressource thermique potentielle, il serait très utile d'établir un modèle numérique des écoulements souterrains avec possibilité de prévoir l'évolution de la température de la nappe avec l'objectif de gérer de façon intégrée la ressource thermique.

4.3.3 Nappes du Haut Val-de-Travers (Buttes et St-Sulpice)

Généralités

Les nappes phréatiques de Buttes (nappe des Sugits amont et secteur amont), ainsi que la nappe de St-Sulpice sont constituées de graviers alluviaux de faible épaisseur et de faible extension latérale. La ressource est très mal connue et ne représente probablement qu'un faible potentiel d'exploitation thermique.

A Buttes, le potentiel le plus intéressant est dans la région dite des « Sugits » (Figure 4.3 haut), où l'on trouve une épaisseur d'alluvions graveleuses estimée à 4 m en moyenne. Il s'agit principalement de chenaux de graviers distribués irrégulièrement dans des sables moyens à fins. Plus haut, vers l'amont, les graviers se font plus rares et atteignent une épaisseur maximale de 2 m.

A St-Sulpice, on dispose de très peu d'informations sur le sous-sol. Quelques rares forages indiquent la présence d'une nappe de très faible épaisseur (max. 2 m) (Figure 4.3 bas).

Méthode utilisée pour le calcul du potentiel théorique

Les caractéristiques des nappes et leur extension exacte sont très mal connues (géométrie, épaisseur, perméabilité) et le potentiel calculé comporte une part d'incertitude importante. La particularité de ces deux nappes est qu'il existe une possibilité d'alimentation très locale des alluvions par des sources latérales ou par les infiltrations du Buttes ou de l'Areuse, ce qui pourrait localement accroître le potentiel.

Le potentiel théorique minimal (production de chaleur uniquement) a été calculé au moyen du logiciel GED (Tableau 4.1), par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≥ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents. La nappe a été subdivisée en unités à caractéristiques équivalentes, afin d'effectuer une modélisation différenciée. La validation des résultats s'est effectuée en comparant les résultats avec les ordres de grandeur donnés par le calcul du débit de la nappe sur une section représentative.

En cas de production équilibrée de chaleur et de froid (recharge thermique saisonnière), l'énergie exploitable est estimée au moins au double de l'énergie exploitable sans recharge.

Caractéristiques des nappes

Les caractéristiques des nappes du haut Val-de-Travers sont résumées dans le Tableau 4.6 :

Tableau 4.6. Caractéristiques générales des nappes du haut Val-de-Travers et liste des paramètres hydrauliques représentatifs utilisés notamment pour le calcul du potentiel théorique.

NAPPES DU HAUT VAL-DE-TRAVERS Commune de Val-de-Travers (Buttes et St-Sulpice)			
Paramètres de la nappe de Buttes			
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	522'770	m ²
Altitude moyenne		770	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-2	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	Inconnue- variable	
Epaisseur de la nappe (zone saturée)	e	2-4	m
Perméabilité	K	5·10 ⁻⁵ à 5·10 ⁻⁴	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement	Φ	Estimé à 0.15	(-)
Gradient hydraulique moyen	i	1	%
Paramètres de la nappe de St-Sulpice			
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	156'285	m ²
Altitude moyenne		750	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-2	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	Inconnue- variable	
Epaisseur de la nappe (zone saturée)	e	1-2	m
Perméabilité	K	5·10 ⁻⁴	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement	Φ	Estimé à 0.15	(-)
Gradient hydraulique moyen	i	0.8	%

Potentiel d'exploitation théorique

Tableau 4.7. Potentiel d'exploitation théorique des nappes du haut Val-de-Travers.

NAPPES DU HAUT VAL-DE-TRAVERS Commune de Val-de-Travers (Buttes et St-Sulpice)			
Nappe de Buttes			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	0.29	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	522'770	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	0.154	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	0.308	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	0.385	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	0.308	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 0.616	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 0.693	GWh _{th} ·an ⁻¹
Nappe de St-Sulpice			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	0.10	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	156'285	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	0.016	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	0.031	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	0.039	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	0.031	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 0.062	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 0.070	GWh _{th} ·an ⁻¹

(1) Puissance soutirée à la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.

(2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.

(3) Production de froid par installation de type freecooling.

(4) Installation standard. Somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

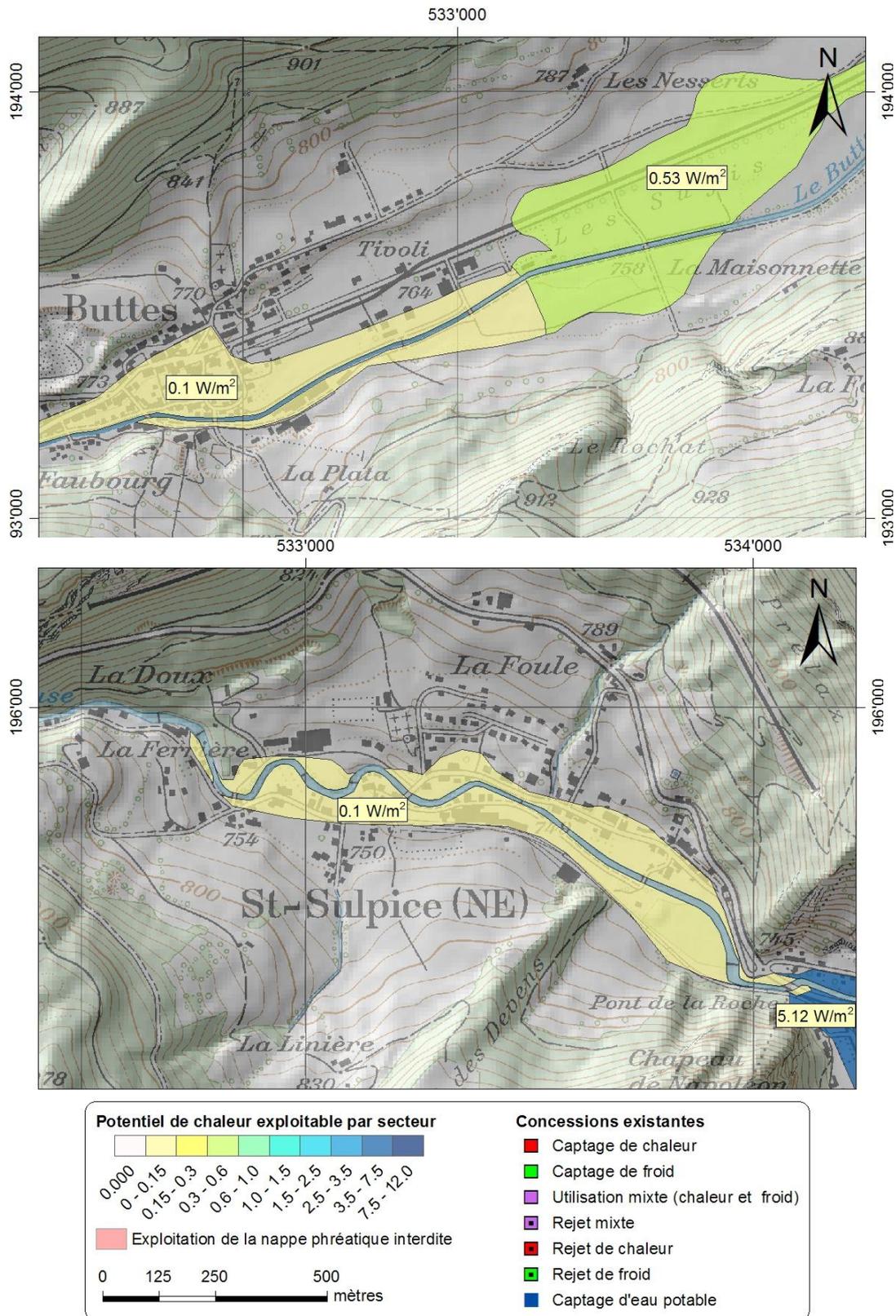


Figure 4.3. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Buttes (haut) et de St-Sulpice (bas). Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

Le potentiel d'exploitation théorique des nappes du haut Val-de-Travers est faible, notamment en raison de la très faible épaisseur des nappes et de la mauvaise perméabilité présumée des terrains.

Au total, l'exploitation des nappes devrait permettre de produire 0.42 GWh_{th} de chaleur, principalement dans le secteur des Sugits.

Etat de l'exploitation en 2009

Aucune installation thermique exploitant les nappes de Buttes et de St-Sulpice n'est recensée en 2009.

Développement et gestion de l'exploitation

Tableau 4.8. Potentiel d'exploitation des nappes du haut Val-de-Travers et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPES DU HAUT VAL-DE-TRAVERS Commune de Val-de-Travers (Buttes et St-Sulpice)			
Nappe de Buttes			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble du village de Buttes (2009)	$D_{th\ tot}$	13.16	GWh _{th} •an ⁻¹
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	7.61	GWh _{th} •an ⁻¹
Production potentielle de chaleur	$E_{th,tot}$	0.385	GWh _{th} •an ⁻¹
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	2.9	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	5.06	%
Besoins en chaleurs déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.00	GWh _{th} •an ⁻¹
Nappe de St-Sulpice			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble du village de St-Sulpice (2009)	$D_{th\ tot}$	12.38	GWh _{th} •an ⁻¹
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	7.59	GWh _{th} •an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	0.039	GWh _{th} •an ⁻¹
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.31	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	0.51	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.00	GWh _{th} •an ⁻¹

Le potentiel d'exploitation des nappes du haut Val-de-Travers est faible et permettrait, selon cette estimation, de couvrir au total 2.7 % de la demande de chaleur. On relève que :

- A St-Sulpice, le potentiel est négligeable et probablement très local. Ce potentiel ne pourra vraisemblablement être valorisé que pour de très petits utilisateurs.

- Le meilleur potentiel se situe à l'aval du village de Buttes, dans la nappe des Sugits amont, actuellement en zone agricole avec dézonage partiel en zone industrielle (en cours). Dans ce secteur, l'alimentation en chaud et froid des industries qui vont s'y implanter peut être envisagée; les puissances exploitables seront toutefois limitées. Cependant, à condition de trouver un débit suffisant, l'utilisation du froid en été devrait permettre d'augmenter les possibilités d'exploitation de la nappe.
- Dans le village de Buttes, le potentiel est faible.
- En raison des faibles vitesses d'écoulement, la recharge thermique saisonnière dans les secteurs perméables doit être considérée au moment de l'attribution des concessions.
- Comme la ressource est distribuée longitudinalement, dans l'axe des vallées, l'influence thermique d'une installation sur l'autre est difficile à éviter. Le regroupement des installations ou du moins le système de rejet à l'aval des utilisateurs, devrait être favorisé.
- En cas de découverte d'un potentiel intéressant et de la présence d'utilisateurs distribués dans l'axe, de l'amont vers l'aval, le rejet dans les eaux de surface pourrait être autorisé de manière exceptionnelle, afin de limiter les influences vers l'aval et d'augmenter le nombre d'utilisateurs.

4.3.4 Nappes de Môtiers et de Boveresse

Généralités

La nappe de Môtiers est constituée de graviers aquifères déposés par le Bied de Môtiers et constitue le sous-sol du village de Môtiers, au Sud de la Vieille Areuse (Figure 4.4). Dans l'axe du village, l'épaisseur de la nappe atteint 7 à 10 m et l'eau souterraine est exploitée pour la production d'eau potable au puits des Comblémines.

Vers le Nord-Ouest, la nappe de Boveresse représente la partie terminale de la nappe des Cornées. Dans les secteurs exploitables, l'épaisseur des graviers perméables atteint une dizaine de mètres. Vers l'Est de Boveresse, l'épaisseur des graviers se réduit et les eaux souterraines rejoignent la surface (zone d'exutoire) pour être évacuées par des drainages. Au sud-ouest du territoire de Boveresse, une surface importante de la nappe est exploitée pour la production d'eau potable.

Méthode utilisée pour le calcul du potentiel théorique

Les caractéristiques générales de la nappe (géométrie, épaisseur, perméabilité) sont relativement bien connues grâce aux puits de captage thermiques et d'eau potable existants.

Pour le secteur de la nappe de Boveresse situé entre la Vieille Areuse et l'Areuse, le potentiel théorique est estimé sur la base du fonctionnement d'installations existantes (usine ETEL SA, BMIC SA, 2009). A cet endroit, l'extension vers l'aval de l'influence thermique est atténuée par les infiltrations et l'effet drainant des cours d'eau.

Ailleurs, le potentiel théorique minimal (production de chaleur uniquement) a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≥ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1).

En cas de production équilibrée de chaleur et de froid (recharge thermique saisonnière), l'énergie exploitable est estimée au moins au double de l'énergie exploitable sans recharge.

Caractéristiques des nappes

Les caractéristiques des nappes de Môtiers et de Boveresse sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.9. Caractéristiques générales des nappes de Môtiers et de Boveresse et liste des paramètres hydrauliques représentatifs utilisés notamment pour le calcul du potentiel théorique.

NAPPES DE MÔTIERS ET BOVERESSE Commune de Val-de-Travers (Môtiers et Boveresse)			
Paramètres de la nappe de Môtiers			
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	371'638	m ²
Altitude moyenne		740	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-3	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	3-11	
Épaisseur de la nappe (zone saturée)	e	2-10	m
Perméabilité	K	1·10 ⁻³ à 5·10 ⁻³	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement	Φ	Estimé à 0.15	(-)
Gradient hydraulique estimé	i	0.7-1.0	%
Paramètres de la nappe de Boveresse			
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	372'867	m ²
Altitude moyenne		735	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-2	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	Inconnue- variable	
Épaisseur de la nappe (zone saturée)	e	1-4	M
Perméabilité	K	1·10 ⁻³	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement	Φ	Estimé à 0.15	(-)
Gradient hydraulique moyen	i	0.25	%

Potentiel d'exploitation théorique

Dans les secteurs à fort gradient (Môtiers), l'eau de la nappe est renouvelée fréquemment. La rapidité des écoulements souterrains a pour effet d'étendre l'influence du panache thermique et de modifier la température de l'aquifère, en théorie jusqu'à plusieurs km vers l'aval après 30 ans d'exploitation. Latéralement, la largeur de l'influence thermique est réduite à quelques dizaines de mètres seulement. Dans la plaine, les vitesses d'écoulement sont plus faibles en raison du faible gradient hydraulique et l'influence du panache thermique se fait sentir plus localement. Toutefois, les infiltrations et exfiltrations vers les cours d'eau (Bied de Môtiers, Vieille Areuse et Areuse) ont un effet plutôt favorable et confinent l'influence thermique.

Le potentiel total des nappes de Môtiers et de Boveresse est élevé. Au total, l'exploitation des nappes devrait permettre de produire 4.69 GWh_{th} de chaleur.

Tableau 4.10. Potentiel d'exploitation théorique des nappes de Môtiers et de Boveresse

NAPPES DE MÔTIERS ET BOVERESSE Commune de Val-de-Travers (Môtiers et Boveresse)			
Nappe de Môtiers			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	2.88	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	371'638	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	1.07	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	2.14	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	2.67	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	2.14	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 4.28	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 4.81	GWh _{th} ·an ⁻¹
Nappe de Boveresse			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	2.16	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	372'867	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	0.81	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	1.61	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	2.02	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	1.61	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 3.22	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 3.63	GWh _{th} ·an ⁻¹

(1) Puissance soutirée à la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.

(2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.

(3) Production de froid par installation de type freecooling.

(4) Installation standard. Somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

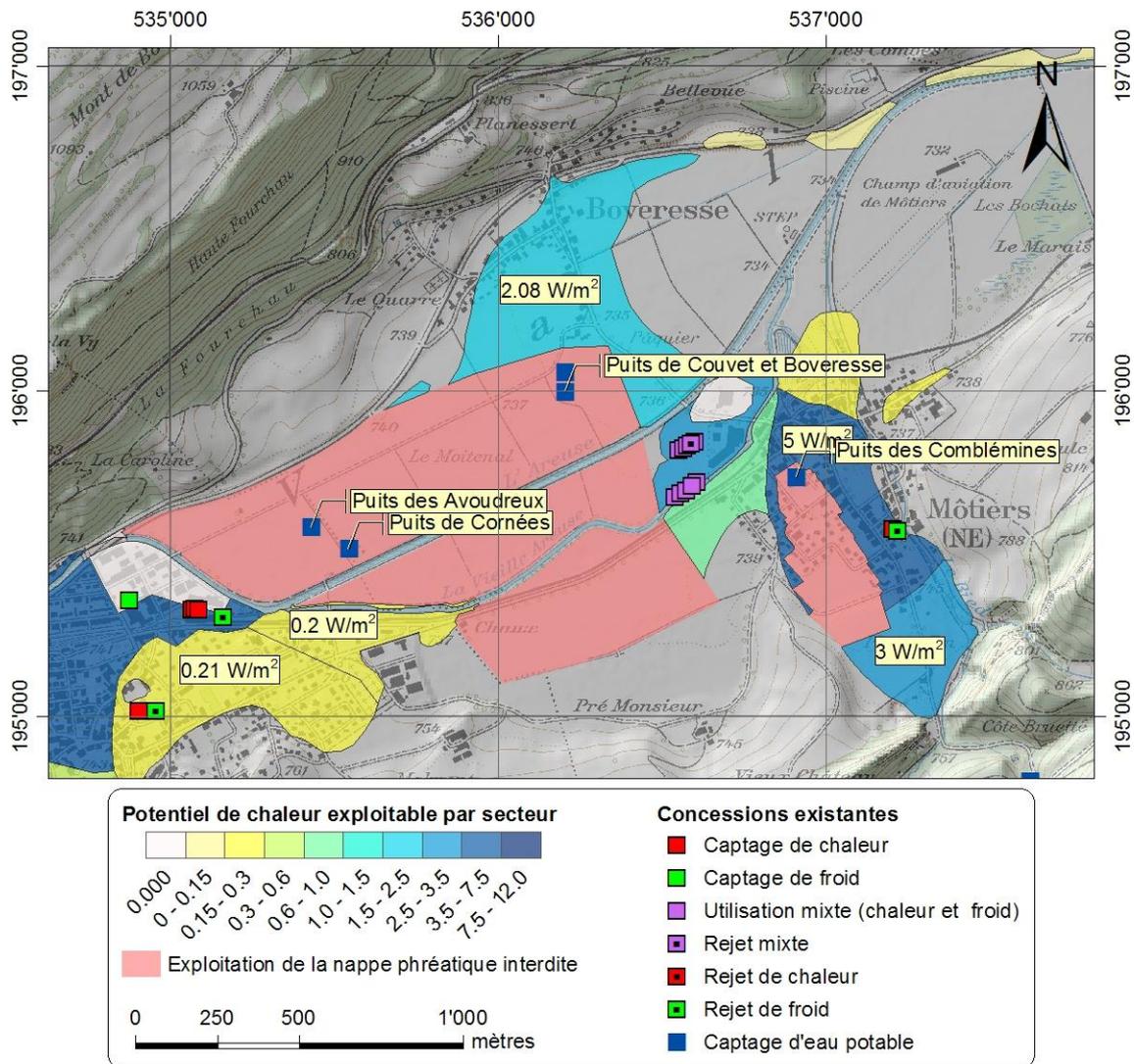


Figure 4.4. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Môtiers et de Boveresse. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

Etat de l'exploitation en 2009

Tableau 4.11. Etat de l'exploitation thermique de la nappe de Môtiers et de Boveresse en 2009.

NAPPES DE MÔTIERS ET BOVERESSE Commune de Val-de-Travers (Môtiers et Boveresse)					
Installations en fonction	Nb	Débit total exploité (débit de concession)	Energie totale exploitée, fournie par la nappe souterraine	Pourcentage de l'énergie exploitée par rapport au potentiel	Débit réinfiltré dans la nappe souterraine
		Q_{expl}	E_{expl}	$E_{expl}/E_{tot} \cdot 100$	Q_{inf}
		$l \cdot \text{min}^{-1}$	$\text{MWh} \cdot \text{an}^{-1}$	%	$l \cdot \text{min}^{-1}$
Nappe de Môtiers					
Production de chaleur uniquement	1	65	30	1.4 ⁽¹⁾	30
TOTAL (2009)	1	65	30	0.7 ⁽²⁾	30
Nappe de Boveresse					
Production de chaleur et de froid	1	500	chaud 230	14.3 ⁽¹⁾	500
			froid 105	6.5 ⁽¹⁾	
TOTAL (2009)	2	565	235	7.3 ⁽²⁾	340

(1) Rapporté aux potentiels respectifs de chaleur ou de froid sans recharge saisonnière

(2) Rapporté au potentiel total avec recharge saisonnière

En 2009, deux installations implantées dans les nappes de Môtiers (PAC pour immeuble) et de Boveresse (chauffage et rafraîchissement d'une industrie) sont recensées. L'énergie totale exploitée dans la nappe de Boveresse est de 265 $\text{MWh} \cdot \text{an}^{-1}$, soit 7.3 % de l'énergie thermique et frigorifique pouvant être soutirée à la nappe. L'exploitation de la nappe de Môtiers ne représente que 1.4 % des possibilités d'exploitation de chaleur.

Développement et gestion de l'exploitation

Tableau 4.12. Potentiel d'exploitation de la nappe de Môtiers et de Boveresse et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPES DE MÔTIERS ET BOVERESSE Commune de Val-de-Travers (Môtiers et Boveresse)			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des villages de Môtiers et de Boveresse (2009)	$D_{th\ tot}$	22.3	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	17.2	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	4.7	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	21.1	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	27.2	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP/COP-1$	0.26	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

Comme la ressource est en partie partagée par les villages de Môtiers et de Boveresse, le calcul de la couverture des besoins potentiels a été effectué conjointement pour les deux nappes et les deux agglomérations. La confrontation des besoins avec la ressource indique que :

- Une part importante (77 %) de la demande en énergie de chauffage est située à moins de 100 m de la ressource.
- Sans recharge thermique, l'exploitation de la nappe avec pompe à chaleur permettrait de répondre aux besoins de 27.2 % de la demande thermique, soit 4.7 $GWh_{th}\cdot an^{-1}$.
- Les conditions d'exploitation de la nappe sont favorables (faible profondeur de forages, chimie et température de la ressource adéquates).
- A Môtiers, afin d'optimiser le potentiel et d'éviter les interactions (utilisateurs disposés en long, dans le sens des écoulements souterrains), on aura intérêt à regrouper les installations et créer un réseau de distribution d'eau technique communal, avec captage dans un secteur favorable et distribution en circuit fermé vers des PAC individuelles.

Limitations du potentiel d'exploitation

Les contraintes connues limitant le potentiel d'exploitation sont :

- Aux environs de la pisciculture, le potentiel est plus limité en raison de la présence d'eau peu oxygénée et ferrugineuse.
- Les conséquences d'une influence thermique sur le captage des Comblémines sont à maîtriser. En principe, un rafraîchissement des eaux potables n'aurait pas d'effet néfaste.
- En raison des infiltrations de la nappe dans le Bied de Môtiers en basses eaux, un contrôle de l'influence sur la température du Bied de Môtiers à l'étiage est à prévoir.

4.3.5 Nappe de Couvet (Sucre et Bois-de-Croix)

Généralités

Le sous-sol de la région de Couvet est le siège d'écoulements souterrains, mais de potentiel limité. L'aquifère est constitué de graviers déposés par le delta du Sucre qui s'étend jusqu'à l'Areuse (Figure 4.5). Plus loin, les graviers ont été repris et déposés par l'Areuse pour former une nappe alluviale jusque dans le secteur du Bois-de-Croix, en aval de Couvet (territoire de Travers).

Les graviers du cône du Sucre ont une épaisseur de l'ordre de 2 m à la sortie des gorges du Sucre et atteignent un maximum de 15 m d'épaisseur à proximité de l'Areuse, où un ancien captage communal était implanté pour un débit de concession de 1000 l·min⁻¹. Les graviers du Sucre absorbent une grande partie des écoulements du ruisseau qui s'infiltrent dans ces derniers à la sortie des gorges.

Vers le Bois-de-Croix, la nappe est formée par le petit cône de déjection du Crozet et de la Combe Bayon. La nappe est exploitée en eau potable par le puits de Travers, est épaisse de 2 à 3 m et peut contenir des eaux incrustantes.

En parallèle aux alluvions superficielles, on recense des niveaux de moraine perméables dans les limons du Val-de-Travers à des profondeurs de 20 à 30 m, épais de quelques mètres. Ces niveaux sont irrégulièrement répartis et localisés notamment à l'aplomb du centre sportif.

Méthode utilisée pour le calcul du potentiel théorique

En raison de la complexité des systèmes aquifères, constitués parfois de niveaux perméables superposés de faible épaisseur, le calcul du potentiel comporte une grande part d'incertitude.

Le potentiel théorique minimal (production de chaleur uniquement) a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≥ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1). L'estimation est plutôt conservative, car la présence proche de l'Areuse a pour effet de limiter la dégradation thermique de la ressource en cas d'exploitation intensive.

En cas de production équilibrée de chaleur et de froid (recharge thermique saisonnière), l'énergie exploitable est estimée au moins au double de l'énergie exploitable sans recharge.

Caractéristiques des nappes

Les caractéristiques de la nappe de Couvet sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.13. Caractéristiques générales de la nappe de Couvet et liste des paramètres hydrauliques représentatifs utilisés notamment pour le calcul du potentiel théorique.

NAPPE DE COUVET Commune de Val-de-Travers (Couvet et Travers)			
Paramètres de la nappe			
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	1'031'515	m ²
Altitude moyenne		735	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-20	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	4-30	m
Épaisseur de la nappe (zone saturée)	e	2-5	m
Perméabilité	K	5·10 ⁻⁴ à 2·10 ⁻³	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement	Φ	Estimé à 0.15	(-)
Gradient hydraulique estimé	i	0.1-1.3	%

Potentiel d'exploitation théorique

La puissance exploitable sur l'ensemble de la nappe est détaillée dans le tableau suivant. En raison de la faible épaisseur de la nappe, la puissance exploitable est relativement modeste, avec un total de 0.49 MW_{th} (production de chaleur uniquement).

Tableau 4.14. Potentiel d'exploitation théorique de la nappe de Couvet.

NAPPE DE COUVET Commune de Val-de-Travers (Couvet et Travers)			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	0.44	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	1'031'515	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	0.46	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	0.92	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP - 1$	1.15	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	0.92	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 1.84	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 2.07	GWh _{th} ·an ⁻¹

(1) Puissance soutirée à la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.

(2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.

(3) Production de froid par installation de type freecooling.

(4) Installation standard. Somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

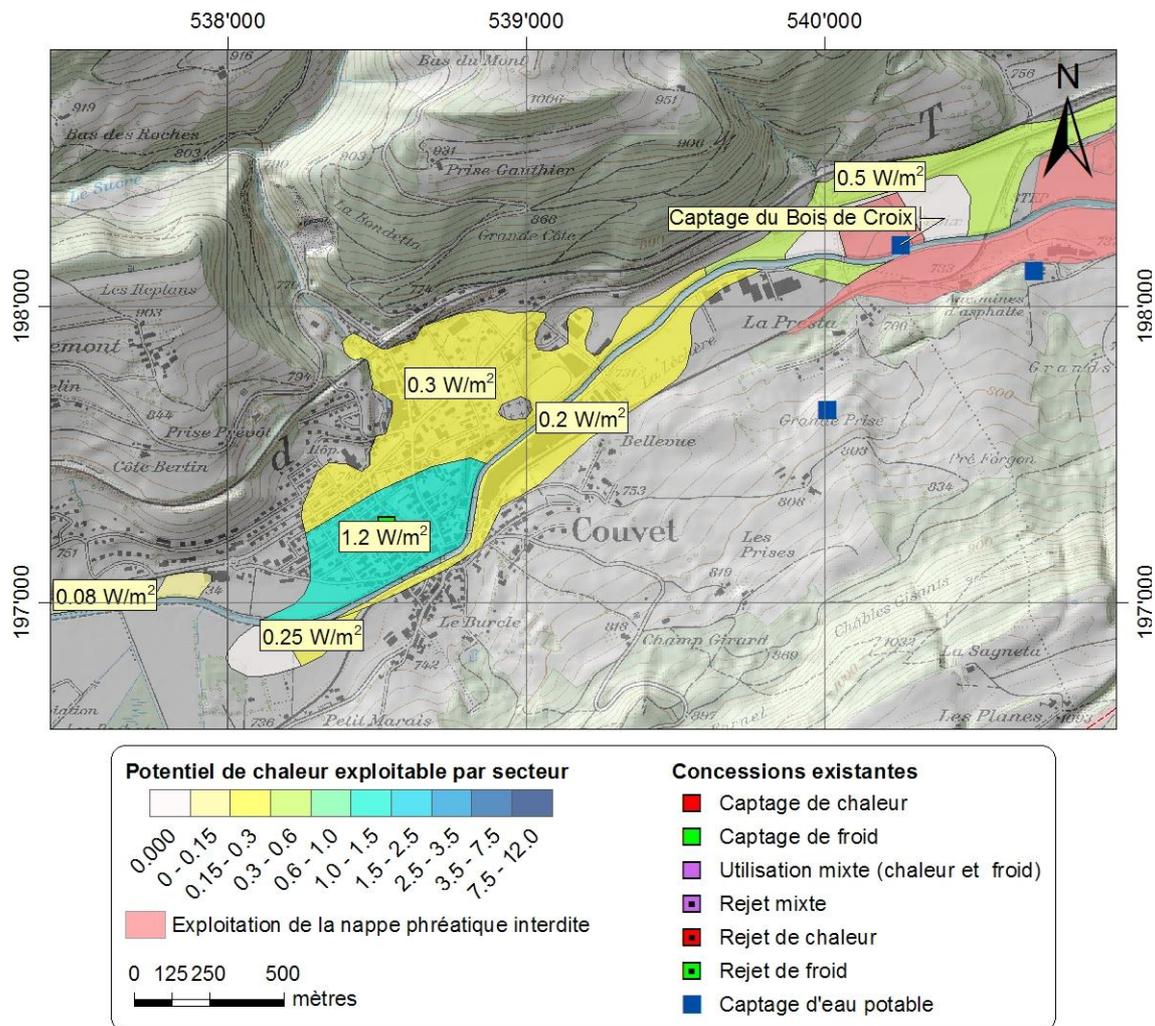


Figure 4.5. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Couvet. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

Etat de l'exploitation en 2009

Tableau 4.15. Etat de l'exploitation thermique de la nappe de Couvet en 2009.

NAPPE DE COUVET Commune de Val-de-Travers (Couvet et Travers)					
Installations en fonction	Nb	Débit total exploité (débit de concession)	Energie totale exploitée, fournie par la nappe souterraine	Pourcentage de l'énergie exploitée par rapport au potentiel	Débit réinfiltré dans la nappe souterraine
		Q_{expl}	E_{expl}	$E_{expl}/E_{tot} \cdot 100$	Q_{inf}
		$l \cdot \text{min}^{-1}$	$\text{MWh} \cdot \text{an}^{-1}$	%	$l \cdot \text{min}^{-1}$
Production de froid	1	180	37.7	4.1 ⁽¹⁾	inconnu
TOTAL (2009)	1	180	37.7	2.0 ⁽²⁾	inconnu

(1) Rapporté aux potentiels respectifs de chaleur ou de froid sans recharge saisonnière

(2) Rapporté au potentiel total avec recharge saisonnière

On recense, en 2009, une seule installation pour la production de froid à proximité de l'ancien captage communal. L'énergie exploitée représente environ 4 % de l'énergie de froid pouvant être fournie par la nappe.

Développement et gestion de l'exploitation

Tableau 4.16. Potentiel d'exploitation de la nappe de Couvet et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DE COUVET Commune de Val-de-Travers (Couvet et Travers)			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des villages de Couvet et de Travers (2009)	$D_{th\ tot}$	70.89	$\text{GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	37.98	$\text{GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	1.22	$\text{GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	1.7	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	3.2	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot \text{COP} / \text{COP}-1$	0.0	$\text{GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$

La confrontation des besoins avec la ressource indique que :

- Près de 54 % de la demande en énergie de chauffage est située à moins de 100 m de la ressource.
- Sans recharge thermique, l'exploitation de la nappe avec pompe à chaleur ne permettrait de répondre qu'à 3.2 % de la demande thermique, soit $1.22 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$.

- La qualité de l'eau n'est pas toujours adéquate pour la réalisation de captages thermiques. Dans le secteur du Bois-de-Croix, on observe des eaux peu oxygénées et incrustantes et à l'amont du village (Petit Marais), des pollutions dans la nappe ont été observées.
- La ressource n'est pas uniformément répartie et l'exploitation de la nappe devrait se faire en priorité dans les secteurs les plus favorables (bonne perméabilité, épaisseur de la nappe suffisante) par des installations de taille modeste.
- Le secteur le plus favorable se situe dans la nappe du cône du Sucre, au sud-ouest de Couvet, à moins de 400 m de l'Areuse. La réhabilitation du puits de captage communal et la création d'un réseau de distribution d'eau technique à l'échelle du quartier vers des PAC individuelles devraient être envisagées en priorité.
- Dans le secteur de l'usine Dubied, des puits ont été implantés dans la nappe. Une étude devrait être effectuée, afin de déterminer dans quelle mesure ils ne sont plus utilisés et pourraient être valorisés.

4.3.6 Nappe de Noiraigue

A Noiraigue, la présence d'une petite nappe alluviale, très peu connue et à très faible potentiel peut être supposée. La nappe est constituée de lentilles de graviers probablement situés en rive droite de la Noiraigue, sur une surface de 34'500 m². Aucune information n'est disponible sur la ressource et les quelques forages réalisés à proximité révèlent que les graviers sont mélangés avec des argiles et des limons. Le potentiel de cette ressource est peu significatif et ne sera pas considéré dans la présente étude.

4.3.7 Nappe de Vaumarcus

La bordure du lac de la région de Vaumarcus est constituée d'une petite nappe alluviale formée par les alluvions de la Vaux, en partie exploitée pour la production d'eau potable (puits vers Rive). La nappe, épaisse en moyenne d'une dizaine de mètres, s'étend également sur le territoire communal de St-Aubin-Sauges. La nappe exploitable hors zones de protection s'étend sur une surface totale estimée à 67'650 m² (Figure 4.6).

Tableau 4.17. Potentiel d'exploitation de la nappe de Vaumarcus et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DE VAUMARCUS Communes de Vaumarcus et St-Aubin-Sauges			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes de Vaumarcus et St-Aubin-Sauges (2009)	$D_{th\ tot}$	28.73	GWh _{th} ·an ⁻¹
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	0.92	GWh _{th} ·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	0.35	GWh _{th} ·an ⁻¹
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	1.2	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	38.0	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.0	GWh _{th} ·an ⁻¹

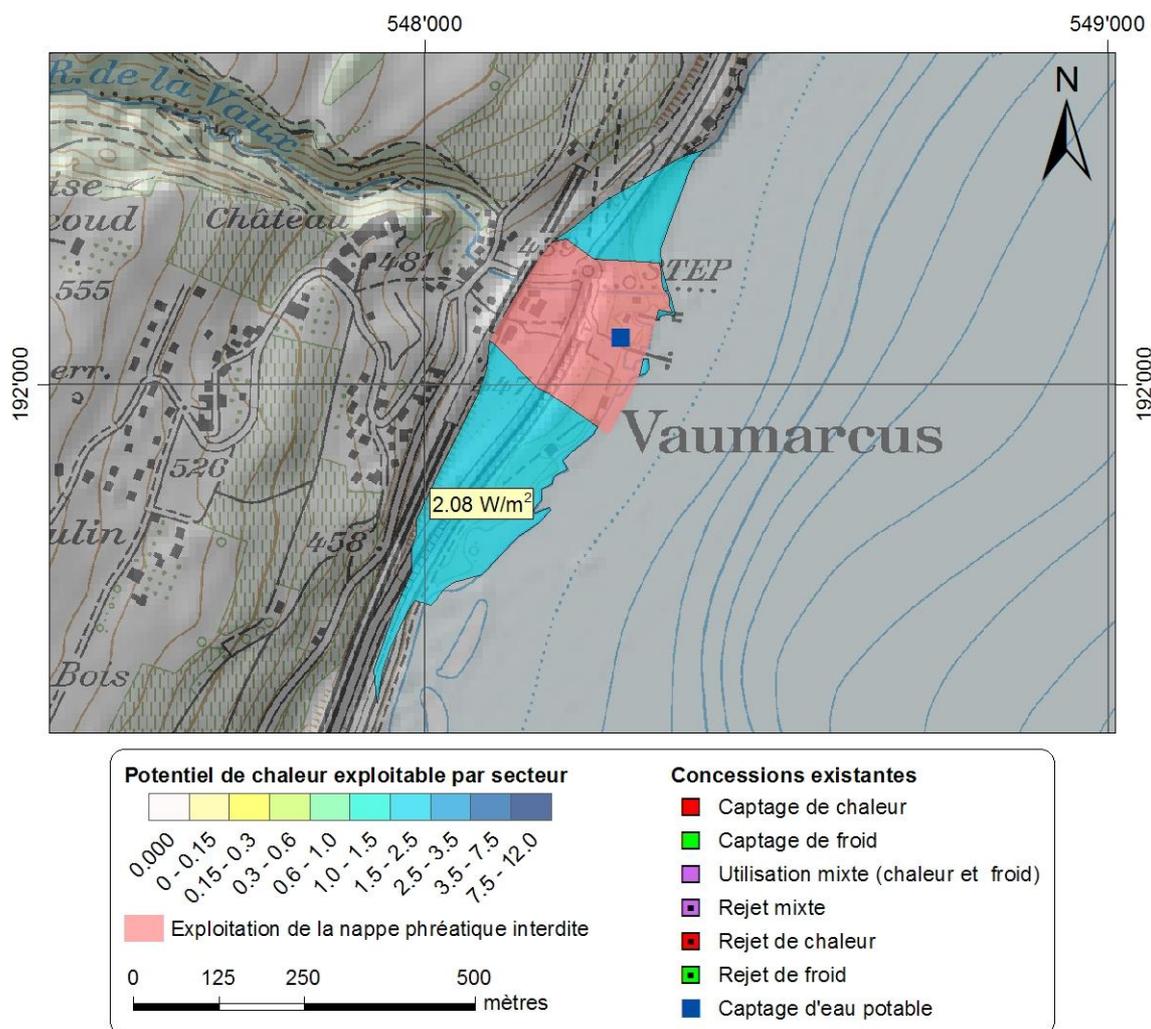


Figure 4.6. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Vaumarcus. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

L'énergie exploitable (production de chauffage seulement) est relativement faible ($0.35 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$), mais permettrait d'alimenter 38 % des riverains situés à moins de 100 m de la ressource. La situation de la nappe est plutôt favorable, car la nappe s'étend perpendiculairement par rapport aux écoulements souterrains. De ce fait, l'effet de l'influence thermique vers l'aval est limité.

4.3.8 Nappe de St-Aubin

La nappe de St-Aubin s'étend en bordure de lac jusque sur le territoire de la commune de Gorgier. La géométrie et les caractéristiques de la nappe sont mal connues. La nappe est exploitée pour la production d'eau potable par le puits communal de Vers-chez-la-Tante et anciennement au puits du Rafour. La surface exploitable, hors zones de protection des eaux, s'étend sur $270'000 \text{ m}^2$ (Figure 4.7).

Comme la nappe est mal connue, l'incertitude sur le calcul du potentiel est importante. Le calcul a été effectué par modélisation de la surface d'influence, mais également par l'étude du fonctionnement des installations existantes. Dans les secteurs du puits du Rafour à St-Aubin-Sauges et au centre de Gorgier, le potentiel a été réduit ($\times 1/2$) pour tenir compte de la présence possible d'eau ferrugineuse, impropre à une utilisation technique.

Tableau 4.18. Potentiel d'exploitation de la nappe de St-Aubin et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DE ST-AUBIN Communes de St-Aubin-Sauges et Gorgier			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes de St-Aubin-Sauges et Gorgier (2009)	$D_{th\ tot}$	45.60	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	10.83	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	1.75	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux des communes de St-Aubin-Sauges et Gorgier pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	3.8	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	16.1	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.04	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

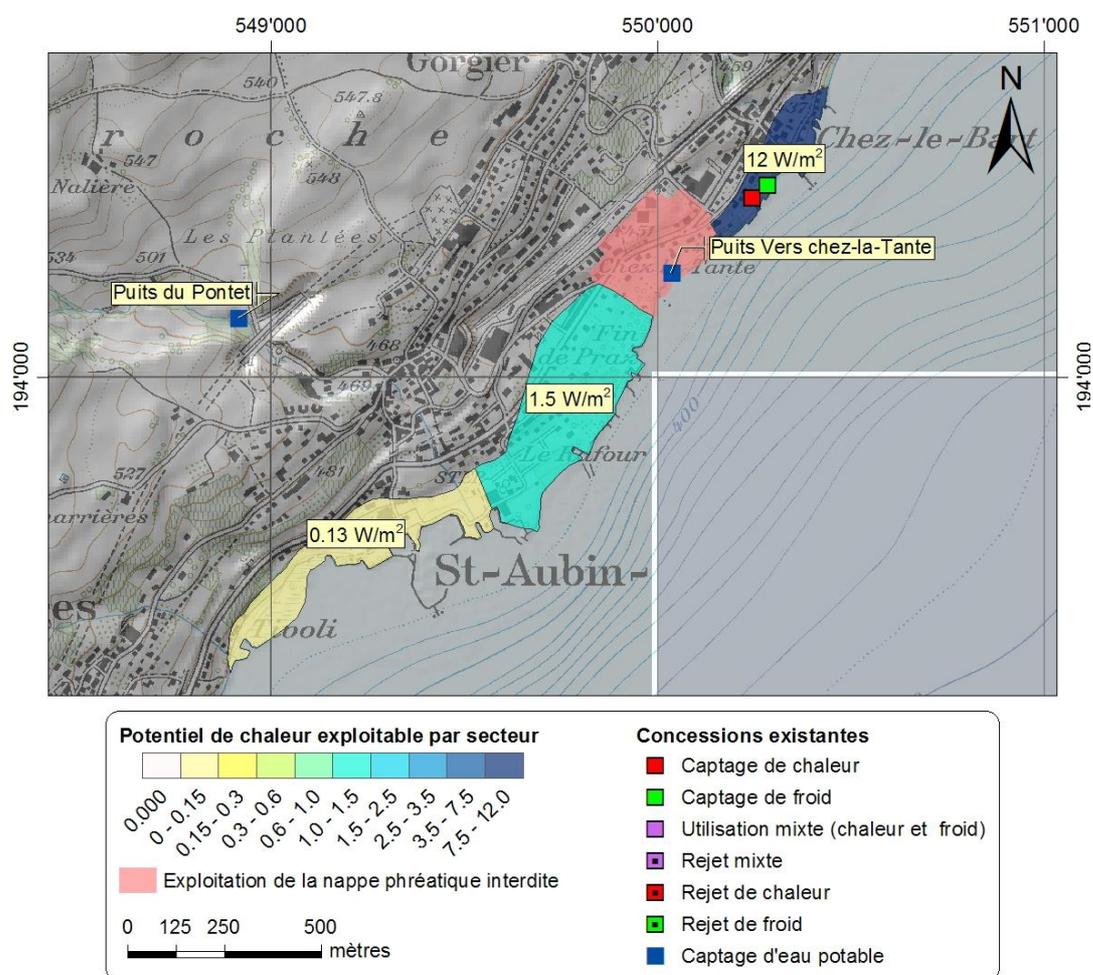


Figure 4.7. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de St-Aubin. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W\cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

A Gorgier, la nappe est exploitée pour la production de chaleur et de froid. Elle fournit au total 36.3 MWh \cdot an $^{-1}$ de chaleur et 465 MWh \cdot an $^{-1}$ de froid. En cas de production de chaleur seulement, la nappe permet de fournir 1.75 GWh \cdot an $^{-1}$, ce qui permettrait de combler 3.8 % de la demande thermique totale des communes de St-Aubin-Sauges et de Gorgier, et 16.1 % des besoins des utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource.

La disposition de la nappe qui s'étend perpendiculairement aux écoulements souterrains a pour effet de limiter l'influence thermique vers l'aval. Cependant, le gradient est relativement faible et l'influence thermique latérale comme les phénomènes d'appel d'eau du lac doivent être considérés lors d'une possible exploitation.

4.3.9 Nappes de Bevaix

Le sous-sol du village de Bevaix est constitué de graviers fluvioglaciers qui abritent la nappe d'Archessus, traversant le village du nord-est au sud-ouest, et de la nappe de Perreux, exploitée pour la production d'eau potable au puits de l'hôpital psychiatrique (Figure 4.8). La nappe de Perreux s'étend également sur le territoire de la commune de Boudry. Des ressources en eau souterraine variables et méconnues sont recensées sur toute la bordure de lac du territoire communal.

La ressource est relativement limitée et les secteurs au meilleur potentiel sont situés dans la nappe de Perreux au Nord du village de Bevaix. Au total, la puissance potentiellement exploitable (en cas de production de chaleur uniquement) est estimée à 65 kW pour la nappe d'Archessus, 156 kW pour la nappe de Perreux et 35 kW pour la nappe périlacustre, pour un total de 255 kW, soit 0.51 GWh \cdot an $^{-1}$. Ce potentiel est inexploité en 2009.

Avec l'utilisation de pompes à chaleur, ce potentiel permettrait de produire 0.63 GWh $_{th}$ \cdot an $^{-1}$, ce qui ne représente que 3 % des besoins des utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource.

Tableau 4.19. Potentiel d'exploitation des nappes de Bevaix et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPES DE BEVAIX Communes de Bevaix et Boudry			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes de Bevaix et de Boudry (2009)	$D_{th\ tot}$	90.25	GWh $_{th}$ \cdot an $^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	20.67	GWh $_{th}$ \cdot an $^{-1}$
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	0.63	GWh $_{th}$ \cdot an $^{-1}$
Besoins totaux des communes de Bevaix et de Boudry pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.7	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	3.0	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.0	GWh $_{th}$ \cdot an $^{-1}$

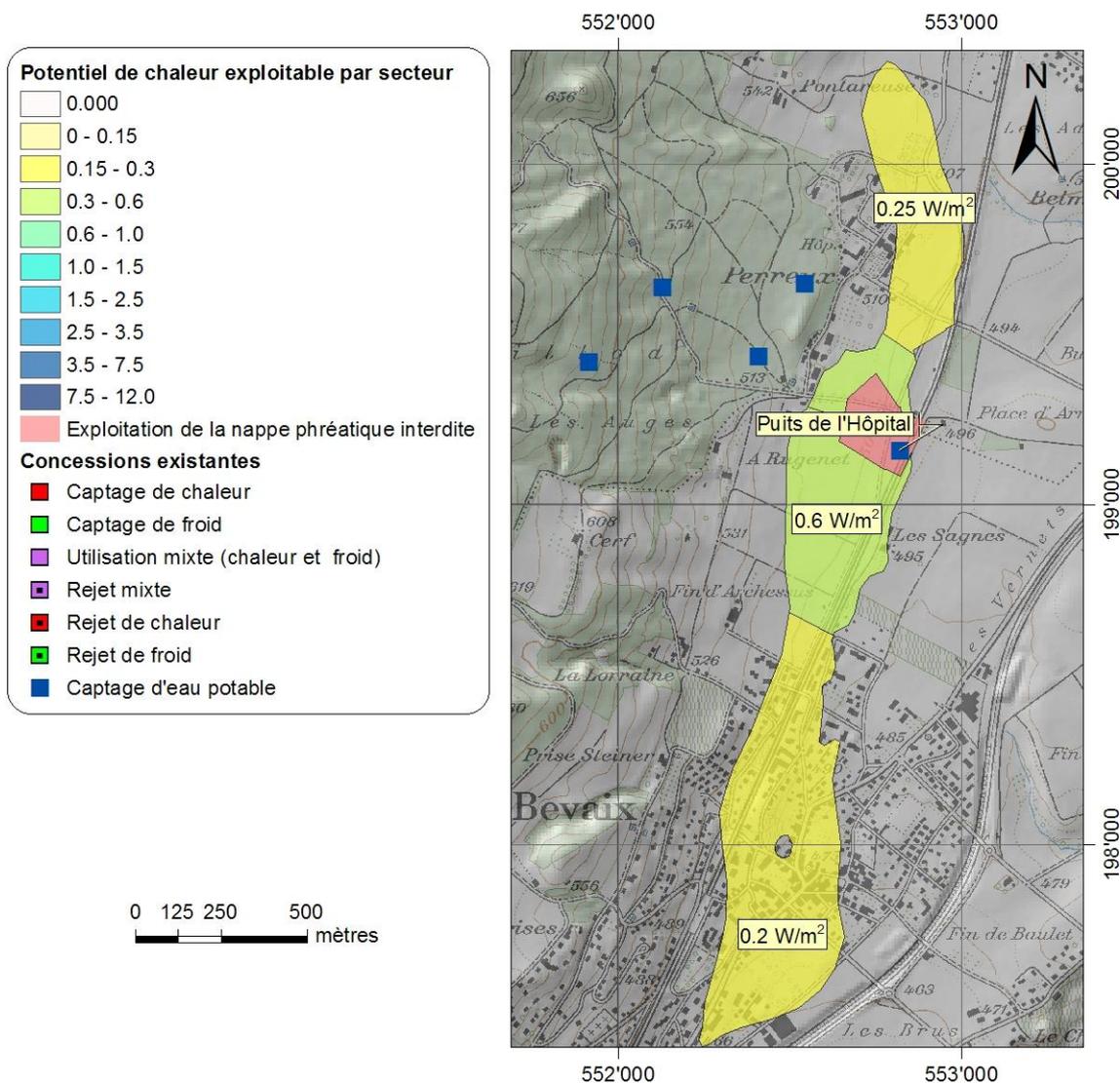


Figure 4.8. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Bevaix. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

4.3.10 Nappe du delta de l'Areuse

Généralités

La nappe du delta de l'Areuse (Figure 4.9) constitue l'une des plus importantes ressources en eau souterraine de faible profondeur du canton de Neuchâtel. Cette dernière est notamment utilisée pour la production d'eau potable pour les communes de Colombier, Boudry et Cortaillod.

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 graviers sableux entrecoupés de lentilles limoneuses et argileuses. A la base, l'aquifère est limité par une couche de moraine peu perméable et d'une couche de limons lacustres dont l'épaisseur et la profondeur augmente en direction du lac. L'épaisseur totale des graviers perméables augmente également en direction du lac et varie entre 10 et 30 m.

La recharge de l'aquifère s'effectue par les précipitations, mais également, dans une faible proportion, par les infiltrations de l'Areuse. Les eaux souterraines s'écoulent vers le sud-est en direction du lac qui constitue l'exutoire de la nappe. En basses eaux, le niveau piézométrique de la

nappe de l'Areuse se trouve entre 3 et 6 m en-dessous de la surface du terrain et les gradients hydrauliques observés sont faibles, de 3 à 0.6 ‰. Une diminution du gradient hydraulique en bordure du lac est constatée. La température moyenne annuelle de l'eau est de l'ordre de 11 °C.

Les ressources en eaux souterraines situées à la bordure Nord de la plaine et en bordure de l'Areuse en ville de Boudry sont peu connues et d'importance très marginale. Le potentiel présumé de ces ressources est considéré avec la nappe du delta de l'Areuse dans ce chapitre.

Méthode utilisée pour le calcul du potentiel théorique

En raison de la complexité des systèmes aquifères, constitués parfois de niveaux perméables superposés de faible épaisseur, le calcul du potentiel comporte une grande part d'incertitude.

Le potentiel théorique minimal (production de chaleur uniquement) a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≤ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1). L'estimation est plutôt conservative, d'une part en raison des infiltrations de l'Areuse qui ont pour effet de diluer le panache thermique. D'autre part, de nombreux secteurs favorables à l'exploitation de la nappe sont situés en bordure de lac avec limitation de l'influence thermique théorique vers l'aval.

Caractéristiques de la nappe

Les caractéristiques de la nappe du delta de l'Areuse sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.20. Caractéristiques générales de la nappe du delta de l'Areuse et liste des paramètres hydrauliques représentatifs utilisés notamment pour le calcul du potentiel théorique.

NAPPE DU DELTA DE L'AREUSE Communes de Boudry, Cortaillod et Colombier				
Paramètres de la nappe				
Surface totale exploitable à des fins thermiques		S	2'101'700	m ²
Altitude moyenne			435	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux		P ₁	3-6	m
Profondeur de la base de l'aquifère	Amont	P ₂	4-10	m
	Aval		7-30	m
Epaisseur de la nappe (zone saturée)	Amont	e	2-7	m
	Aval		4-25	m
Perméabilité		K	1·10 ⁻⁴ à 5·10 ⁻³	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement		Φ	0.05 à 0.15	(-)
Gradient hydraulique estimé	Amont	i	0.1-0.5	‰
	Aval		0.06-0.3	‰

Potentiel d'exploitation théorique

Tableau 4.21. Potentiel d'exploitation théorique de la nappe du delta de l'Areuse.

NAPPE DU DELTA DE L'AREUSE Communes de Boudry, Cortaillod et Colombier			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	1.47	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	2'101'700	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	3.09	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	6.18	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	7.72	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	6.18	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 12.36	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 13.90	GWh _{th} ·an ⁻¹

(1) Puissance soutirée à la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.

(2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.

(3) Production de froid par installation de type freecooling.

(4) installation standard. Somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

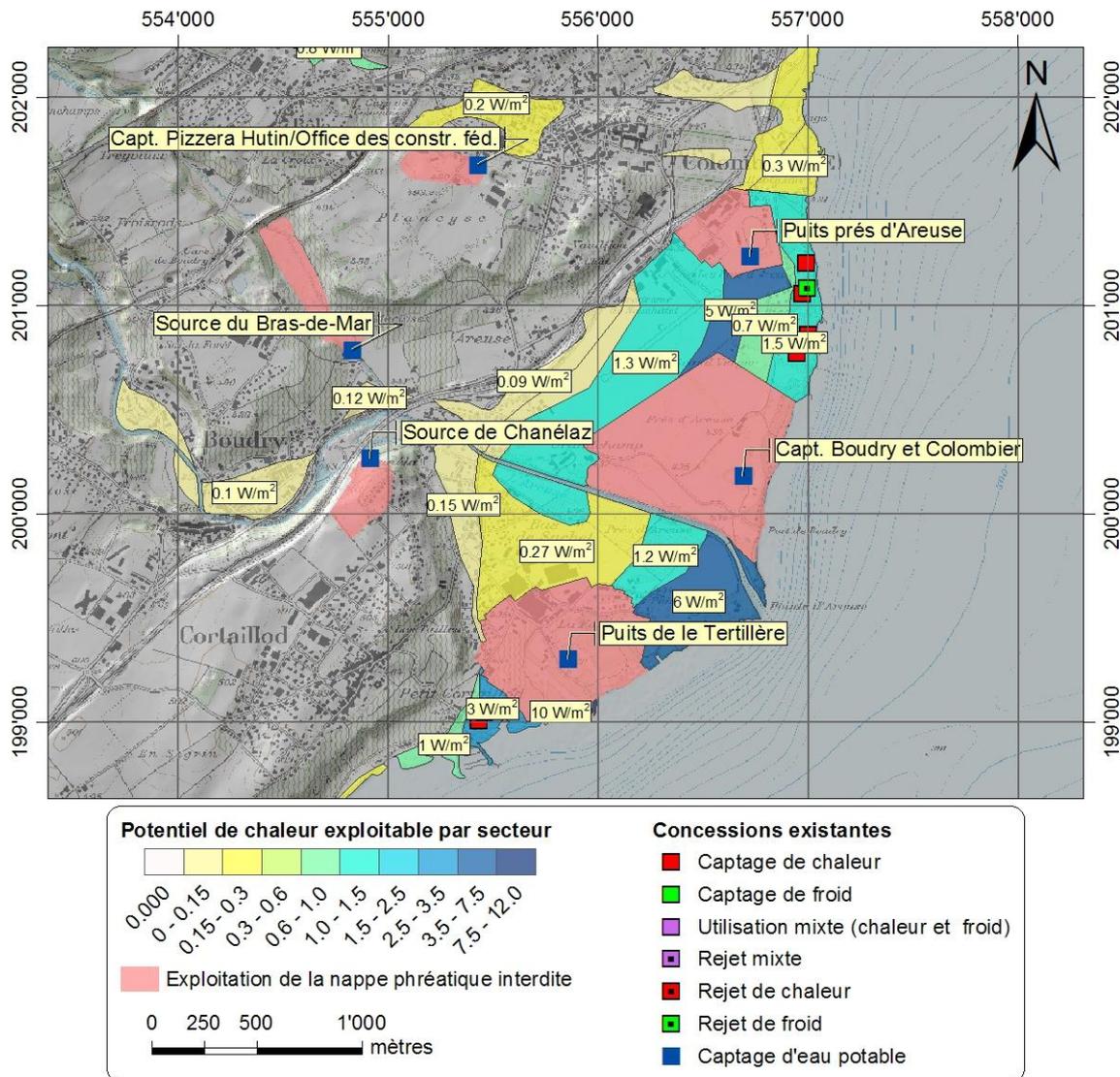


Figure 4.9. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de l'Areuse. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

Les secteurs favorables sont localisés principalement dans la partie frontale de la nappe où l'épaisseur des graviers est généralement importante. Dans ces secteurs, la nappe est bien souvent exploitée pour la production d'eau potable. Même si les vitesses d'écoulement sont faibles, le potentiel reste élevé en raison de la grande épaisseur de la nappe et de la bonne perméabilité des terrains. A l'amont de la nappe, les ressources sont limitées du fait de la faible épaisseur de la nappe. On recense quelques secteurs favorables, recoupés par sondages ou délimités par méthodes géophysiques, notamment dans le secteur de l'aéroport et de Grandchamp.

La puissance moyenne exploitable sur l'ensemble de la nappe est estimée à $1.47 W \cdot m^{-2}$. Ce qui permet théoriquement de soutirer $6.18 GWh \cdot an^{-1}$ sans recharge. Dans le cas où l'on considère une recharge saisonnière par production de froid en été, le stockage saisonnier sera relativement efficace en raison des vitesses d'écoulement moyennes à faibles. Dans ce cas, l'énergie exploitable sera en principe plus du double de cette valeur, soit supérieure à $12.36 GWh \cdot an^{-1}$.

Etat de l'exploitation en 2009

Tableau 4.22. Etat de l'exploitation thermique de la nappe du delta de l'Areuse en 2009.

NAPPE DU DELTA DE L'AREUSE					
Communes de Boudry, Cortaillod et Colombier					
Installations en fonction	Nb	Débit total exploité (débit de concession)	Energie totale exploitée, fournie par la nappe souterraine	Pourcentage de l'énergie exploitée par rapport au potentiel	Débit réinfiltré dans la nappe souterraine
		Q_{expl}	E_{expl}	$E_{expl}/E_{tot} \cdot 100$	Q_{inf}
		$l \cdot \text{min}^{-1}$	$\text{MWh} \cdot \text{an}^{-1}$	%	$l \cdot \text{min}^{-1}$
Production de chaleur (2009)	5	491	198	3.2 ⁽¹⁾	355
TOTAL (2009)	1	491	198	1.6 ⁽²⁾	355

(1) Rapporté aux potentiels respectifs de chaleur ou de froid sans recharge saisonnière

(2) Rapporté au potentiel total avec recharge saisonnière

En 2009, cinq installations de captage pour production de chaleur sont recensées. Les installations sont de petite taille, utilisées pour l'alimentation de pompes à chaleur pour des villas et des maisons de maître; elles se situent en bordure de lac. L'énergie totale exploitée n'est que d'environ $200 \text{ MWh} \cdot \text{an}^{-1}$, ce qui représente un peu plus du 3 % de la chaleur pouvant être fournie par la nappe.

Développement et gestion de l'exploitation

Tableau 4.23. Potentiel d'exploitation de la nappe du delta de l'Areuse et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DU DELTA DE L'AREUSE Communes de Boudry, Cortaillod et Colombier				
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge				
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes de Boudry, de Cortaillod et de Colombier (2009)		$D_{th\ tot}$	161.37	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	Boudry	D_{th}	24.48	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
	Cortaillod		23.42	
	Colombier		4.92	
	TOTAL		52.82	
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe de la plaine de l'Areuse	Boudry	$E_{th,tot}$	2.32	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
	Cortaillod		4.06	
	Colombier		1.34	
	TOTAL		7.72	
Besoins totaux des communes de Boudry, de Cortaillod et de Colombier pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe		$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	4.7	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	Boudry	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	9.5	%
	Cortaillod		17.3	
	Colombier		27.2	
	TOTAL		14.6	
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	Boudry	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.00	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
	Cortaillod		0.17	
	Colombier		0.03	
	TOTAL		0.20	

Le potentiel de développement de l'exploitation thermique de la nappe du delta de l'Areuse est important. On remarque en particulier que :

- Les utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource représentent le tiers de la demande en chaleur des trois communes de Boudry, Cortaillod et Colombier.
- En principe, la totalité du potentiel thermique de la nappe pourrait être valorisée, car la demande potentielle de chaleur dépasse largement la ressource. La demande potentielle de froid est probablement limitée (nombreuses zones d'habitation). A long terme, l'énergie totale exploitable dépendra fortement de l'efficacité avec laquelle l'exploitation de la nappe aura été planifiée. Sans recharge, l'exploitation de la nappe peut déjà fournir, avec une PAC, $7.72\ GWh_{th}\cdot an^{-1}$ et répondre à 14.6 % des besoins en chaleur des utilisateurs potentiels pour les trois communes. Actuellement, seuls 3 % de cette ressource sont exploités.

D'autre part, pour une bonne gestion du potentiel de la ressource, les recommandations suivantes devraient être considérées :

- La multiplication actuelle des installations de petite dimension en bordure est de la nappe aura pour effet, à long-terme, de limiter l'énergie totale exploitable, en raison de la trop forte interaction entre les usagers.
- L'exploitation de la nappe devrait se faire par des installations de grande dimension dans la partie aval de la nappe, afin de limiter les influences thermiques et de permettre le développement futur d'installations plus modestes à l'amont. En bordure du lac, la demande est faible et il est nécessaire de distribuer l'eau froide sur de grandes distances.
- La création d'un ou plusieurs réseaux de distribution d'eau froide dans les quartiers d'immeubles et villas aux lieux dits « bas de Sachet » (Cortailod) et « Grandchamp » (Boudry) devrait être envisagée en priorité. Ces secteurs sont favorables du point de vue de la demande potentielle et de la ressource, même si cela doit être confirmé localement.
- Envisager l'utilisation du puits communal de Colombier, au nord-est de la nappe, qui est capable de fournir plusieurs centaines de l·min⁻¹ et actuellement abandonné pour la production d'eau potable. Comme l'utilisation future du puits n'est pas connue, ce puits n'a pas été considéré dans le calcul du potentiel de la nappe.
- En raison de vitesses d'écoulement moyennes à faibles, le stockage thermique saisonnier sera relativement efficace et contribuera à limiter le refroidissement de la nappe. On aura donc intérêt à rechercher des utilisateurs potentiels de froid dans les zones industriels de Boudry, Colombier et Cortailod.

Limitations du potentiel d'exploitation

En cas d'exploitation thermique intensive de la nappe du delta de l'Areuse, l'influence thermique sur les captages communaux situés à l'aval des écoulements souterrains doit être maîtrisée.

A terme, l'établissement d'un modèle de simulation numérique de la thermique de la nappe pourrait être envisagé afin de gérer la ressource en eau souterraine (utilisation thermique et eau potable).

Bien que la qualité générale des eaux pompées soit bonne, il n'est pas exclu de rencontrer des eaux peu oxygénées et incrustantes dans la partie frontale de la nappe.

4.3.11 Nappes périlacustres et fluvioglaciaires de Colombier, Bôle et Auvernier

On recense, dans les communes de Colombier, Bôle et Auvernier, des nappes phréatiques d'importance marginale de 1 à 5 m d'épaisseur sous les villages de Bôle et Colombier (graviers fluvioglaciaires) et des nappes périlacustres (nappe du delta d'Auvernier et nappes des remblais) (Figure 4.10).

Le potentiel présumé des ressources en bordure de lac est mal connu, mais il est considéré que la situation est plutôt favorable en raison de la disposition des nappes parallèlement au rivage et aux perméabilités qui peuvent être localement élevées.

Le potentiel théorique a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≥ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1).

Dans les nappes périlacustres perméables où le gradient hydraulique n'est pas connu, mais probablement très faible, le potentiel a été estimé par calcul volumétrique simple, en calculant l'énergie fournie par refroidissement de l'ensemble de l'aquifère saturé (graviers et eau souterraine), en considérant que la recharge par les versants, le lac et les précipitations permet d'équilibrer un refroidissement annuel de 1 °C.

Tableau 4.24. Potentiel d'exploitation des nappes périlacustres et fluvioglaciaires de Colombier, de Bôle et d'Auvernier. Couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPES PERILACUSTRES ET FLUVIOGLACIAIRES DE COLOMBIER, BOLE ET AUVERNIER Communes de Colombier, Bôle et Auvernier			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes de Colombier, de Bôle et d'Auvernier (2009)	$D_{th\ tot}$	86.06	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	25.15	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	0.32	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux des communes de Colombier, de Bôle et d'Auvernier pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.4	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	1.3	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

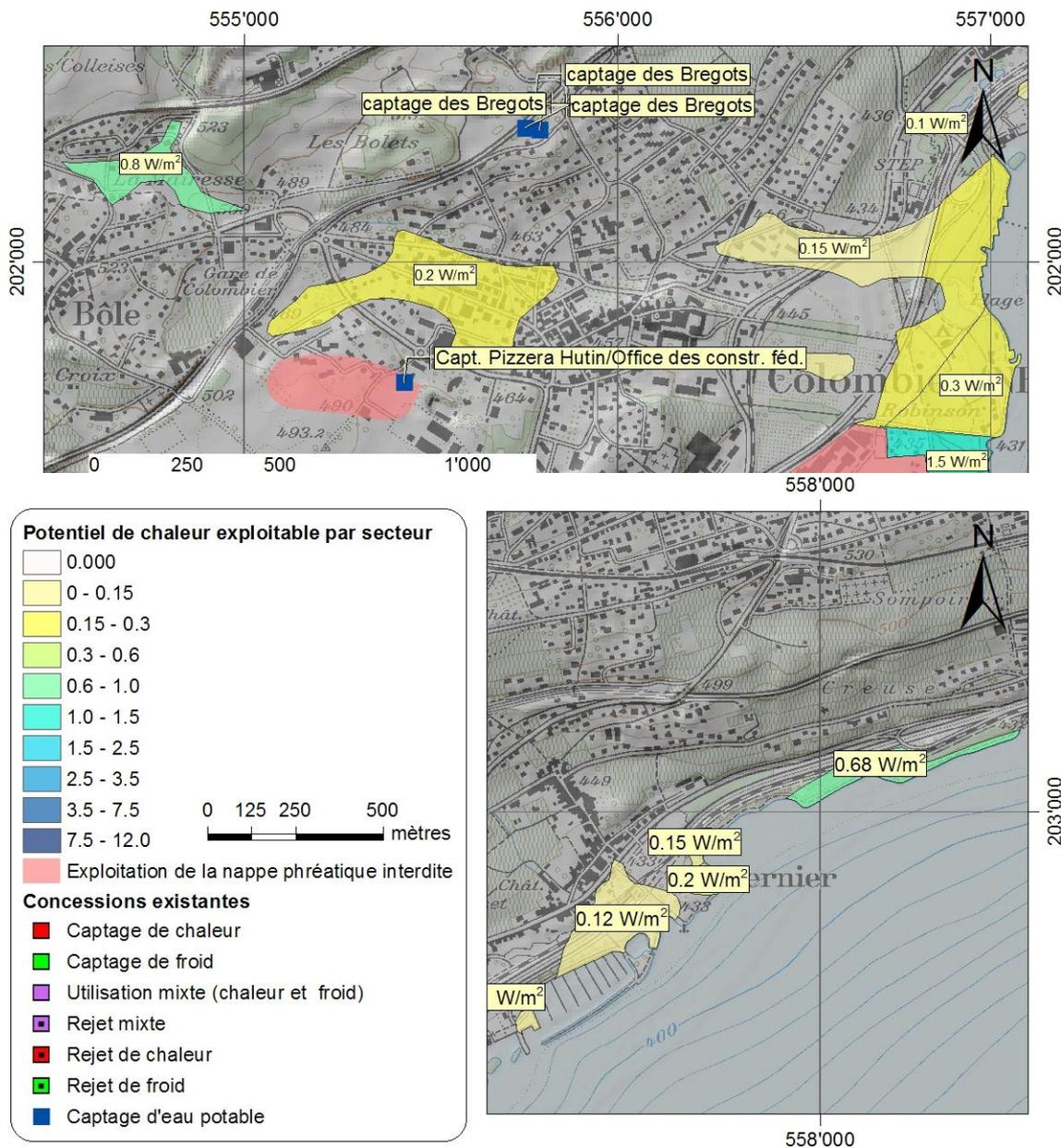


Figure 4.10. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique périlacustre et fluvioglaciaire de Colombier, Bôle (haut) et Auvernier (bas). Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

La puissance totale exploitable (en cas de production de chaleur uniquement) est limitée à 128 kW; ce potentiel permettrait de produire $0.32 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$, soit 1.3 % des besoins des utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource.

En principe, la totalité du potentiel thermique de la nappe pourrait être valorisée car la demande potentielle de chaleur dépasse largement la ressource. Dans les secteurs bordant le lac et à faible gradient hydraulique, on prendra garde à ne pas surexploiter la nappe, afin de ne pas forcer les écoulements d'eau du lac dans les nappes périlacustres.

4.3.12 Nappe du Seyon et nappes périlacustres de Neuchâtel

Généralités

Le sous-sol du centre-ville de Neuchâtel est constitué par un delta alluvial déposé par l'ancien cours du Seyon (Figure 4.11). Les alluvions contiennent une nappe phréatique, partiellement en équilibre hydraulique avec le lac, disponible à environ 4 m sous les rues piétonnes. La nappe du delta du Seyon a une superficie de 133'000 m² et une épaisseur (zone saturée) de 5 à 15 m. La nappe représente une ressource d'excellente qualité pour l'alimentation de pompes à chaleur ou la production de froid.

En direction du lac, la nappe du Seyon entre progressivement au contact des nappes périlacustres, constituées de remblais graveleux et de moraines perméables, présents en bordure de lac sur la quasi-totalité du littoral communal. La nappe atteint une largeur de quelques dizaines de mètres à près de 500 m dans le secteur Maladière. Le système aquifère des nappes périlacustres est complexe, car composé d'une succession de couches de graviers d'origine différente et souvent séparés par des niveaux de sédiments lacustres peu perméables. L'épaisseur des nappes périlacustres est de l'ordre de 5 à 25 m, dans le secteur des Jeunes Rives. La perméabilité des terrains est très variable. La qualité des remblais et les pollutions d'origine urbaine sont un facteur déterminant pour la qualité de l'eau souterraine. Dans de nombreux secteurs, la présence d'eau peu oxygénée et riche en fer dissout représente une limitation à l'exploitation hydrothermique de la nappe sans traitement chimique préalable.

Méthode utilisée pour le calcul du potentiel théorique

En dépit d'un certain nombre de forages réalisés dans la nappe du Seyon et les nappes périlacustres, il subsiste de grandes incertitudes sur la vitesse des écoulements souterrains. Il manque, à l'heure actuelle, un document ou une étude qui synthétise la géométrie de la nappe et des niveaux de l'eau souterraine.

Secteurs à faible potentiel et à vitesses d'écoulement connues

Le potentiel théorique minimal (production de chaleur uniquement) a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≤ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1). L'estimation est plutôt pessimiste, car la présence proche du lac et la disposition de la ressource perpendiculairement aux écoulements souterrains ont un effet plutôt favorable sur le potentiel exploitable.

Secteurs à fort potentiel et à vitesses d'écoulement inconnues

Dans les nappes perméables où le gradient hydraulique n'est pas connu, un calcul volumétrique simple a également été effectué, en calculant l'énergie fournie par refroidissement de l'ensemble de l'aquifère saturé (graviers et eau souterraine), en considérant que la recharge par les versants, le lac et les précipitations permet d'équilibrer un refroidissement annuel de 1 à 2 °C.

Pour la nappe du Seyon, le calcul est le suivant :

Surface de l'aquifère		133'000	m ²
Epaisseur de la zone saturée		~ 5-10	m
Epaisseur de la zone non-saturée		~ 4	m
Volume des graviers saturés en eau V_n		1'100'000	m ³
Volume d'eau souterraine V_f ($V_n \cdot 0.2$)		220'000	m ³
Quantité de chaleur exploitable*			
Chaleur spécifique des graviers saturés en eau	γ_{nappe}	0.7	kWh·m ⁻³ ·an
Energie fournie par la nappe refroidie de 1°C	$V_n \cdot \gamma_{nappe}$	0.77	GWh·°K ⁻¹
Energie exploitable (chaleur seulement, refroidissement du milieu de max. 2 °C)	$V_n \cdot \gamma_{nappe} \cdot 2^\circ K$	1.54	GWh·an⁻¹
Puissance de chaleur exploitable à partir de la nappe (1.54 GWh/2'000 heures)		0.77	MW

*Approche simplifiée plutôt pessimiste ne tenant pas compte des effets de bord. Conditions : exploitation homogène de la nappe et recharge saisonnière naturelle ou artificielle permettant de rétablir la température initiale de la nappe durant l'été.

Caractéristiques des nappes

Les caractéristiques de la nappe du Seyon et des nappes périlacustres sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.25. Caractéristiques générales de la nappe du Seyon, ainsi que des nappes périlacustres de Neuchâtel et liste des paramètres hydrauliques représentatifs utilisés notamment pour le calcul du potentiel théorique.

NAPPES DU SEYON ET NAPPES PERILACUSTRES Ville de Neuchâtel			
Paramètres de la nappe du Seyon			
Surface totale exploitable à des fins hydrothermiques	S	133'500	m ²
Altitude moyenne		430	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	3-4	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	8-18	m
Épaisseur de la nappe (zone saturée)	e	5-15	m
Perméabilité	K	1·10 ⁻³	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emménagement	Φ	0.20	(-)
Gradient hydraulique moyen	i	0.1	%
Paramètres des nappes périlacustres			
Surface totale exploitable à des fins hydrothermiques	S	842'300	m ²
Altitude moyenne		430	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-3	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	6-30	m
Épaisseur de la nappe (zone saturée)	e	5-25	m
Perméabilité	K	5·10 ⁻³ à 5·10 ⁻⁵	m·s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emménagement	Φ	0.15 à 0.3	(-)
Gradient hydraulique estimé	i	0 - 2	%

Potentiel d'exploitation théorique

La puissance exploitable sur l'ensemble des nappes est détaillée dans le tableau suivant :

Tableau 4.26. Potentiel d'exploitation théorique des nappes du Seyon et nappes périlacustres de Neuchâtel.

NAPPES DU SEYON ET NAPPES PERILACUSTRES Ville de Neuchâtel			
Nappe du Seyon			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an ⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	5.75	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	133'500	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	0.77	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	1.54	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	1.92	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	1.54	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation pour production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 3.08	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 3.46	GWh _{th} ·an ⁻¹
Nappes périlacustres			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an ⁻¹			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	1.44	W·m ⁻²
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	842'300	m ²
Puissance thermique minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	1.22	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	2.44	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	3.05	GWh_{th}·an⁻¹
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	2.44	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation pour production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	≥ 4.88	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 5.49	GWh _{th} ·an ⁻¹

(1) Puissance soutirée à la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.

(2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.

(3) Production de froid par installation de type freecooling.

(4) Installation standard. Somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

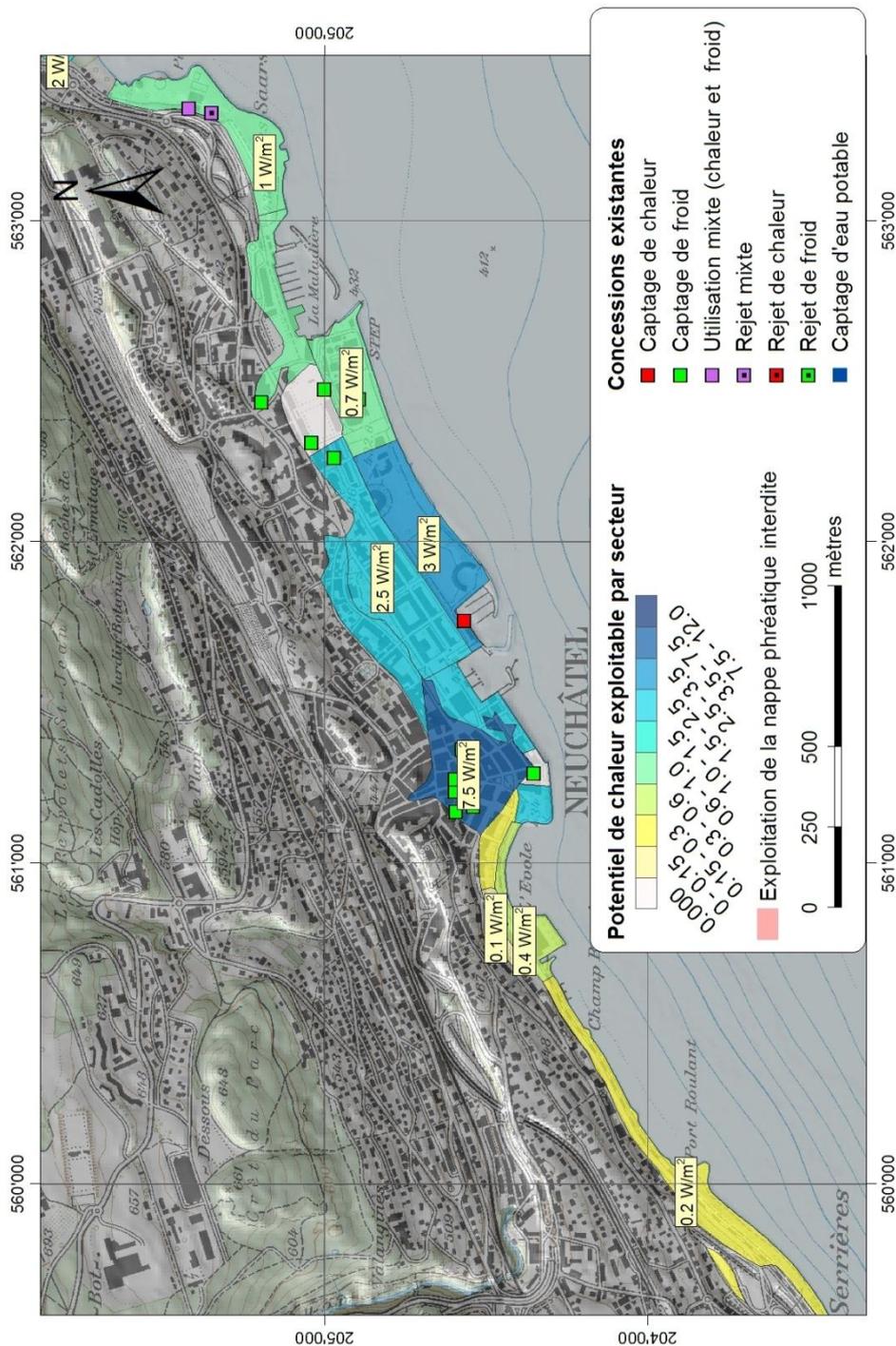


Figure 4.11. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe du Seyon et des nappes périlacustres de Neuchâtel. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

La nappe du Seyon a un très bon potentiel d'exploitation. La puissance moyenne exploitable sur l'ensemble de la nappe est estimée à $5.75 W \cdot m^{-2}$, ce qui permet de soutirer $1.54 GWh \cdot an^{-1}$ sans recharge. Dans le cas où l'on considère une recharge saisonnière par production de froid en été, le stockage saisonnier sera relativement efficace en raison des vitesses d'écoulement moyennes à faibles. Dans ce cas, l'énergie exploitable (chaud et froid) sera en principe plus du double de cette valeur, soit plus de $3.08 GWh \cdot an^{-1}$.

Les nappes périlacustres ont un potentiel exploitable de 3.05 GWh·an⁻¹ sans recharge. Dans les secteurs à risque, dans le calcul du potentiel, les possibilités de rencontrer des eaux ferrugineuses ont été prises en compte en réduisant le potentiel de moitié. Aux environs du nouveau centre de la Maladière et du quai Osterwald, le potentiel a été limité en raison de la présence avérée d'eau ferrugineuse.

Dans ces nappes, en raison des faibles vitesses d'écoulement, le stockage saisonnier sera efficace, voire nécessaire pour exploiter la nappe dans les meilleures conditions.

Etat de l'exploitation en 2009

Tableau 4.27. Etat de l'exploitation thermique des nappes du Seyon et périlacustres de Neuchâtel en 2009.

NAPPES DU SEYON ET NAPPES PERILACUSTRES					
Ville de Neuchâtel					
Installations en fonction	Nb	Débit total exploité (débit de concession)	Energie totale exploitée, fournie par la nappe souterraine	Pourcentage de l'énergie exploitée par rapport au potentiel	Débit réinfiltré dans la nappe souterraine
		Q _{expl}	E _{expl}	E _{expl} /E _{tot} · 100	Q _{inf}
		l·min ⁻¹	MWh·an ⁻¹	%	l·min ⁻¹
Nappe du Seyon					
Production de froid uniquement	6	846	457	29.7 ⁽¹⁾	0
TOTAL (2009)	1	846	457	14.8 ⁽²⁾	0
Nappes périlacustres					
Production de chaleur uniquement	1	280	46	1.8 ⁽¹⁾	
Production de froid uniquement	4	2'422	1'730	70.9 ⁽¹⁾	
Production de chaleur et de froid	2	650	chaud 446	18.3 ⁽¹⁾	250
			froid 162	6.6 ⁽¹⁾	
TOTAL (2009)	2	3'352	2.380	48.8 ⁽²⁾	250

(1) Rapporté aux potentiels respectifs de chaleur ou de froid sans recharge saisonnière

(2) Rapporté au potentiel total avec recharge saisonnière

Dans la nappe du Seyon, on recense 6 installations pour la production de froid. L'énergie exploitée représente 30 % de l'énergie de froid pouvant être fournie par la nappe, sans recharge.

Dans les nappes périlacustres, on recense au total 7 installations, dont 4 pour la production de froid (1'730 MWh·an⁻¹). Sur un débit exploité de 3'350 l·min⁻¹, seuls 250 l·min⁻¹ sont rejetés à la nappe. Pour cette raison, même si le bilan thermique n'est pas neutre et que l'exploitation actuelle de froid est élevée par rapport au potentiel théorique, aucune influence thermique sur la nappe n'est actuellement à craindre. Parmi les installations existantes, on peut citer la patinoire du Littoral, le musée du Laténium, la piscine du Nid-du-Crô et l'Hôtel Palafitte.

Développement et gestion de l'exploitation

Tableau 4.28. Potentiel d'exploitation thermique des nappes du Seyon et périlacustres de Neuchâtel ainsi que couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPES DU SEYON ET NAPPES PERILACUSTRES			
Ville de Neuchâtel			
Nappe du Seyon			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble de la ville de Neuchâtel (2009)	$D_{th\ tot}$	342.18	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	59.40	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur	$E_{th,tot}$	1.92	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.6	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	3.2	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP/COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Nappes périlacustres			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation des nappes, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble de la ville de Neuchâtel (2009)	$D_{th\ tot}$	342.18	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	102.24	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	3.05	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.5	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	3.0	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP/COP-1$	0.61	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

La confrontation des besoins avec la ressource indique que :

- Les nappes phréatiques exploitables de la ville de Neuchâtel sont situées à proximité immédiate de la demande. Au total, les utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource représentent $128.2\ GWh_{th}\cdot an^{-1}$, soit 37.4 % des besoins en énergie de chauffage de la ville de Neuchâtel. Les nappes pourraient contribuer à produire $4.97\ GWh_{th}\cdot an^{-1}$ et couvrir 3.9 % de ces besoins.
- Près de 17 % de la demande en énergie de chauffage de la ville de Neuchâtel sont situés à moins de 100 m de la nappe du Seyon. Cette exploitation permettraient de combler au moins 3.2 % de ces besoins, soit $1.92\ GWh_{th}\cdot an^{-1}$.
- Le potentiel de la nappe du Seyon pourrait être valorisé, d'autant plus que l'exploitation de la nappe permettrait de répondre partiellement à des besoins de froid estimés à $2.7\ MW_{frig}$ (BMIC SA, 2009). La production de chaleur et de froid permettrait d'équilibrer thermiquement la nappe avec une bonne efficacité.

- Près de 30 % de la demande en énergie de chauffage de la ville de Neuchâtel est située à moins de 100 m des nappes périlacustres. Les nappes permettraient de combler au moins 3.0 % de ces besoins, soit 3.05 GWh_{th}·an⁻¹. Là aussi, la demande en froid est existante et permettrait de recharger thermiquement la nappe en période estivale.

Pour une bonne gestion de l'exploitation de la nappe, on prendra en considération les points suivants :

- L'exploitation de la nappe devrait se faire par immeuble ou, si possible, par groupe d'immeubles. Dans les secteurs les plus favorables et encore peu exploités (Jeunes-Rives, Monruz), des réseaux de distribution pour alimenter des immeubles par quartier en chaud et en froid peuvent être développés.
- Au centre-ville, il faut prendre garde de ne pas abaisser le niveau de la nappe (stabilité des anciens bâtiments fondés sur pieux). Le rejet des eaux pompées dans la nappe doit être exigé. Cependant, afin de limiter les influences thermiques entre installations, l'infiltration des eaux en bordure du lac est préconisée. Un regroupement des rejets devrait permettre d'augmenter le potentiel de chaleur exploitable. La disposition des rejets en bordure de lac devrait permettre d'éviter l'invasion non désirée d'eau du lac.

Limitations du potentiel d'exploitation

Dans les nappes périlacustres, la qualité de l'eau n'est pas toujours adéquate pour la réalisation de captages thermiques. La présence d'eaux réductrices et ferrugineuses est une limitation importante à l'exploitation de la nappe. Le traitement préalable de l'eau souterraine (par oxydation, floculation et filtration) est techniquement réalisable, mais, pour des questions financières, ne peut se concevoir que pour des projets de grande envergure. Dans ce cas, on pourra exploiter l'eau souterraine sans risques.

Points à développer

Certains aspects devraient être développés, afin d'utiliser au mieux le potentiel élevé des nappes phréatiques en ville de Neuchâtel, à savoir :

- Les nappes phréatiques en milieu urbain ne seront vraisemblablement jamais utilisées comme ressources en eau potable, en raison de leur mauvaise qualité bactériologique et de l'impossibilité d'appliquer des zones de protection des eaux. Dans ces conditions, il devrait être examiné si la nappe peut être considérée uniquement comme une ressource thermique et faire l'objet de stockage saisonnier avec des variations de température au-delà des contraintes légales. Dans ce cas, l'énergie exploitable par une exploitation centralisée avec gestion des rejets thermiques peut être considérablement augmentée.
- Les nappes des remblais bordant le lac sont souvent en étroite connexion avec le lac. Dans ce cas, le rejet obligatoire des eaux dans la nappe ne se justifie pas puisque les apports d'eau du lac contribuent à maintenir le niveau de la nappe à long terme. Afin de limiter les phénomènes d'altération thermique liés aux rejets, on pourrait, dans certains cas, autoriser le rejet dans le lac et augmenter considérablement la puissance exploitable.
- Compte tenu de l'importance de la ressource thermique potentielle, il faudrait établir un modèle numérique des écoulements souterrains avec l'option de prévoir l'évolution de la température de la nappe afin de pouvoir gérer de façon sérieuse la ressource thermique.

4.3.13 Les nappes périlacustres d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène

Dans les communes d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène, on trouve des nappes phréatiques d'importance secondaire, situées principalement en bordure de lac (Figure 4.12). Les nappes sont

constituées de moraines graveleuses et d'alluvions glacio-lacustres, passablement productives et épaisses de 10 à 15 m sur la commune d'Hauterive. Ces nappes sont exploitées notamment par le musée du Laténium. De manière générale, ces nappes graveleuses sont recouvertes par des remblais de nature diverse et parfois très perméables. Vers l'est, les moraines graveleuses deviennent moins perméables et diminuent d'épaisseur en direction de la Thielle. Au sud de la commune de la Tène, vers la plage du même nom, un ancien sillon alluvial de la Thielle contient une nappe alluviale dont les caractéristiques sont peu connues.

Le potentiel théorique a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≥ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1).

Pour les secteurs situés en bordure du lac, on considère que la situation est plutôt favorable en raison de la disposition des nappes qui sont parallèles au rivage et aux perméabilités qui peuvent être localement élevées. Dans le calcul du potentiel, on a tenu compte de cette situation et augmenté le potentiel exploitable par rapport au calcul GED.

Tableau 4.29. Potentiel d'exploitation des nappes périlacustres d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène, ainsi que couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPES PERILACUSTRES D'HAUTERIVE, ST-BLAISE ET LA TENE Communes d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène (2009)	$D_{th\ tot}$	121.06	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	32.61	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	1.35	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux des communes d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	1.1	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	4.1	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP / COP-1$	0.05	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

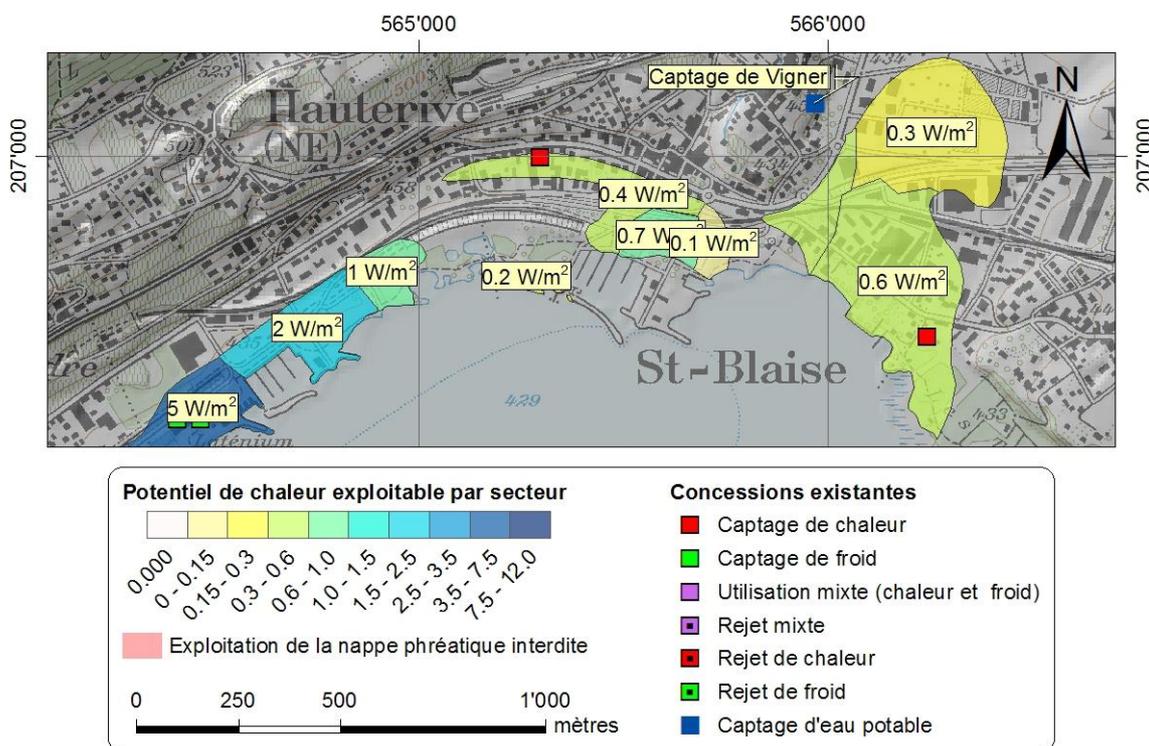


Figure 4.12. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique des nappes périlacustres d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

La superficie totale des nappes exploitables dans les communes d'Hauterive, de St-Blaise et de la Tène est de 557'085 m². La puissance totale exploitable (en cas de production de chaleur uniquement) est de 540 kW. Ce potentiel permettrait de produire 1.35 GWh_{th}·an⁻¹, soit 4.1 % des besoins des utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource.

La totalité du potentiel thermique de la nappe pourrait être valorisée, car la demande potentielle de chaleur dépasse largement la ressource. Actuellement, les nappes sont exploitées pour la production de chaleur par deux PAC pour des immeubles et des villas à raison de 47.2 MWh_{th}·an⁻¹, et pour la production de rafraîchissement par freecooling pour 62.8 MWh_{th}·an⁻¹.

Concernant la gestion de l'exploitation, on peut faire les remarques suivantes :

- La teneur en éléments fins peut être localement importante. Il faudra parfois avoir recours à des forages de grand diamètre ou multiplier les ouvrages.
- La chimie des nappes est peu connue, il faudra apporter une attention particulière à la teneur en fer dissous dans les secteurs urbains et dans les remblais.
- A l'est de St-Blaise, les premiers mètres du sous-sol sont constitués de tourbe, donc sujets à une perte de volume en cas d'assèchement. Il faudra prendre garde à maintenir un niveau de la nappe suffisant pour garantir la stabilité du milieu construit.
- Les nappes des remblais bordant le lac sont souvent en étroite connexion avec ce dernier. Dans ce cas, le rejet obligatoire des eaux dans la nappe ne se justifie pas toujours, puisque les apports d'eau du lac contribuent à maintenir le niveau de la nappe à long terme. Afin de limiter les phénomènes d'altération thermique liés aux rejets, l'autorisation d'effectuer des rejets dans le lac pourrait être accordée dans certains cas et ainsi augmenter considérablement la puissance exploitable.

4.3.14 Nappes de Cornaux et de Cressier

La plaine de la Thielle est généralement constituée de dépôts lacustres (limons, craies et tourbes) qui reposent de la moraine de fond et de la molasse, toutes deux peu perméables. Sous les dépôts lacustres, on trouve parfois des graviers et des sables postglaciaires d'épaisseur variable qui contiennent une nappe phréatique (Figure 4.13).

A Cornaux, l'épaisseur moyenne de la nappe des Nageux est estimée à 6 m, avec une perméabilité de l'ordre de $7 \cdot 10^{-4}$ dans les secteurs perméables. En direction du coteau, la moraine devient plus perméable et contient également une nappe souterraine, confondue avec les alluvions postglaciaires. En raison notamment de pollutions aux pesticides, le puits communal des Nageux (coord. 568'572/209'780) n'est plus utilisé pour la production d'eau potable.

A Cressier, au pied du Coteau, on trouve également une nappe phréatique dans la continuité de la nappe des Nageux. L'épaisseur des graviers est de l'ordre de 5 à 8 m, avec des gradients hydrauliques plus élevés sous le vieux village. La nappe est exploitée pour la production d'eau potable par les puits communaux des Gouilles et du Devens.

Enfin, en direction de la Thielle, dans la partie centrale de la raffinerie de Cressier, un ancien bras de la Thielle a été comblé par du tout venant sur 10 m d'épaisseur, créant ainsi un drain perméable dans lequel sont implantés 7 puits de pompage de la raffinerie destinés à rabattre le niveau de la nappe pour éviter toute propagation de polluant. Dans ce secteur, l'influence thermique de la raffinerie (rayonnement conductif principalement) se fait sentir par un réchauffement moyen de la nappe de 2.5 °C. Dans ce secteur, il devrait donc être possible d'exploiter de manière équilibrée la nappe avec un refroidissement (ΔT) de 2.5 °C.

Le potentiel théorique a été calculé par modélisation de la surface d'influence thermique au moyen du logiciel GED. Pour tenir compte de la disposition des graviers, perpendiculaires au flux de la nappe à la gare de triage à Cornaux et au nord de celle-ci, le potentiel exploitable a été ajusté à la hausse par rapport à la première méthode.

Tableau 4.30. Potentiel d'exploitation de la nappe des Nageux à Cornaux et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DE CORNAUX ET DE CRESSIER Communes de Cornaux et de Cressier			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes de Cornaux et de Cressier (2009)	$D_{th\ tot}$	59.33	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	23.30	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	1.42	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$
Besoins totaux des communes de Cornaux et de Cressier pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	2.4	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	6.0	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl} \cdot COP / COP-1$	0.0	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$

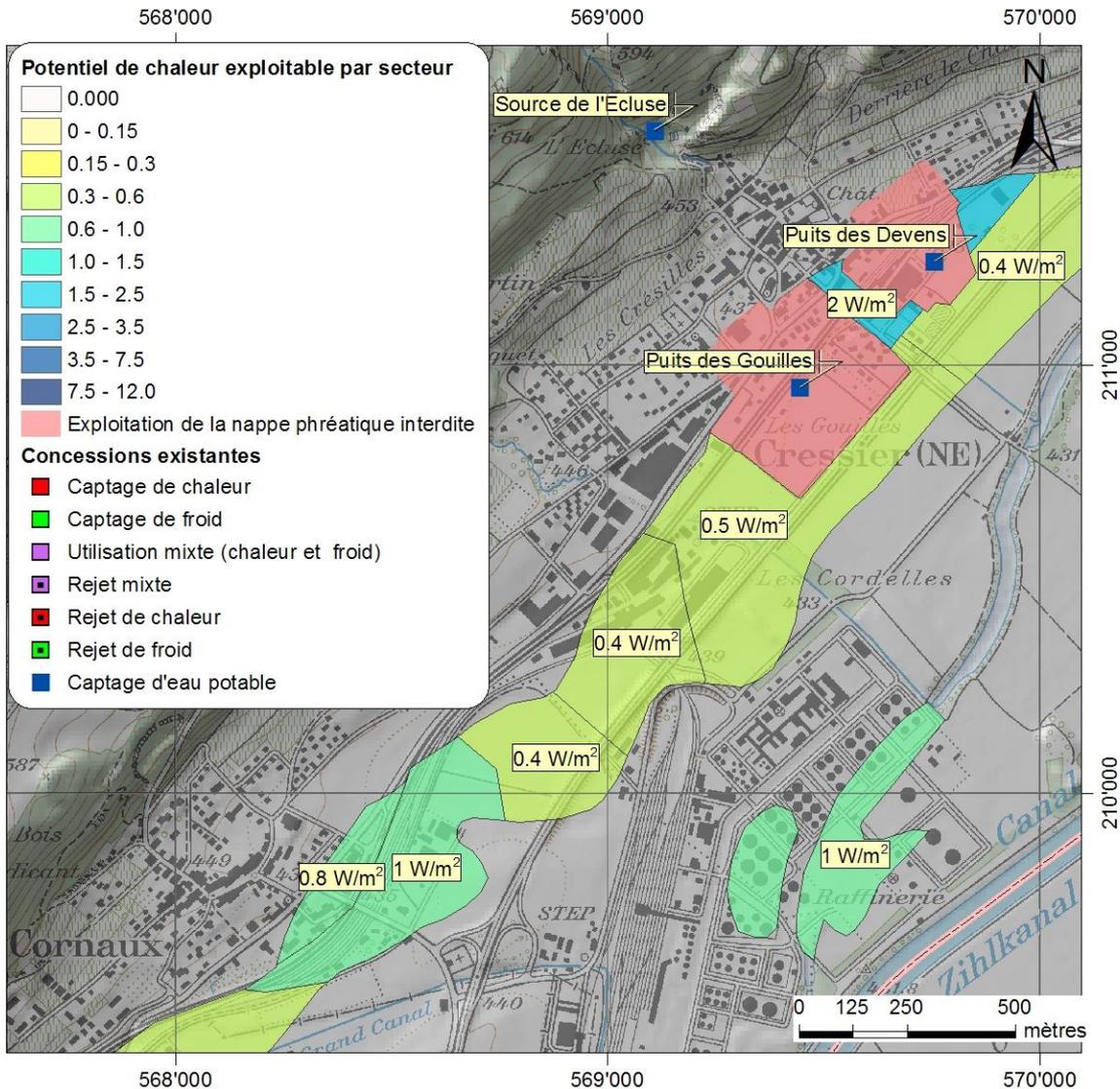


Figure 4.13. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Cornaux et de Cressier. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

La superficie totale des nappes exploitables est estimée à 862'820 m². La puissance totale exploitable (en cas de production de chaleur uniquement) est de 571 kW, soit 210 kW pour la nappe des Nageux, 253 kW pour la nappe de Cressier et un minimum de 108 kW pour le remblai situé sous la raffinerie.

Ce potentiel permettrait de produire 1.42 GWh_{th}·an⁻¹. Mise à part la nappe des remblais de la raffinerie, peu valorisable, une bonne adéquation des besoins avec la ressource peut être observée, car 39 % des utilisateurs potentiels sont situés à l'aplomb de la nappe. La ressource est cependant limitée et ne permet de répondre qu'à 6.0 % des besoins des utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m. Actuellement, cette ressource thermique n'est pas exploitée.

Concernant la gestion de l'exploitation, on peut faire les remarques suivantes :

- La ressource étant de faible extension, les questions de production d'eau potable sont absolument prioritaires et aucune dérogation à la réinfiltration des eaux dans la nappe ne pourra être accordée. De plus, avant d'envisager l'exploitation thermique de la nappe, on devra regarder attentivement avec les communes concernées, les secteurs devant être réservés à une future exploitation pour la production d'eau potable.

- Le puits communal de la nappe des Nageux n'est plus utilisé en raison de la présence de micropolluants. Les possibilités de développer un réseau de distribution d'eau technique pour PAC pourrait être examinées.
- Dans de nombreux secteurs, les premiers mètres du sous-sol sont constitués de tourbe. Il faudra prendre garde à maintenir un niveau de la nappe suffisant pour garantir la stabilité du milieu construit.

4.3.15 Nappe du Landeron

Au Landeron, se trouvent, en bordure de coteau, des dépôts de moraine graveleuse ne dépassant pas 4 à 5 m d'épaisseur, moyennement perméables et contenant de l'eau souterraine. Les caractéristiques de la nappe sont mal connues, mais le potentiel est probablement limité (Figure 4.14).

Vers l'est, on trouve également des graviers fluvioglaciers et des systèmes d'alluvions deltaïques déposés par les ruisseaux du versant (la Vaux, le Merdasson, la Scie). Ces niveaux sont parfois confinés par des limons et la présence de fer dissous et manganèse peut être observée; ce qui peut se révéler problématique pour l'utilisation thermique des eaux souterraines. En bordure de lac, les nappes périalacustres peuvent être trouvées dans des remblais. Ces dernières sont en étroite relation avec les eaux du lac.

Le potentiel théorique a été calculé par modélisation de la surface d'influence thermique au moyen du logiciel GED.

Tableau 4.31. Potentiel d'exploitation de la nappe du Landeron et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DU LANDERON Commune du Landeron			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur la commune du Landeron (2009)	$D_{th\ tot}$	40.11	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	18.11	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	0.20	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune du Landeron pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.5	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	1.1	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP / COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

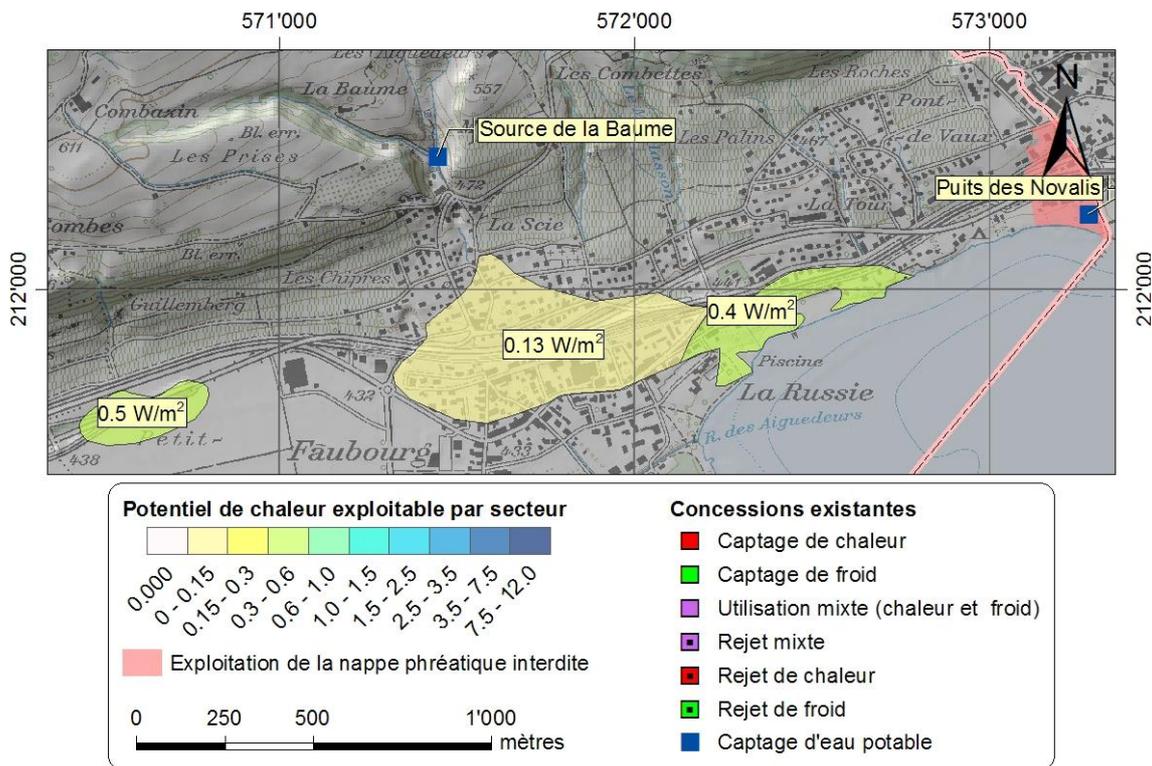


Figure 4.14. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe du Landeron. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

La superficie totale des nappes exploitables est estimée à 354'130 m². La puissance totale exploitable (en cas de production de chaleur uniquement) est limitée à 81 kW et devrait permettre de produire 0.20 GWh_{th}·an⁻¹. Actuellement, cette ressource thermique n'est pas exploitée.

Concernant la gestion de l'exploitation, on peut faire les remarques suivantes :

- La ressource potentielle est située en secteur urbain et il y a, par conséquent, peu de chances que les eaux souterraines soient un jour utilisées pour la production d'eau potable. Il n'y a donc en principe pas de limitation à l'exploitation thermique de la ressource.
- Au vu de la faible épaisseur de la nappe et des perméabilités relativement faibles, l'exploitation de la nappe ne pourra probablement se faire que pour des installations de faible puissance et exploitées par des immeubles ou par des groupes d'immeubles.

4.3.16 Nappe de Lignières

À l'est du village de Lignières, la présence d'alluvions et de dépôts fluvioglaciers peut être observée. Ils contiennent une nappe souterraine limitée (Figure 4.15). Cette nappe est en partie exploitée pour la production d'eau potable par le puits communal des Fèves. Ce dernier est implanté dans 20 m de graviers propres. La nappe s'étend probablement vers le sud-est, sous la gravière et le circuit de Lignières.

Le potentiel théorique a été calculé par modélisation de la surface d'influence thermique au moyen du logiciel GED. Cependant, très peu d'informations sur les caractéristiques de la nappe et son extension de même que sur les possibilités de rencontrer une nappe exploitable sont disponibles. Le calcul du potentiel comporte, par conséquent, une très grande incertitude.

Tableau 4.32. Potentiel d'exploitation de la nappe de Lignières et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DE LIGNIERES Commune de Lignières			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur la commune de Lignières (2009)	$D_{th\ tot}$	14.90	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	0.22	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	0.80	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune de Lignières pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	5.3	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	100	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP / COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

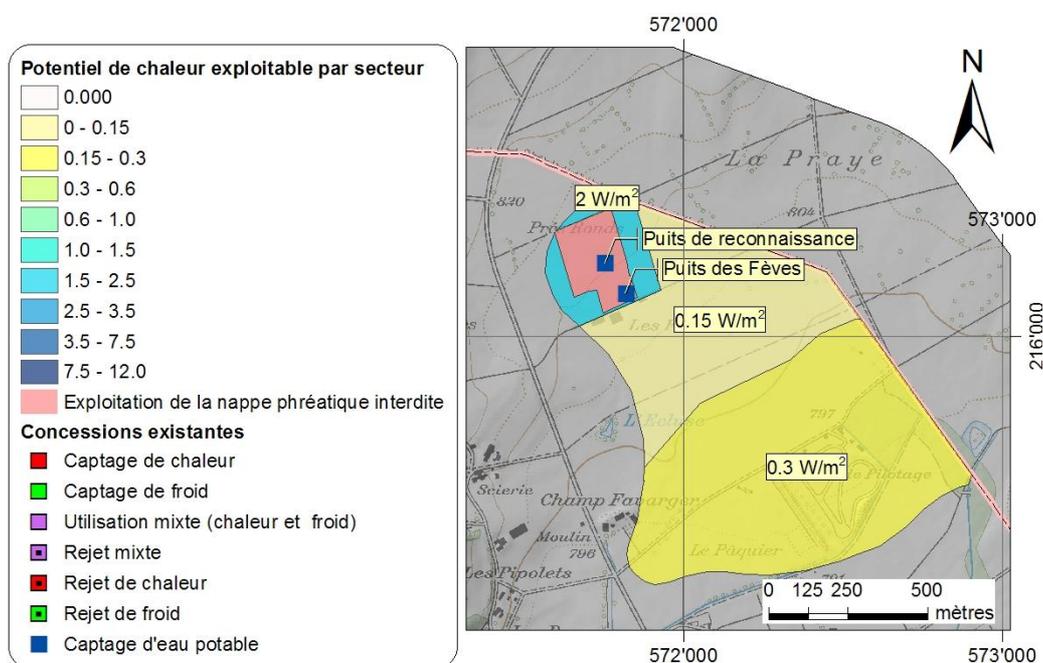


Figure 4.15. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de Lignières. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W\cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

En principe, la superficie de la nappe exploitable est estimée à 918'740 m². La puissance exploitable (en cas de production de chaleur uniquement) est estimée à 322 kW et devrait permettre de produire 0.80 $GWh_{th}\cdot an^{-1}$. Actuellement, cette ressource thermique n'est pas exploitée.

La ressource est située hors des zones habitées. La demande à proximité de la nappe est faible et inférieure au potentiel de production de la nappe. Il faut également souligner que les besoins en chaleur du village sont déjà satisfaits par un réseau de chauffage à distance au bois. La ressource n'est donc pas ou peu valorisable.

Malgré tout, l'exploitation de la nappe pourrait permettre d'alimenter quelques bâtiments, comme les bâtiments du circuit et les infrastructures du camping, 200 m au sud. De plus, la demande pourrait augmenter dans ce secteur, car un projet de zone industrielle est actuellement à l'étude. La ressource potentielle étant très mal connue, il est recommandé de préciser, avant toute chose, le potentiel par une étude de détail.

4.3.17 Nappe libre des Prés-Royer

Généralités

A l'extrémité nord-est du Val-Ruz, le fond du vallon est constitué par des alluvions graveleuses, formés par les anciens cônes de déjection imbriqués du Torrent et du Seyon limité (Figure 4.16). Cette nappe superficielle ou nappe « libre » constitue la plus importante ressource en eau souterraine de faible profondeur du Val-de-Ruz. Elle est exploitée dans le secteur des Prés-de-Sauges, peu avant la scierie Debrot, par plusieurs captages d'eau potable appartenant aux communes de Dombresson, Cernier, Chézard-St-Martin et Savagnier.

L'utilisation thermique potentielle de la nappe libre des Prés-Royer s'étend sur les communes de Dombresson et Savagnier. La nappe présente de fortes variations d'épaisseur (0 à 13 m) et les graviers perméables sont disposés en chenaux. La disposition des chenaux a été reconnue par reconnaissances géophysiques. L'épaisseur moyenne de la nappe est estimée entre 4 à 5 m. Vers l'est du village de Dombresson, l'épaisseur des graviers diminue et les possibilités de captage se font plus rares. Si les caractéristiques de la nappe sont bien connues à proximité des puits de captage, peu d'informations sont disponibles dans le secteur amont de la nappe.

La nappe libre des Prés-Royer surmonte un aquifère plus profond, captif, artésien et également exploité pour la production d'eau potable. Il est constitué de niveaux de graviers fluvioglaciaires entre 20 et 30 m de profondeur, séparés de la nappe supérieure par plusieurs mètres de limons argileux. L'exploitation de la nappe captive des Prés-Royer n'est pas envisagée ici. Il est, en effet, considéré que contrairement à l'exploitation de la nappe libre, l'exploitation thermique de la nappe captive comporte un risque pour la ressource en eau potable.

Méthode utilisée pour le calcul du potentiel théorique

Le potentiel théorique a été calculé au moyen du logiciel GED, par modélisation de la surface d'influence thermique (variation de la température moyenne de la nappe ≥ 1 °C après 30 ans d'exploitation) et calcul des puissances unitaires par secteurs équivalents (Tableau 4.1). Les eaux de surface (le Seyon, le Torrent) ont un rôle limité dans l'alimentation ou le drainage de la nappe. Il n'y a donc pas d'effet de dilution par les cours d'eau dans la propagation des rejets thermiques vers l'aval de la nappe.

Caractéristiques de la nappe

Les caractéristiques de la nappe libre des Prés-Royer sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.33. Caractéristiques générales de la nappe libre des Prés-Royer avec liste des paramètres hydrauliques représentatifs, utilisés notamment pour le calcul du potentiel théorique.

NAPPE LIBRE DES PRES-ROYER Communes de Dombresson, Villiers et Savagnier			
Paramètres de la nappe			
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	633'370	m ²
Altitude moyenne		735	m.s.m.
Profondeur du niveau de la nappe en basses eaux	P ₁	1-3	m
Profondeur de la base de l'aquifère	P ₂	4-10	m
Epaisseur estimée de la nappe (zone saturée)	e	4-5	m
Perméabilité	K	5•10 ⁻⁴ à 5•10 ⁻³	m•s ⁻¹
Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement	Φ	0.2	(-)
Gradient hydraulique moyen	i	0.6	%

Potentiel d'exploitation théorique

Tableau 4.34. Potentiel d'exploitation théorique de la nappe libre des Prés-Royer.

NAPPE LIBRE DES PRES-ROYER Communes de Dombresson, Villiers et Savagnier			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h/an			
Puissance unitaire exploitable, moyenne sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	P_u	0.62	$W \cdot m^{-2}$
Surface totale exploitable à des fins thermiques	S	633'370	m^2
Puissance minimale exploitable sur l'ensemble de la nappe ⁽¹⁾	$P_{tot} = P_u \cdot S$	0.39	MW
Energie thermique exploitable annuellement sur l'ensemble de la nappe	$E_{tot} = P_{tot} \cdot 2'000h$	0.78	$GWh \cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP-1$	0.98	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	$E_{frig,tot} = E_{tot}$	0.78	$GWh_{frig} \cdot an^{-1}$
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	$E_{tot,rech}$	1.56	$GWh \cdot an^{-1}$
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	1.76	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$

(1) Puissance soutirée à la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.

(2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.

(3) Production de froid par installation de type freecooling.

(4) Installation standard. Somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

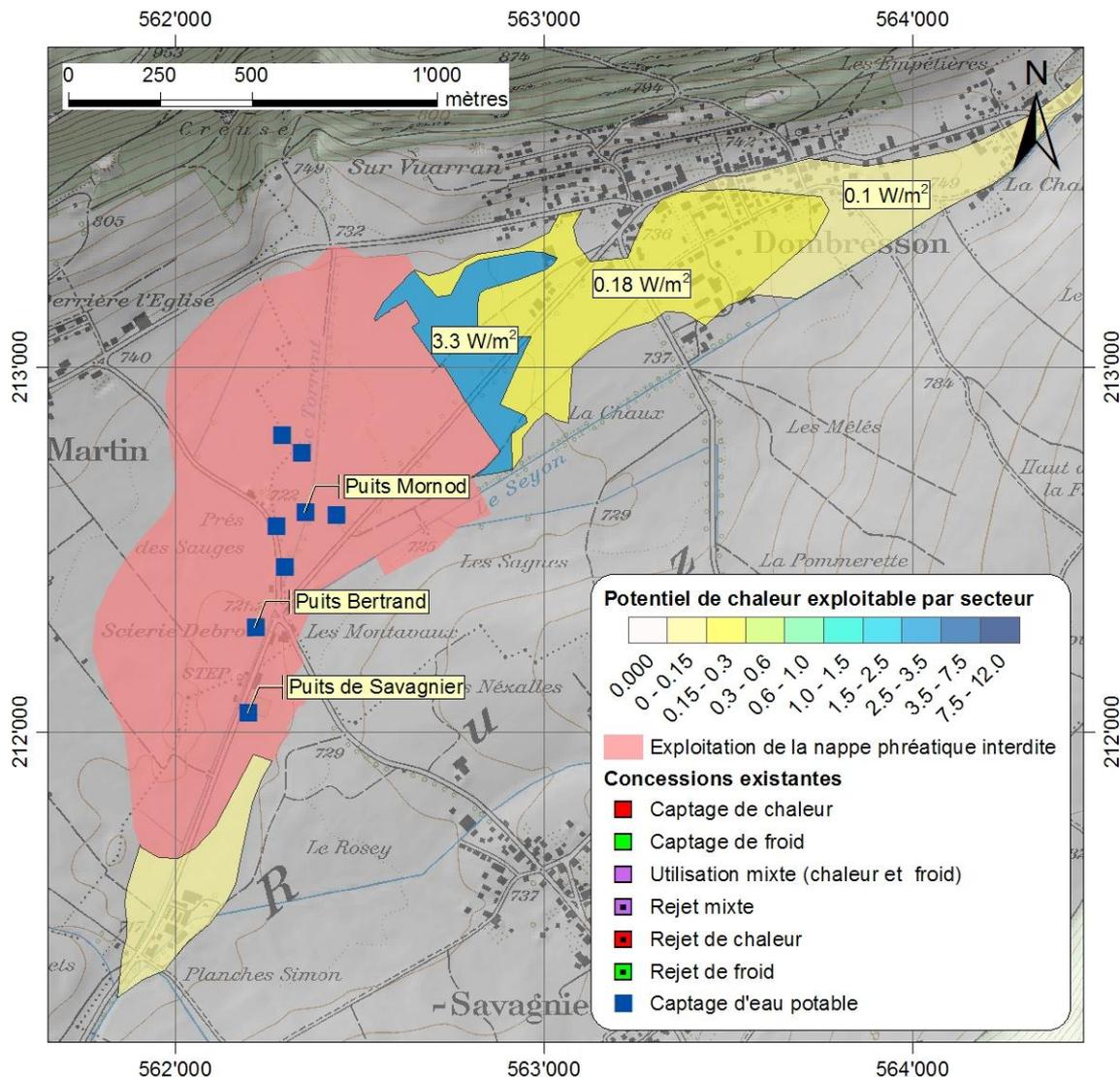


Figure 4.16. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe libre des Prés-Royers. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

Les secteurs favorables sont localisés vers la limite amont des zones de protection, là où on trouve la plus grande épaisseur de graviers et les meilleures perméabilités. A l'amont de la nappe, les ressources sont probablement très limitées, de même que dans le secteur de la Rincieure.

La puissance moyenne exploitable sur l'ensemble de la nappe est estimée à $0.62 W \cdot m^{-2}$; ce qui permet théoriquement de soutirer $0.78 GWh \cdot an^{-1}$ sans recharge. Dans le cas où l'on considère une recharge saisonnière par production de froid en été, l'énergie exploitable sera en principe de $1.56 GWh \cdot an^{-1}$.

Etat de l'exploitation en 2009

En 2009, aucune installation thermique sur la nappe libre des Prés-Royer n'est recensée.

Développement et gestion de l'exploitation

Tableau 4.35. Potentiel d'exploitation de la nappe libre des Prés-Royer et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE LIBRE DES PRES-ROYER Communes de Dombresson, Villiers et Savagnier			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur l'ensemble des communes de Dombresson, Villiers et Savagnier (2009)	$D_{th\ tot}$	38.59	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	14.64	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par utilisation de la nappe libre des Prés-Royer	$E_{th,tot}$	0.98	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux des communes de Dombresson, Villiers et Savagnier pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	2.5	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	6.6	%
Besoins en chaleurs déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP/COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

La confrontation des besoins avec la ressource indique que :

- Les utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource représentent 38 % de la demande en chaleur des trois communes de Dombresson, Villiers et Savagnier.
- Cependant, le potentiel de la nappe est limité et ne pourra répondre qu'à 6.6 % des utilisateurs potentiels, pour une production de chaleur de 0.98 $GWh_{th}\cdot an^{-1}$.
- Les secteurs les plus favorables sont situés à l'ouest de Dombresson, en dehors des zones construites. Dans ces secteurs, à proximité de la route cantonale, la création d'ouvrages individuels de puissance moyenne, voire la création d'un réseau de distribution d'eau technique communal, pourraient être envisagées, pour autant qu'il y ait l'assurance de ne pas modifier les écoulements en direction des captages communaux. Cette condition et exigence doit être garantie.
- Plus à l'est, dans le village de Dombresson, la ressource est limitée et ne devrait permettre, dans les cas favorables, que la réalisation d'installations individuelles et de faible puissance.

Limitations du potentiel d'exploitation

La ressource en eau potable des nappes libres et captives des Prés-Royer permet d'alimenter la quasi totalité du Val-de-Ruz. Cette ressource doit être absolument préservée et, en cas d'exploitation thermique intensive de la nappe, l'influence thermique sur les captages communaux situés à l'aval des écoulements souterrains doit être maîtrisée.

A terme, l'exploitation thermique de cette nappe devrait être développée. L'établissement d'un modèle de simulation numérique de la thermique de la nappe pourrait être envisagé, afin de gérer la ressource en eau souterraine dans sa totalité (exploitation thermique et eau potable).

Sur la base des forages réalisés et des analyses chimiques disponibles, le risque de rencontrer des eaux peu oxygénées et incrustantes est passablement élevé, en particulier dans le secteur de la Rincieure.

4.3.18 Graviers fluvioglaciaires de l'Ouest du Val-de-Ruz

Les plateaux de Coffrane et les hauts de Valangin (Figure 4.17) sont constitués de cordons de graviers (moraines de retraits et graviers fluvioglaciaires). Lorsque les graviers sont saturés en eaux, ils sont en partie exploités pour la production d'eau potable (captages de Bussy, Sorgereux, Paulière, les Vernes). La ressource est limitée et le plus souvent située en zone de protection des eaux. Dans ces conditions, ces réservoirs aquifères n'ont, pour la plupart, pas été considéré dans l'étude du potentiel. Les seules ressources considérées sont des nappes mal localisées, peu connues, à savoir :

- Sur le plateau de Bioley à Boudevilliers : graviers fluvioglaciaires ou moraine graveleuse de perméabilité faible à moyenne. Les caractéristiques de la ressource ne sont pas connues.
- Au sud de Coffrane, Champs de Serroue : graviers intramorainiques abritant une nappe phréatique reconnue par sondages entre 20 et 35 m de profondeur. La nappe est située au Nord de la décharge contrôlée de Serroue.

Le potentiel théorique a été calculé par modélisation de la surface d'influence thermique au moyen du logiciel GED. Cependant, nous disposons de très peu d'informations sur les caractéristiques des nappes, sur leur extension, de même que sur les possibilités de rencontrer une nappe exploitable. Le calcul du potentiel comporte une très grande incertitude.

Tableau 4.36. Potentiel d'exploitation des nappes des graviers fluvioglaciaires de l'Ouest du Val-de-Ruz et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DES GRAVIERS FLUVIOGLACIAIRES DE L'OUEST DU VAL-DE-RUZ Communes de Boudevilliers et Coffrane			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur les communes de Boudevilliers et de Coffrane (2009)	$D_{th\ tot}$	24.00	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	0.71	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation des nappes	$E_{th,tot}$	0.17	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux des communes de Boudevilliers et de Coffrane pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.7	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	23	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP / COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

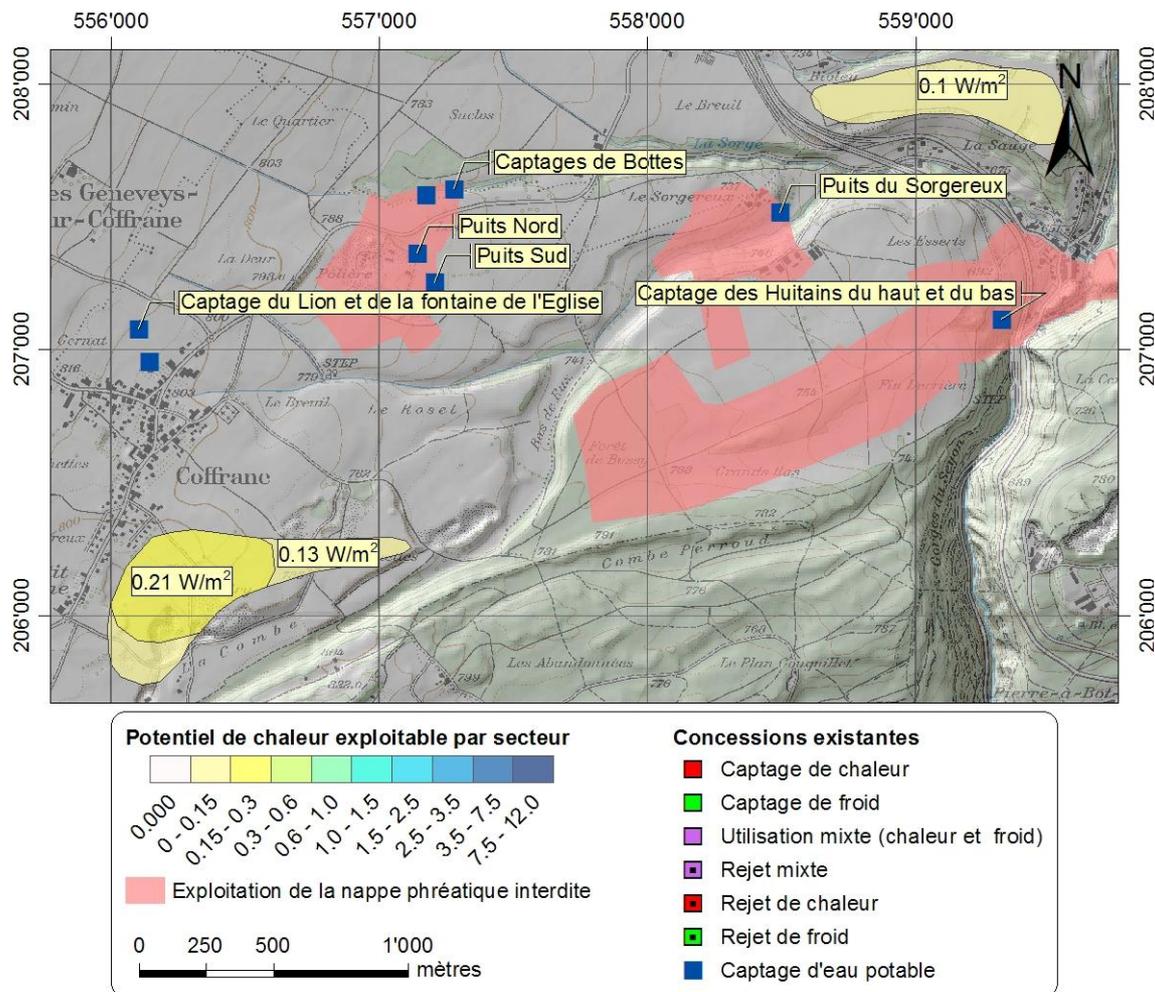


Figure 4.17. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique des nappes des graviers fluvioglaciaires de l'Ouest du Val-de-Ruz. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

L'extension des nappes en principe exploitables est de $459'400 \text{ m}^2$. La puissance exploitable (en cas de production de chaleur uniquement) est très faible et probablement limitée à 69 kW et devrait permettre de produire $0.17 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$. Actuellement, cette ressource thermique n'est pas exploitée.

La ressource est située hors des zones habitées. En principe, seuls les quartiers de villas au sud de Coffrane et des fermes isolées pourraient être intéressés par l'utilisation de cette ressource.

La profondeur de forage nécessaire est importante et peut représenter une limitation financière à la réalisation de captages individuels. L'exploitation thermique de la nappe devrait donc se faire par groupes de villas. Compte tenu de la proximité de décharges contrôlées, il faudra également porter une grande attention à la qualité des eaux pompées.

4.3.19 Nappe du Marais à la Sagne

Le fond de la vallée de la Sagne est constituée de molasse sablo-argileuse et de moraine de fond, formations toutes deux peu perméables et recouvertes de tourbe. Au débouché de la Combe des Cugnets, se trouvent des niveaux de graviers formant le cône de déjection des Cugnets et qui occupent le fond de la vallée sur une surface de 1.2 km² (Figure 4.18). L'épaisseur des graviers, moyennement à faiblement perméables, ne dépasse pas 8 m (5 m en moyenne). La nappe est exploitée au puits du Marais pour la production d'eau potable de la commune de la Sagne. En complément, une nappe de très faible extension est observée plus au sud dans le secteur de Marmoud.

Le potentiel théorique a été calculé par modélisation de la surface d'influence thermique au moyen du logiciel GED. Cette approche a été ajustée avec le calcul du débit exploitable de Matthey (1992).

Tableau 4.37. Potentiel d'exploitation des nappes de La Sagne et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DU MARAIS A LA SAGNE Commune de la Sagne			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur la commune de La Sagne (2009)	$D_{th\ tot}$	20.82	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	3.53	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation des nappes	$E_{th,tot}$	0.37	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune de La Sagne pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	1.7	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	10.4	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP/COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

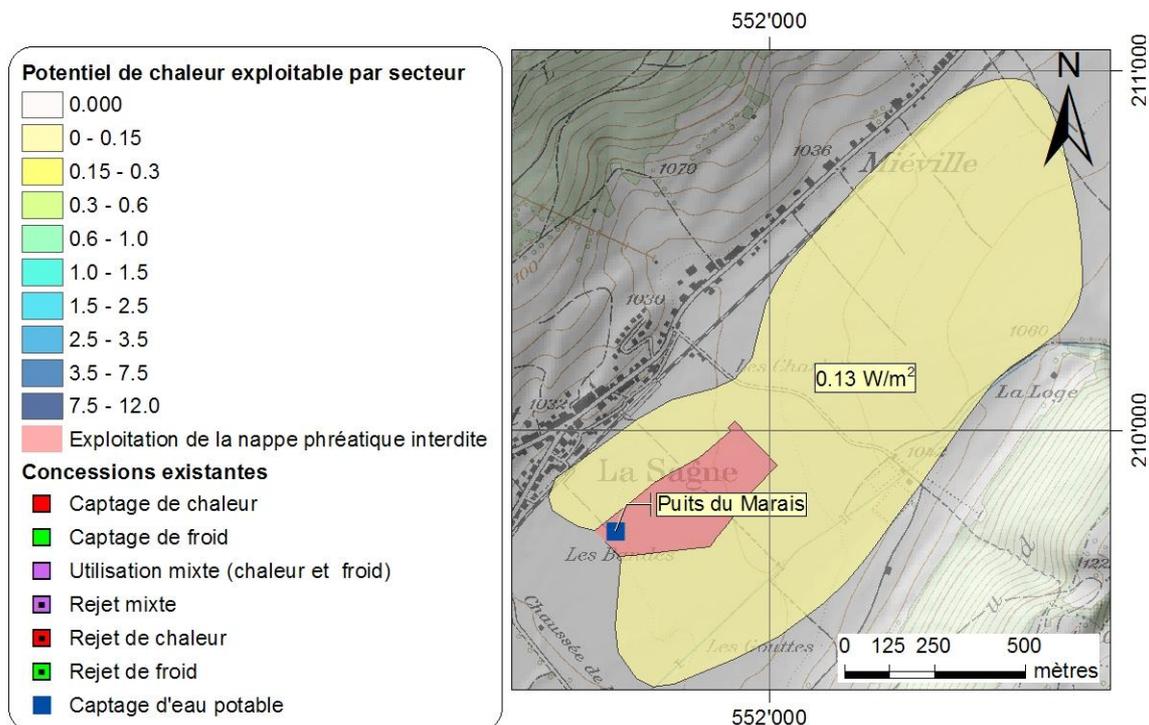


Figure 4.18. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe des Marais à La Sagne. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

D'après les conclusions de Matthey (1992), il semble que le potentiel de captage de la nappe des Marais ne soit pas exploité totalement et que les prélèvements de la commune (débit annuel moyen de $130 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) ne représentent que 6 % de la ressource. Sur cette base, la puissance théorique exploitable serait de 420 kW. Cependant, le potentiel réellement exploitable est inférieur à cette valeur car :

- L'exploitation de l'ensemble de la ressource est techniquement délicate, d'autant plus que la qualité des eaux pour l'utilisation thermique n'est pas garantie (teneur en fer dissous) et qu'en cas de rencontre d'eau souterraine, les besoins en eau potable devraient être satisfaits en priorité.
- La nappe est fortement influencée par les eaux de surface et la température descend occasionnellement jusqu'à $3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le potentiel exploitable a donc été divisé par trois, afin de tenir compte des remarques précédentes. En cas de production de chaleur uniquement, la puissance des nappes de la Sagne est donc limitée à 150 kW et devrait permettre de produire $0.37 \text{ GWh}_{\text{th}} \cdot \text{an}^{-1}$. Actuellement, cette ressource thermique n'est pas exploitée.

En principe, on pourrait envisager d'exploiter la nappe à l'amont du puits communal dans le secteur de Miéville, à condition de garantir la préservation de la ressource en eau potable et de trouver des eaux de température et de qualité suffisante.

4.3.20 Nappe des Brenets

A l'extrémité de la plaine du Goudebas, vers la sortie des gorges de la Rançonnière, des forages réalisés par Burger (1992) ont mis en évidence une poche d'alluvions graveleuses très peu étendue, capable de fournir des débits de l'ordre de $300 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Les analyses chimiques ont démontré la présence d'eaux réductrices, chargées en fer. De fait, la ressource n'est pas exploitable sans

traitement préalable et son éloignement par rapport au village est trop important. Le potentiel de la ressource est donc considéré comme nul.

Le puits des Goudebas est le captage communal d'eau potable de la commune des Brenets; il est alimenté par des calcaires à porosité de fissure s'étendant sous le village. A ce titre, la ressource n'est pas considérée comme une nappe phréatique. Le puits est actuellement exploité pour la production d'eau potable, mais la commune des Brenets souhaite l'abandonner en raison du coût de traitement de l'eau potable, de la contrainte des zones de protection des eaux en zone villageoise et de l'insuffisance des débits en été.

Si le captage est abandonné, l'utilisation thermique du puits des Goudebas pour alimenter un réseau d'eau technique communal (quelques immeubles) pourrait être envisagée, car il serait possible de renoncer aux procédés de traitement et utiliser les infrastructures actuelles. La capacité maximale du puits des Goudebas est de 1'000 l·min⁻¹, soit 200 kW. Un appoint devrait cependant être envisagé, car à l'étiage, le puits ne peut fournir que 150 l·min⁻¹, soit une puissance minimale de 31 kW.

4.3.21 Les nappes de la Ville du Locle

Le fond de la vallée du Locle est constitué de formations tertiaires (calcaires et craies lacustres de l'Oehningien) abritant une nappe souterraine à porosité de fissure et d'interstice. Cette nappe de l'Oehningien couvre une grande partie du sous-sol de la ville du Locle et peut atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Au centre de la vallée du Locle, la nappe est en charge sous des sédiments lacustres. L'exploitation thermique de cette nappe n'est actuellement pas jugée adéquate, car il s'agit d'une zone sourcière de grande extension, exploitée pour la production d'eau potable. Les zones de protection des eaux couvrent la quasi totalité de la ressource et en dehors de ces zones de protection, le risque de porter atteinte par forage aux captages communaux est jugé élevé. De plus, les chances de capter des venues d'eau par la réalisation d'un forage sont relativement faibles. Il est également important de ne pas dénoyer le terrain par un abaissement du niveau de la nappe, car les bâtiments sont fondés sur pieux.

Comme alternative, le captage de sources, de remontées naturelles d'eaux artésiennes (appelées Bugnons ou Rondes) rencontrées lors de terrassements, peut être envisagé. La plupart des sources naturelles sont aujourd'hui soit captées soit récupérées par drainage généralement en bordure de vallée, mais également au centre ville, lorsque la couverture des terrains imperméables est mince. Le calcul du potentiel des zones sourcières, très difficilement réalisable, dépasse les objectifs de ce travail sur les nappes phréatiques de faible profondeur.

En raison des restrictions décrites ci-dessus, les conditions d'exploitation thermique de la nappe de l'Oehningien du Locle ne sont pas favorables. Quelques secteurs sont toutefois indiqués au centre ville (Figure 4.19), dans des secteurs où des graviers tardi- et postglaciaires de 2 à 3 m d'épaisseur, alimentés en partie par l'Oehningien en charge sont rencontrés.

Tableau 4.38. Potentiel d'exploitation de la nappe quaternaire du Locle et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPES DU LOCLE (QUATERNAIRE)			
Ville du Locle			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur la commune du Locle (2009)	$D_{th\ tot}$	137.70	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	39.53	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation des nappes	$E_{th,tot}$	0.16	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la commune du Locle pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.1	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	0.4	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP / COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

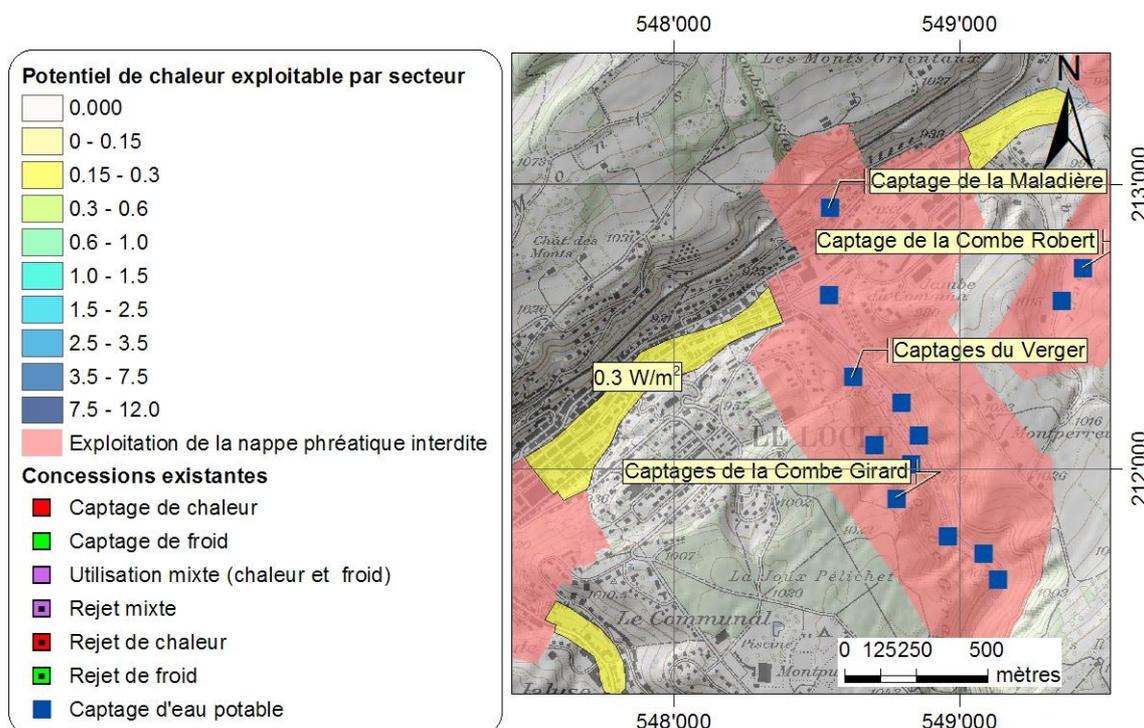


Figure 4.19. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique des nappes du Locle. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W\cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

Le potentiel exploitable des nappes du Locle est limité aux graviers quaternaires situés en dehors de zones de protection. Le potentiel des graviers est mal connu et vraisemblablement limitée à 64 kW et devrait permettre de produire 0.16 $GWh_{th}\cdot an^{-1}$. Actuellement, cette ressource thermique n'est pas exploitée. Le potentiel calculé est relativement conservatif, car il est également possible de compter avec une exploitation de l'Oehningien. Cependant, l'exploitation de ce dernier ne devrait se faire que par des captages de sources et de venues d'eau naturelles qui le drainent.

4.3.22 Les nappes de La Chaux-de-Fonds

Le fond de la vallée de La Chaux-de-Fonds est constitué d'une mince bande de formations tertiaires (pierre morte, craies lacustres et calcaires de l'Oehningien) d'une largeur de 150 m et sur une épaisseur de 10 à 70 m, reposant sur les marnes rouges imperméables de l'Helvétien (Figure 4.20). Même si quelques sondages ont permis de mettre en évidence la présence d'eau souterraine entre 6 et 8 m de profondeur, les formations sont probablement moins perméables dans l'ensemble à La Chaux-de-Fonds que dans la région du Locle. La nature des écoulements souterrains dans les craies lacustres et la pierre morte à porosité de fissure n'est pas connue, de même que les possibilités d'exploitation de cette ressource.

Au Crêt-du-Loche, la présence d'une nappe dans l'Oehningien en relation avec les captages de la ville du Locle a été reconnue, mais cette dernière n'est pas exploitable en raison des zones de protection des eaux. Au centre ville de La Chaux-de-Fonds, la ressource est probablement limitée et une phase d'exploration serait nécessaire pour définir le potentiel de manière plus précise. En cas de rencontre d'eau souterraine, l'exploitation thermique ne serait pas antagoniste à la production d'eau potable, car cette dernière serait difficilement envisageable en raison de la vulnérabilité de la ressource et de l'impossibilité d'appliquer des zones de protection.

En exploitant la ressource potentielle, il faudrait également prendre garde à préserver le débit de la Ronde. Une étroite relation de la nappe avec les eaux de la Ronde a été démontrée notamment lors d'un pompage dans un terrassement à la rue Léopold–Robert qui avait totalement asséché le ruisseau (Burger & Schaer, 1996). Une alternative, qui peut être envisagée, serait l'exploitation directe des eaux de la Ronde, ce qui est déjà partiellement le cas.

Tableau 4.39. Potentiel d'exploitation de la nappe de La Chaux-de-Fonds et couverture des besoins potentiels en énergie de chauffage.

NAPPE DE LA CHAUX-DE-FONDS La Chaux-de-Fonds			
Besoins en chaleur couverts par l'exploitation de la nappe, sans recharge			
Besoins en chaleur sur la ville de La Chaux-de-Fonds (2009)	$D_{th\ tot}$	475.00	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins de chaleur à moins de 100 m de la ressource exploitable (utilisateurs potentiels)	D_{th}	155.32	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe	$E_{th,tot}$	0.25	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$
Besoins totaux de la ville de La Chaux-de-Fonds pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th\ tot}$	0.05	%
Besoins des utilisateurs potentiels pouvant être couverts à terme par l'exploitation de la nappe	$E_{th,tot}\cdot 100 / D_{th}$	0.16	%
Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe en 2009	$E_{expl}\cdot COP / COP-1$	0.0	$GWh_{th}\cdot an^{-1}$

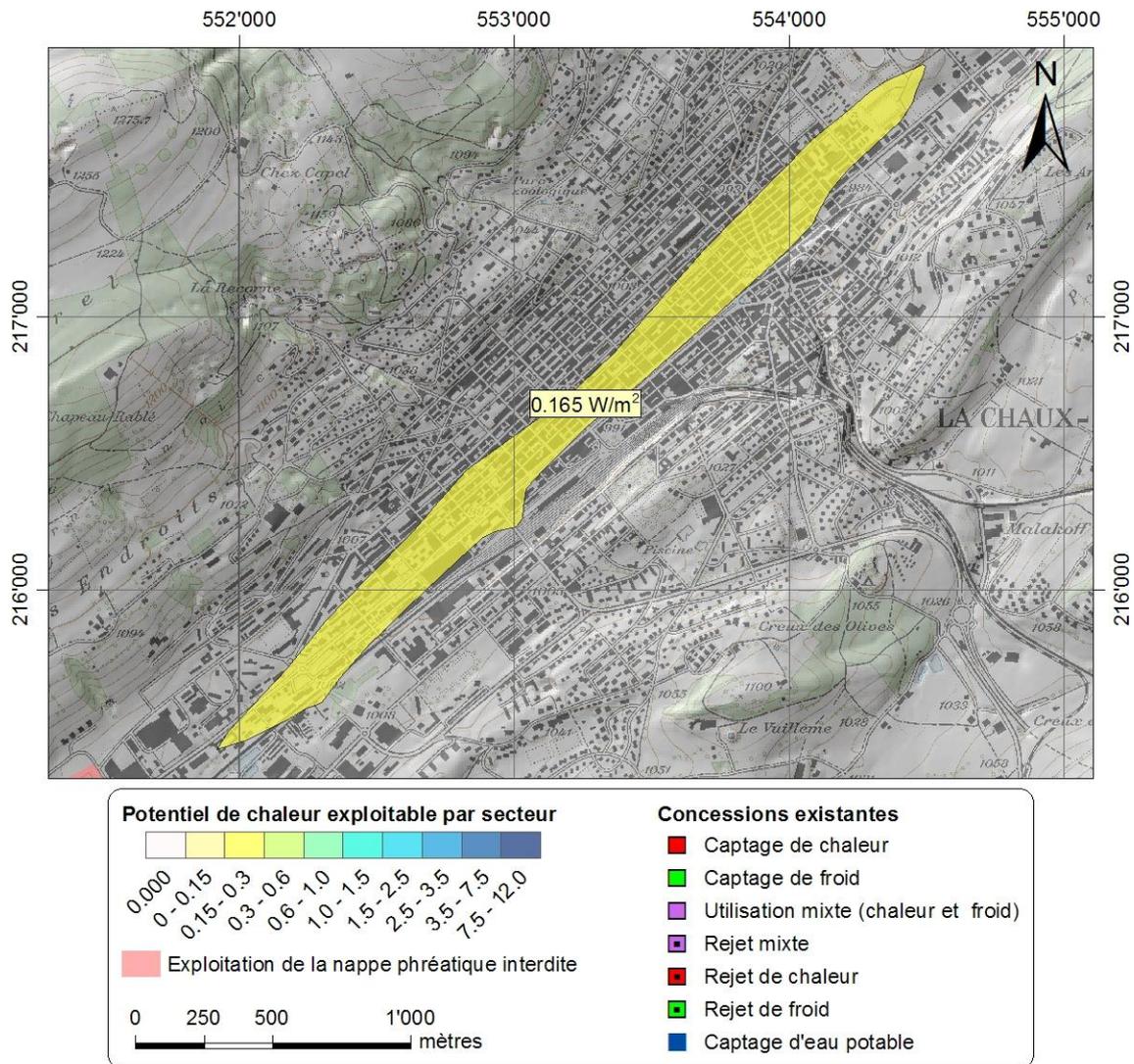


Figure 4.20. Carte définissant le potentiel d'exploitation thermique de la nappe de La Chaux-de-Fonds. Le potentiel de chaleur exploitable est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, sans recharge saisonnière.

Le potentiel de la nappe est donc très mal connu. L'application des méthodes décrites dans le point 4.4 n'est pas envisageable en raison de la double porosité du milieu et de la présence d'écoulements à grande vitesse (300 m/j) mesurés parfois dans l'Oehningien de La Chaux-de-Fonds. Dans une estimation grossière, nous considérons que la puissance exploitable des nappes de La Chaux-de-Fonds est limitée à 100 kW et devrait permettre de produire $0.25 \text{ GWh}_{th} \cdot \text{an}^{-1}$ soit 0.16 % de la demande potentielle située à moins de 100 m de la ressource. Actuellement, cette ressource thermique n'est pas exploitée. Le potentiel calculé est relativement conservatif et il faut retenir que l'incertitude de calcul est très importante.

4.4 Synthèse et conclusions

4.4.1 Potentiel communal exploitable

Au total, 27 communes sont concernées par une future exploitation thermique des nappes phréatiques. Dans le Tableau 4.40, une estimation du potentiel de la ressource en termes de production potentielle de chaleur est présentée. Le potentiel de la ressource est également comparé aux besoins théoriques en énergie de chauffage sur l'ensemble de la commune, ainsi qu'à la demande potentielle en énergie de chauffage située à moins de 100 m de la ressource.

Les valeurs données dans ce tableau doivent permettre à chaque commune de prendre conscience du potentiel exploitable sur le territoire communal. Comme les potentiels sont calculés pour la production de chaleur uniquement et en ne considérant pas de recharge thermique saisonnière, les valeurs fournies doivent être considérées comme un minimum absolu.

Les communes les mieux dotées en matière de ressources exploitables sont les communes de Val-de-Travers, Neuchâtel, Cortaillod, Boudry, Colombier et Gorgier. Dans toutes ces communes, la ressource peut être entièrement valorisée, puisque la demande potentielle dépasse la capacité de la nappe.

Pour les autres communes, le potentiel de la ressource est modeste, de quelques dizaines de $\text{MWh}_{\text{th}} \cdot \text{an}^{-1}$ à près de $1 \text{ GWh}_{\text{th}} \cdot \text{an}^{-1}$ et permet de répondre à la demande de quelques pour mille jusqu'à 7.5 % (Vaumarcus) des besoins en énergie de chauffage des communes concernées.

Tableau 4.40. Potentiel d'exploitation des nappes phréatiques par commune et part théorique des besoins couverts.

EXPLOITATION THERMIQUE DES NAPPE PHREATIQUES DANS LE CANTON DE NEUCHÂTEL							
Potentiel d'exploitation calculé pour chaque commune du canton de Neuchâtel, par ordre d'importance de la ressource ⁽¹⁾							
Commune	Besoins en chaleur estimés sur l'ensemble de la commune (2009)	Demande potentielle située à moins de 100 m de la ressource exploitable	Puissance thermique exploitable sur l'ensemble des nappes de la commune ⁽²⁾	Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe ⁽³⁾	Pourcentage des besoins de la commune couverts à terme par l'exploitation de la nappe ⁽³⁾	Pourcentage des utilisateurs potentiels couverts à terme par l'exploitation de la nappe ⁽³⁾	Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe (2009)
	$D_{th\ tot}$	D_{th}	P_{tot}	$E_{th,tot}$	$\frac{E_{th,tot} \cdot 100}{D_{th\ tot}}$	$\frac{E_{th,tot} \cdot 100}{D_{th}}$	$E_{th,\ expl}$
	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	MW	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	%	%	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$
Val-de-Travers	185.04	119.00	4.67	11.67	6.3	9.8	0.52
Neuchâtel	344.09	127.44	1.98	4.96	1.4	3.9	0.61
Cortaillod	52.03	23.12	1.65	4.12	7.9	17.8	0.17
Boudry	55.94	27.29	0.97	2.41	4.3	8.8	0.00
Colombier	53.39	21.43	0.59	1.49	2.7	6.9	0.09
Gorgier	20.48	3.98	0.49	1.23	6.0	30.9	0.05
Dombresson	19.21	11.14	0.38	0.95	4.9	8.5	0.00
Hauterive	19.40	6.01	0.37	0.93	4.7	15.5	0.00
Cressier	30.54	16.03	0.34	0.85	2.7	5.3	0.00
Lignières	14.90	0.22	0.32	0.80	5.3	363.6	0.00
Saint-Aubin-Sauges	25.13	7.14	0.24	0.60	2.3	8.4	0.00
Cornaux	28.79	7.27	0.23	0.58	2.0	7.9	0.00
Bevaix	34.31	18.06	0.19	0.49	1.4	2.7	0.00
La Sagne	20.82	3.53	0.15	0.37	1.8	10.5	0.00
Saint-Blaise	35.87	15.92	0.11	0.29	0.8	1.8	0.02
Vaumarcus	3.59	0.70	0.11	0.27	7.5	38.6	0.00
La Chaux-de-Fonds	475.00	155.32	0.10	0.25	0.05	0.16	0.00
Le Landeron	40.52	18.00	0.08	0.20	0.5	1.1	0.00
La Tène	66.54	10.36	0.06	0.16	0.2	1.5	0.03

EXPLOITATION THERMIQUE DES NAPPE PHREATIQUES DANS LE CANTON DE NEUCHÂTEL
 Potentiel d'exploitation calculé pour chaque commune du canton de Neuchâtel, par ordre d'importance de la ressource ⁽¹⁾

Commune	Besoins en chaleur estimés sur l'ensemble de la commune (2009)	Demande potentielle située à moins de 100 m de la ressource exploitable	Puissance thermique exploitable sur l'ensemble des nappes de la commune ⁽²⁾	Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe ⁽³⁾	Pourcentage des besoins de la commune couverts à terme par l'exploitation de la nappe ⁽³⁾	Pourcentage des utilisateurs potentiels couverts à terme par l'exploitation de la nappe ⁽³⁾	Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe (2009)
	$D_{th, tot}$	D_{th}	P_{tot}	$E_{th, tot}$	$\frac{E_{th, tot} \cdot 100}{D_{th, tot}}$	$\frac{E_{th, tot} \cdot 100}{D_{th}}$	$E_{th, expl}$
	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	MW	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	%	%	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$
Le Locle	137.70	39.53	0.06	0.16	0.01	0.4	0.00
Coffrane	9.70	0.54	0.05	0.13	1.3	24.1	0.00
Auvernier	16.55	4.18	0.03	0.08	0.5	2.0	0.00
Bôle	16.13	3.37	0.03	0.07	0.4	2.1	0.00
Boudevilliers	14.25	0.16	0.02	0.05	0.3	28.4	0.00
Savagnier	13.40	0.90	0.01	0.02	0.2	2.6	0.00
Les Ponts-de-Martel	22.97	0.37	0.005	0.01	0.05	2.7	0.00
Villiers	5.98	2.59	0.003	0.006	0.1	0.3	0.00
TOTAL canton % moyen	1'762.27	643.60	13.25	33.12	1.9 %	5.2 %	1.49

(1) Les communes ne disposant pas de nappe phréatique exploitable comme ressource thermique ne figurent pas dans ce résumé.

(2) Potentiel minimal, sans recharge thermique saisonnière, 2'000 h·an⁻¹.

(3) Potentiel minimal, sans recharge thermique saisonnière, installation standard avec PAC conventionnelle COP=5, durée de fonctionnement 2'000 h·an⁻¹.

4.4.2 Potentiel cantonal et recommandations

L'examen détaillé de chacune des nappes phréatiques de faible profondeur du canton de Neuchâtel a permis d'estimer l'énergie thermique exploitable à long terme pour la production de chaleur.

Tableau 4.41. Potentiel d'exploitation théorique des nappes phréatiques du canton de Neuchâtel.

POTENTIEL DES NAPPES PHREATIQUES DU CANTON DE NEUCHÂTEL			
Potentiel d'exploitation avec production de chaleur uniquement 2'000 h·an⁻¹			
Surface totale des nappes exploitables à des fins thermiques	S	14'038'537	m ²
Puissance exploitable sur l'ensemble des nappes du canton de Neuchâtel ⁽¹⁾	P _{tot}	13.25	MW
Energie thermique exploitable annuellement ⁽¹⁾	E _{tot} =P _{tot} ·2'000h	26.50	GWh·an ⁻¹
Production potentielle de chaleur ⁽²⁾	$E_{th,tot} = E_{tot} \cdot COP / COP - 1$	33.12	GWh_{th}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation avec production de rafraîchissement uniquement			
Production potentielle de rafraîchissement ⁽³⁾	E _{frig,tot} =E _{tot}	26.50	GWh_{frig}·an⁻¹
Potentiel d'exploitation pour production combinée de chaleur et de froid			
Energie exploitable en cas de production de chaleur et de froid, bilan annuel équilibré par recharge thermique	E _{tot,rech}	52.98	GWh·an ⁻¹
Soit potentiel de production de chaleur et de froid ⁽⁴⁾	$E_{th,tot, rech} = E_{th,tot} + E_{frig,tot}$	≥ 59.62	GWh_{th}·an⁻¹

- (1) Production de chaleur uniquement, puissance fournie par la nappe, considérée à l'évaporateur de la PAC.
 (2) Installation standard avec PAC conventionnelle COP=5.
 (3) Production de froid par installation de type freecooling.
 (4) Installations standard. Somme de l'énergie produite avec PAC conventionnelle (COP=5) et freecooling en été.

La surface des nappes exploitables est de 14.03 km², soit un peu moins de 2 % de la surface totale du canton.

La production potentielle de chaleur (par pompe à chaleur avec un COP = 5 et 2'000 h·an⁻¹) sans recharge thermique de la nappe en été est estimée à 33.12 GWh_{th}·an⁻¹. L'exploitation thermique des nappes du canton devrait permettre également de produire du froid par des systèmes freecooling pour un total de 26.50 GWh_{frig}·an⁻¹.

En gérant la ressource de manière équilibrée et en admettant que la demande en froid équivaut à la demande de chaleur, l'exploitation du froid en été permettra de limiter, voire d'annuler l'impact à long terme sur la température des nappes. Dans ce cas, le potentiel d'exploitation sera considérablement augmenté et au moins égal à la somme des potentiels de production de chaleur et de froid pris séparément. L'exploitation équilibrée de la chaleur et du froid des nappes phréatiques avec recharge thermique saisonnière permettra de produire un minimum de 59.62 GWh·an⁻¹ de chaleur et de froid.

Tableau 4.42. Potentiel d'exploitation et couverture des besoins en production de chaleur du canton de Neuchâtel.

EXPLOITATION THERMIQUE DES NAPPE PHREATIQUES DU CANTON DE NEUCHÂTEL							
Potentiel d'exploitation cantonal							
Canton	Besoins en chaleur estimés sur l'ensemble du canton (2009)	Utilisateurs potentiels situés à moins de 100 m de la ressource exploitable	Puissance thermique exploitable sur l'ensemble des nappes du canton ⁽¹⁾	Production potentielle de chaleur par l'utilisation de la nappe ⁽²⁾	Pourcentage des besoins du canton couverts à terme par l'exploitation de la nappe ⁽²⁾	Pourcentage des utilisateurs potentiels couverts à terme par l'exploitation de la nappe ⁽²⁾	Besoins en chaleur déjà couverts par la nappe (2009)
	$D_{th\ tot}$	D_{th}	P_{tot}	$E_{th,tot}$	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th\ tot}$	$E_{th,tot} \cdot 100 / D_{th}$	$E_{th,\ expl}$
	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	MW	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$	%	%	$GWh_{th} \cdot an^{-1}$
TOTAL	2'123	656.6	13.25	33.12	1.5	5.0	1.49

(1) potentiel minimal, sans recharge thermique saisonnière, 2'000 h·an⁻¹

(2) potentiel minimal, sans recharge thermique saisonnière, installation standard avec PAC conventionnelle COP=5, durée de fonctionnement 2'000 h·an⁻¹

Sans recharge, l'énergie potentiellement produite par l'exploitation de la nappe reste modeste en regard des besoins en énergie de chauffage du canton (Tableau 4.41.) et représente au minimum 1.5 % des besoins totaux. En valorisant la ressource avec la production de froid en été ou avec recharge thermique, le potentiel de production de chaleur sera considérablement augmenté et il sera possible de s'affranchir des phénomènes de modification de la température des nappes à long terme. Dans le cas de la nappe de Fleurier (point 4.3.2), la démonstration a été faite que la production de chaleur, respectivement de froid, pouvait être multipliée par 3 en cas de recharge thermique saisonnière.

Enfin, dans le bilan de l'exploitation de la ressource thermique, il ne faut pas oublier de tenir compte de l'électricité consommée par les pompes à chaleur, estimée ici à 6.6 $GWh_{el} \cdot an^{-1}$ avec des coefficients de performance de 5. Là aussi, cette surconsommation électrique devrait être largement compensée par le gain énergétique en cas de remplacement de machines frigorifiques par l'utilisation du froid de la nappe en été.

En résumé, les recommandations suivantes peuvent être énoncées :

- Donner la possibilité à l'autorité concédante d'exiger contractuellement la recharge thermique de la nappe, afin d'augmenter l'énergie exploitable et de limiter les phénomènes de modification de la température des nappes à long terme.
- Contrôler (par l'Etat ?) l'exploitation de la ressource et en particulier les rejets thermiques de manière à garantir l'exploitation de la ressource de façon optimale et de ne pas limiter le développement d'installations futures.
- A l'échelle cantonale, cela peut se concrétiser par un octroi de concessions soumis à conditions (regroupement des utilisateurs ou des rejets), par la qualité de l'information délivrée aux utilisateurs et par l'encouragement donné au développement de l'exploitation centralisée des nappes.
- A l'échelle communale et privée, il faudrait chercher à exploiter ou à encourager le développement de réseau de distribution d'eau de nappe dans les secteurs les plus favorables.

Pour chaque nappe et chaque commune, le détail des recommandations et des possibilités de développement se trouve au point 4.3.

- Il est important d'insister sur les conditions particulièrement favorables et sur les grandes possibilités de développement de ce type d'exploitation dans les communes de Val-de-Travers (Fleurier, Boveresse, Môtiers), Cortaillod, Boudry, Colombier, Neuchâtel et Hauterive.
- En raison de la complexité du milieu souterrain, la connaissance du sous-sol et des nappes souterraines reste parfois lacunaire. Seule l'expérience accumulée par la prospection et les éventuels échecs rencontrés doit permettre de mieux connaître et gérer la ressource efficacement. A ce titre, il faut rappeler l'importance du rôle de coordination de l'Etat et de la mise à disposition d'outils performants pour mieux gérer la ressource (bases de données, modèles numériques).

4.5. Procédure d'autorisation et guide d'aide au dimensionnement

Les bases légales suivantes sont applicables pour l'exploitation hydrothermique des eaux souterraines :

- Loi sur la protection de l'environnement du 7 octobre 1983 (LPE, RS814.01)
- Loi fédérale sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (LEaux, RS 814.20)
- L'Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (OEaux, RS 814.201)
- Loi cantonale sur les eaux du 24 mars 1953 (LCE, RS 731.101)
- Loi cantonale sur la protection des eaux du 12 octobre 1984 (LCPE,805.10)

L'usage thermique des eaux souterraines est soumis à concession.

La demande de concession doit être précédée d'une étude faite sur le terrain. Le permis d'étude est accordé par le Département de la gestion du territoire sur la base d'une demande suffisamment détaillée.

La procédure en vigueur dans le canton de Neuchâtel est détaillée sur la figure suivante.

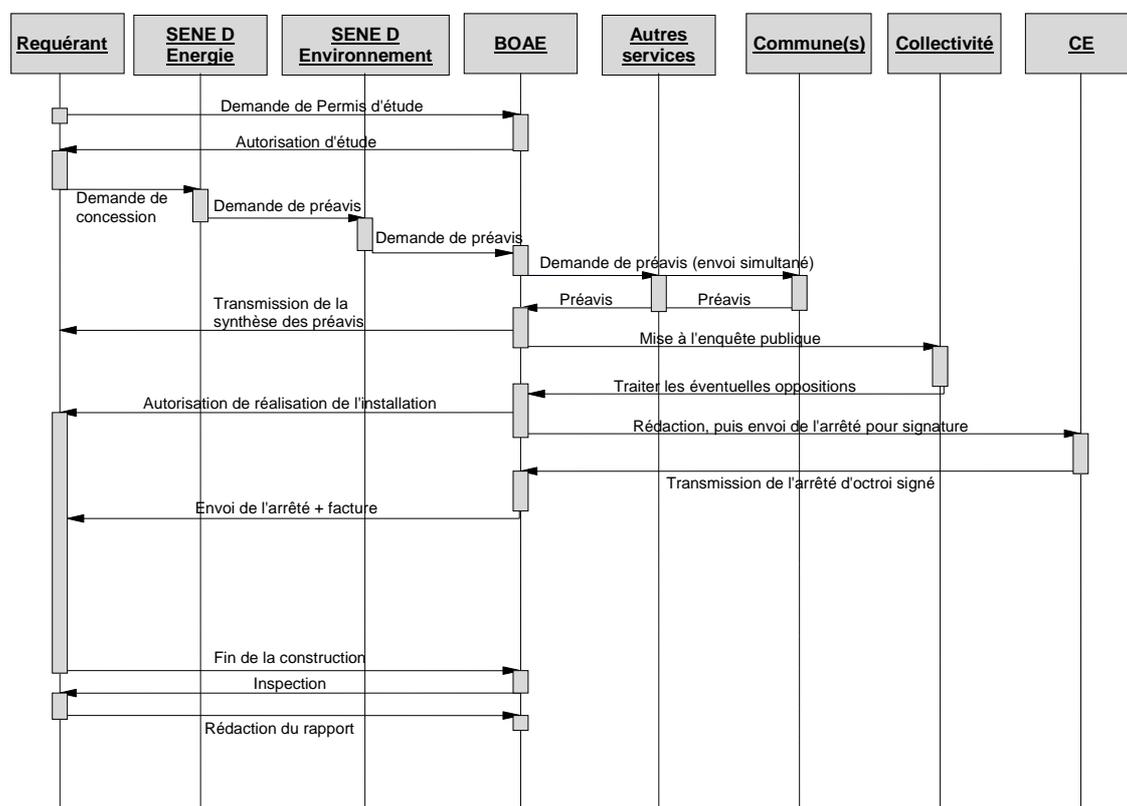


Figure 4.21. Procédure de demande de concession en vigueur dans le canton de Neuchâtel (source : BOAE). Abrév. SENE : Service cantonal de l'énergie et de l'environnement ; BOAE : Bureau des ouvrages d'art et de l'économie des eaux (Service ponts et chaussées). CE : Conseil d'Etat.

Une brochure intitulée « *Exploitation de la chaleur des nappes phréatiques de faible profondeur : guide d'aide au dimensionnement des ouvrages de petite dimension et procédures d'autorisation dans le Canton de Neuchâtel* » a été réalisée dans le cadre de ce programme (Annexe 4.1).

Ce guide d'aide au dimensionnement a pour objectif de promouvoir l'utilisation de la chaleur des nappes phréatiques et d'informer les utilisateurs (entreprises, propriétaires, professionnels actifs

dans le domaine de l'énergie, services de l'Etat) sur les principes généraux d'exploitation. Il fait état des procédures d'autorisation en vigueur dans le canton de Neuchâtel, donne quelques règles de dimensionnement et fait la synthèse des informations nouvellement disponibles à l'échelle du canton (cartes, documentation). Le document a été distribué aux participants aux séminaires PDGN (voir chapitre 7, Séminaires) et sera mis en ligne sur le portail du canton.

4.6. 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.
- BMIC SA, 1983. Ville du Locle. Surveillance de la nappe souterraine. Rapport sur les sondages et le système d'observation mis en place.
- BMIC SA, 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.
- BMIC SA, 1992. CFF Colombier-voie de dépassement. Notice d'impact hydrologique et hydrogéologique. Rapport intermédiaire du 30 juin 1992.
- BMIC SA, 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.
- BMIC SA, 1992. Commune de Fleurier. Recherche d'eau de consommation dans la nappe des Sugis-La Binrée. Rapport hydrogéologique.
- BMIC SA, 1992. Commune de la Sagne. Délimitation des zones de protection de la source de Marmoud et de la nappe du Marais.
- BMIC SA, 1996. Commune de Cortaillod. Détermination des zones de protection du puits de la Tertillère.
- BMIC SA, 2002. Immeubles Sous les vignes, Saint-Blaise, commentaire touchant à la nature des terrains et aux affaissements constatés. Rapport d'expertise.
- BMIC SA, 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.
- BMIC SA, 2005. Agrandissement du magasin Coop à Colombier - Neuchâtel. Impact résiduel des travaux sur le débit des sources des Fontaines de Colombier. Rapport Final.
- BMIC SA, 2006. ETEL SA. Captage d'eau souterraine pour l'alimentation d'une pompe à chaleur et le rafraîchissement des locaux. Rapport non publié.
- BMIC SA, 2009 : Freecooling en milieu urbain. Réseau de distribution d'eau de lac et d'eau souterraine pour couvrir les besoins en rafraîchissement et en chaleur des bâtiments- Etude de faisabilité pour la Ville de Neuchâtel- Suisse. Rapport intermédiaire du 23 décembre 2009.
- 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., 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., 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.
- 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.
- Grétillet 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, Chézard-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.
- Matthey 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.
- Matthey B., 1976. Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon. Thèse, université de Neuchâtel.
- 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.
- Nissille J.-C. & Tacher L., 1989. Délimitation des zones de protection du puits communal du Rafour : 25 p.
- OFEV, 2009. Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol, Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie, brochure, 53 pp.
- Pasquier F., 2005. Délimitation des zones de protection S du puits de Bois de Croix.
- 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.
- Schindler B., 1988. Commune de Cressier. Zone de protection des captages. Etude hydrogéologique.
- Vuataz F.-D., Matthey B., Affolter M., Peguiron E., Robert-Charrue C., & Wilhelm J., 2008. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel, vol. 1 Rapport final, vol. 2 annexes, 206 + 88 pp.

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.
- 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, 2009. Forages pour la pose de sondes géothermiques verticales répertoriés à l'échelle du canton. 150 forages avec descriptif.
- Université de Neuchâtel, 2000. Base de données SIG du Val-de-Travers. 136 forages répertoriés avec descriptif.

5. Potentiel des sources et des eaux de surface (SES)

5.1 Introduction et objectifs

Les eaux de surface du canton (rivières, lac et effluents de STEP) représentent un potentiel élevé et pratiquement inutilisé d'énergie thermique à basse enthalpie (exploitation thermique) pour la production de chaleur et de froid. Plusieurs cours d'eau de taille importante comme l'Areuse, la Noiraigue et la Serrières sont constitués de résurgences d'eau souterraine, ce qui se traduit par une très bonne stabilité de la température et des températures minimales ne descendant pratiquement jamais au-dessous de 6 °C au cœur de l'hiver.

Une première évaluation du potentiel des eaux de surface a été effectuée par BMIC SA (1981), puis reprise par Matthey et Donner (1986) sur la base de 7 campagnes de mesure de débit/température des cours d'eau neuchâtelais effectuées entre octobre 1982 et août 1983. Cette dernière étude a permis de calculer des potentiels instantanés de chaleur exploitable et de cibler les ressources les plus intéressantes pour une future exploitation.

Les objectifs fixés dans le cadre du programme PDGN sont les suivants :

- Réactualisation de l'étude de Matthey et Donner (1986) en complétant les données lacunaires en termes de températures minimales/maximales et de débit d'étiage des cours d'eau du canton.
- Actualiser et préciser le potentiel exploitable et les conditions d'exploitation sur la base de la législation et des directives actuelles.
- Mise en évidence des secteurs favorables pour une exploitation thermique et représentation des résultats sous forme de cartes numériques qui pourront être intégrées au système d'information du territoire neuchâtelais (SITN).

5.2 Méthode et travaux réalisés

5.2.1 Généralités

La détermination du potentiel d'exploitation de la chaleur des eaux de surface nécessite d'en connaître la variation de débit et de température au cours de l'année et plus particulièrement lors de périodes critiques : maximum des besoins en chauffage et maximum des besoins en froid.

5.2.2 Débit et température

Pour déterminer le débit et la température des eaux de surface, la démarche suivante a été retenue :

1. Synthèse des données disponibles en termes de débit et de température des cours d'eau, stations d'épuration et lacs neuchâtelois. Nous avons essayé de regrouper l'ensemble des données disponibles auprès de diverses sources d'informations (stations de mesure fédérales, mesures ponctuelles cantonales, profils de température du lac de Neuchâtel, enquête auprès des exploitants de STEP, bibliographie diverse).
2. Acquisitions de données de débit et de température complémentaires. Initialement, il était prévu de procéder à deux campagnes de jaugeage pour une douzaine de cours d'eau a potentiel reconnu par l'étude de Matthey et Donner (1986), afin d'en préciser d'une part le débit et la température minimale au cours de l'hiver et d'autre part le débit et la température maximale en été. En raison de conditions hydrologiques peu représentatives, la campagne de mesure hivernale n'a pu être réalisée. En revanche, la campagne de mesure estivale a pu se réaliser dans de très bonnes conditions, car représentatives d'un étiage très avancé. Au cours de cette dernière campagne, des mesures de débit ont pu être effectuées dans 32 cours d'eau et des mesures de température dans 37 (Tableau 5.1).

5.2.3 Estimation du potentiel des cours d'eau et des stations d'épuration

Pour déterminer le potentiel thermique des cours d'eau et des stations d'épuration, la démarche représentée ci-dessous a été retenue :

Calcul du potentiel minimal théorique pour production de chaleur et de rafraîchissement

Pour l'estimation du potentiel, nous avons procédé différemment de l'étude de Matthey et Donner (1986) qui fournissait une image de potentiels instantanés et simultanés à certaines périodes de l'année pour l'ensemble des cours d'eau du canton. Dans notre cas, l'approche est différente, car les valeurs disponibles sont une compilation d'origines variables, avec de fortes variations du nombre de données par point de mesure, si bien que la comparaison statistique entre les différentes séries de données est difficilement réalisable.

L'approche choisie consiste à calculer le potentiel d'exploitation minimal, en supposant les conditions de débit et de température les plus défavorables : étiage estival et hivernal, températures minimales et maximales. Les potentiels calculés représentent donc le minimum absolu qui pourra être exploité et permettra de définir la puissance de l'installation sans appoint. Dans la réalité, ces conditions ne se produiront que quelques jours par année et la puissance potentiellement exploitable sera largement supérieure à ces valeurs, pour autant que le déficit soit comblé par une installation de secours et d'appoint lorsque le cours d'eau n'est plus à même de fournir la puissance demandée.

Calcul de la puissance minimale exploitable pour la production de chaleur et de froid, en tenant compte des exigences légales

Le différentiel de température exploitable est déterminé par la législation fédérale (Oeaux, Annexe 2) et réduit d'un facteur 2 la puissance minimale théorique qu'il est possible de soutirer aux cours d'eau. Des exigences supplémentaires au niveau du canton fixant la température minimale et maximale des cours d'eau ont également été considérées après discussion avec les services concernés.

Evaluation de la demande

La demande en énergie de chauffage sur la surface du canton a été établie grâce à la carte de densité de volume construit en $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (voir chapitre APR). En considérant un volume construit de $70'767'500 \text{ m}^3$ et une consommation moyenne de $30 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{an}^{-1}$, la demande en énergie de chauffage est estimée à $2'123 \text{ GWh}_{\text{th}} \cdot \text{an}^{-1}$. Pour chaque cours d'eau, rejet de STEP et lac potentiellement exploitable, une évaluation des besoins de chauffage à moins de 300 m de la ressource (utilisateurs potentiels) a été établie. En ce qui concerne la demande de froid, aucune estimation n'est disponible, à l'exception des besoins reconnus en ville de Neuchâtel (BMIC SA, 2009).

Confrontation des besoins avec la ressource disponible

Par recoupement des utilisateurs potentiels avec la ressource disponible, il a été possible d'évaluer dans quelle mesure la ressource peut être valorisée in situ, sur une distance maximale de 300 m à partir de cette dernière.

De ce fait, une mise en évidence de secteurs prioritaires où l'exploitation thermique des eaux de surface doit être encouragée avec proposition de scénarios d'exploitation.

Une synthèse des valeurs de débit, de température et des potentiels thermiques et frigorifiques pour chaque cours d'eau doit être réalisée, ainsi qu'une mise à disposition des données sous forme numérique pour intégration au SITN.

5.2.4 Exploitation des eaux du lac

La définition du potentiel exploitable des eaux du lac se base principalement sur les résultats de BMIC SA (1981), Matthey et Donner (1986) et les résultats de l'étude de BMIC SA (2009) contenant plusieurs propositions, comme par exemple, la réalisation d'un réseau de distribution de froid au centre ville de Neuchâtel. Le potentiel a ensuite été confronté à la demande potentielle en énergie de chauffage en bordure du lac.

5.3 Potentiel des cours d'eau

5.3.1 Méthode de calcul du potentiel

Formulation de base

La puissance thermique instantanée P d'un cours d'eau est définie par sa température T et son débit Q à un instant t . On a ainsi la relation :

$$P_{(t)} = Q_{(t)} \cdot (T_{(t)} - T_{\text{lim}}) \cdot C$$

avec P : Puissance thermique (W)
 Q : Débit du cours d'eau ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
 T : Température de l'eau ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{lim} : Température inférieure d'utilisation ($^{\circ}\text{C}$).
 C : Chaleur spécifique de l'eau = $4.186 \cdot 10^3$ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Dans le cas P est exprimé en (kW) et Q en (l/s), la formule générale devient :

$$P = Q \cdot 4.186 \cdot (T_{(t)} - T_{\text{lim}})$$

Définition du potentiel théorique

Pour des raisons techniques, seul le risque de formation de lentilles de glace sur l'évaporateur de la PAC est considéré et la température inférieure d'utilisation est fixée à $T_{\text{lim}} = 3$ $^{\circ}\text{C}$. Cela signifie que dans le cas où la totalité des ressources thermiques théoriques d'un cours d'eau est utilisée au moyen d'une pompe à chaleur, la température des eaux rejetées sera supérieure ou égale à 3 $^{\circ}\text{C}$. Si, durant une certaine période, la température du cours d'eau est inférieure à cette valeur, la ressource n'est pas techniquement exploitable en raison du risque de gel.

Pour la production de froid, la limite technique considérée est fixée par la température limite supérieure de la ressource pour la production de freecooling (rafraîchissement en direct), soit ~ 16 $^{\circ}\text{C}$. Au-delà de cette température, la ressource est considérée comme inutilisable.

Potentiel exploitable sur la base des contraintes légales

Selon l'OEaux, Annexe 2, « *L'apport ou le prélèvement de chaleur ne doit pas modifier la température la plus proche possible de l'état naturel du cours d'eau de plus de 3 $^{\circ}\text{C}$ et celle des tronçons appartenant à la zone à truites de plus de 1.5 $^{\circ}\text{C}$* ».

Comme l'ensemble des cours d'eau neuchâtelois appartient à la zone à truites, le refroidissement ou réchauffement maximal de 1.5 $^{\circ}\text{C}$ permet de calculer le potentiel exploitable, qui sera très inférieur au potentiel théorique basé sur la seule limitation technique.

D'un point de vue environnemental, le prélèvement de chaleur est certainement préférable à un réchauffement des eaux par prélèvement de froid pour freecooling. Cette question n'est pourtant pas spécifiée dans la législation fédérale. D'autre part, les conditions de l'« état naturel » ne sont actuellement pas connues pour tous les cours d'eau du canton. La question de savoir si des cours d'eau fortement urbanisés subissant à l'heure actuelle de nombreux rejets thermiques parasites (rejets de STEP, eaux claires, eaux industrielles) doivent être exploités selon ces critères, ou si un refroidissement supérieur à la limite d'exploitation de -1.5 $^{\circ}\text{C}$ aurait un effet bénéfique sur la qualité du cours d'eau devrait être évaluée.

Potentiel admis

La température limite d'utilisation peut être définie de cas en cas selon des exigences supplémentaires, telles que celles affectant la faune piscicole, la végétation, la microfaune, mais aussi selon les équipements techniques à disposition.

Les règles particulières aux rivières du canton de Neuchâtel sont les suivantes :

Selon le point de vue du Service de la faune, il semble que la température des cours d'eau après utilisation thermique doit être maintenue entre +4 °C et +15 °C. Le fondement de cette limitation n'est pas connu. Ainsi, on peut considérer qu'en-dessous de +4 °C et au-dessus de +15 °C, la ressource n'est plus exploitable. Ce dernier critère, cumulé aux contraintes fixées par l'OEaux, a été pris en compte pour définir le potentiel admis des cours d'eau neuchâtelois.

5.3.2 Campagne de mesure d'août 2009

Généralités

La campagne de mesure d'août 2009 a permis de mesurer le débit et la température de nombreux cours d'eau du canton dans des conditions d'étiage avancé (Tableau 5.1). Il était initialement prévu d'investiguer 12 cours d'eau à l'étiage hivernal et à l'étiage estival. Comme la campagne de mesure de l'hiver 2008/2009 n'a pu être réalisée en raison de conditions hydrologiques défavorables, le nombre de points d'investigation de la campagne estivale a été augmenté à 37.

Conditions météorologiques

Les mesures effectuées en août 2009 sont représentatives d'un étiage estival avancé. Durant le mois précédent la date des mesures du 18 août 2009, la somme des précipitations n'a été que de 48.5 mm à Neuchâtel et 62.6 mm à La Chaux-de-Fonds. En août, les précipitations représentent 46 % de la normale à Neuchâtel et 55 % de celle de La Chaux-de-Fonds.

Tableau 5.1. Précipitations et bilan hydrique en 2009 dans le canton de Neuchâtel.

Station	Précipitations durant le mois précédent du 18 juillet au 18 août 2009	Bilan hydrique durant le mois précédent du 18 juillet au 18 août 2009 (Précipitations journalières – évapo-transpiration)
Neuchâtel	48.5 mm	-72.8 mm
La Chaux-de-Fonds	62.6 mm	-57.4 mm

Pour illustrer l'état hydrologique des cours d'eau, le débit de l'Areuse à St-Sulpice mesuré le 18 août à la station de mesure fédérale N° 2290 était de 500 l·s⁻¹, soit en-dessous du débit d'étiage Q₃₄₇ (710 l·s⁻¹). Jusqu'en octobre 2009, l'étiage s'est encore accentué et le débit est descendu à 300 l·s⁻¹, soit très proche de la valeur minimale absolue d'août 2003 (290 l·s⁻¹, minimum journalier estival mesuré de 1959 à 2009). La température de l'air lors des mesures était proche de 30 °C.

Méthode

Le débit des cours d'eau a été mesuré par jaugeage chimique au sel. Cette méthode consiste à injecter ponctuellement une quantité déterminée de chlorure de sodium (NaCl) et de mesurer la conductivité électrique quelques dizaines de mètres à l'aval, sur une section de rivière à débit turbulent et au lit uniforme. Après conversion de la conductivité électrique en équivalent NaCl, il est possible de procéder à l'intégration de la courbe de restitution et au calcul du débit (SNV, 1983). Lorsque les conditions le permettaient, les petits débits ont été mesurés avec un seau gradué. Pour les cours d'eau où les méthodes simples décrites ci-dessus n'étaient pas applicables (débit trop

important ou trop faible, mauvaises conditions de mesures), le débit a été estimé en mesurant la vitesse et la section d'écoulement.

La température a été mesurée au moyen d'une sondes conductivité/température de type WTW LF 318 dans des conditions représentatives du cours d'eau (courant et profondeur suffisants).

Tableau 5.2. Résultat des mesures de débit et températures réalisées dans 37 cours d'eau neuchâtelois lors de la campagne de mesure du 18 au 20 août 2009, dans des conditions d'étiage estival prononcé.

Mesures de débit et de température de quelques cours d'eau neuchâtelois en conditions d'étiage estival (août 2009)						
Date	Nom	X	Y	Débit (l·s⁻¹)	Tempé- rature (°C)	Méthode de mesure du débit
18.08.2009	Areuse, Bras de la fabrique	555'870	199'550	94.0	18.2	jaugeage chimique
19.08.2009	Le Buttes	534'121	194'106	190.0	15.2	jaugeage chimique
19.08.2009	Le Fleurier	534'980	195'300	51.0	13.9	jaugeage chimique
19.08.2009	Le Bied de Môtiers	537'170	195'810	28.0	11.8	jaugeage chimique + station de mesures cantonale
19.08.2009	La Noiraigue	545'700	200'970	1000.0	9.2	estimation + station de mesures cantonale
19.08.2009	Le Sucre	538'230	198'050	0.0	n.o	appréciation
18.08.2009	Le Merdasson	554'240	201'490	10.0	14.0	jaugeage chimique
18.08.2009	Ruisseau de la Vaux	548'250	192'140	0.0	n.o	appréciation
18.08.2009	Ruisseau du Châtelet	548'570	192'900	0.4	n.o	appréciation
18.08.2009	Ruisseau de Tivoli	548'900	193'280	0.2	24.4	jaugeage au seuil
18.08.2009	Ruisseau de St-Aubin	549'500	193'690	13.4	15.6	jaugeage chimique
18.08.2009	L'Avidu	550'380	194'600	29.2	13.1	jaugeage chimique + station de mesures cantonale
18.08.2009	Ruisseau de Treytel	551'860	196'650	0.0	n.o	
18.08.2009	Le Moulin	552'750	197'000	1.0	18.9	jaugeage au seuil
19.08.2009	La Tuilerie, Pré Novel	554'300	198'100	1.3	18.4	jaugeage au seuil
18.08.2009	Ruisseau d'Auvernier	557'080	203'000	0.2	n.o	appréciation
19.08.2009	Le Seyon	559'650	207'370	-	19.9	
19.08.2009	Le Seyon, scierie Debrot	562'260	212'320	-	22.3	
19.08.2009	La Sorge	559'340	207'540	15.2	13.2	jaugeage chimique

Mesures de débit et de température de quelques cours d'eau neuchâtelois en conditions d'été estival (août 2009)

Date	Nom	X	Y	Débit (l·s ⁻¹)	Température (°C)	Méthode de mesure du débit
19.08.2009	Le Morguenet	560'200	209'150	3.3	18.4	appréciation
18.08.2009	Le Monruz	563'530	205'730	0.1	16.7	jaugeage au seau
18.08.2009	Le Ruau	564'800	207'240	15.8	11.3	jaugeage chimique
20.08.2009	Le Ruisseau de Souaillon	567'010	208'390	-	11.3	
20.08.2009	Le Bois-Rond	568'630	209'550	16.7	15.8	appréciation
20.08.2009	Le Mortruz S	569'520	210'440	48.3	27.3	appréciation
20.08.2009	Le Mortruz N	568'622	210'850	0.0	n.o	
20.08.2009	Le Ruhaut N	569'180	211'480	0.0	n.o	
20.08.2009	Le Ruhaut S	569'970	210'870	2.5	19.7	appréciation
20.08.2009	Ruisseau des Combes	570'520	211'890	0.0	n.o	
20.08.2009	Ruisseau de la Scie, Fbg des Aiguedeurs	571'450	212'320	1.2	16.9	appréciation
20.08.2009	Le Ruisseau des Aiguedeurs	572'050	211'500	8.3	19.6	appréciation
20.08.2009	La Thielle	571'730	210'580	-	25.0	
21.08.2009	Le Bied des Ponts	547'300	205'240	36.7	14.4	appréciation
21.08.2009	Le Bied du Locle	545'750	211'140	30.9	14.1	jaugeage chimique
21.08.2009	Le Bied du Locle aval STEP	545'610	211'200	-	16.2	
21.08.2009	La Rançonnière	543'500	212'780	0.0	n.o	appréciation
18.08.2009	STEP Bevaix aval, ruisseau du Marais	552'587	196'773	50.0	21.2	appréciation

n.o.: température non mesurée en raison du manque de débit
 - : débit non mesuré car trop élevé

Résultats

Les résultats du Tableau 5.1 ont permis d'actualiser et de mieux documenter les conditions de débit/température à l'été estival pour les cours d'eau neuchâtelois. Il est ainsi possible de remarquer que, parmi les cours d'eau mesurés :

- Des cours d'eau comme le Fleurier, le Bied de Môtiers, la Noiraigue, le Merdasson, l'Avidu, la Sorge, le Ruau, le Ruisseau de Souaillon, le Bied des Ponts et le Bied du Locle ont des

températures fraîches au maximum estival, entre 9.2 et 14.4 °C, et le débit ne tarissait pas en dépit des conditions climatiques.

- Des ruisseaux comme le Buttes, le Ruisseau de St-Aubin et le Boiron avaient une température entre 15 et 16 °C, soit proche de la limite technique d'utilisation pour la production de freecooling.
- Les autres cours d'eau mesurés avaient une température plus élevée et/ou un débit pratiquement nul. Il faut relever en particulier l'assèchement observé du Sucre à Couvet, du Ruisseau de la Vaux à Vaumarcus, du Ruisseau de Treytel, de certains tronçons du Mortruz et du Ruhaut à Cressier, du Ruisseau des Combes et de la Rançonnière aux Brenets.
- Il faut également remarquer la température élevée du Seyon, de la Thielle et de l'Areuse, bras de la fabrique de câbles à Cortaillod. Le Mortruz « sud » présentait une température anormalement élevée (27.3 °C) probablement sous l'effet d'un rejet thermique industriel.

5.3.3 Synthèse des données disponibles du débit et de la température des cours d'eau neuchâtelois

Origine des données

L'ensemble des données disponibles de débit et de température des cours d'eau neuchâtelois a été examinée et compilée dans l'Annexe 5.1. La synthèse des données résulte de la consultation des documents suivants :

Débits

Données fournies par le canton

- Service de la protection de l'environnement du canton de Neuchâtel, 2009. PREE Val-de-Ruz. Détermination du Q₃₄₇ du Seyon et de ses affluents. Fichier brut.
- Le Service de Ponts et Chaussées (BOAE) a mis en place en 2009 un réseau de jaugeage du débit comprenant une dizaine de points de mesure du niveau des rivières. La relation niveau –débit n'étant pas encore établie, ces données n'ont pas pu être valorisées dans le cadre de cette étude.

Stations fédérales

- LH2270 Doubs Combe des Sarrasins, 1949-2008
- LH2333 Le Bied du Locle-la Rançonnière, 1964-2008
- LH2446 Zihlkanal- Gampelen 1984-2008
- LH2458 Le Seyon, Valangin 1980-2008
- LH2480 L'Areuse, Boudry, 1983-2008
- SHGN2290 L'Areuse à St-Sulpice, 1959-2008
- Débits journaliers moyens de la Serrière, 1982-1989

Données diverses et ponctuelles

- Matthey B. & Donner P., 1986
- BMIC SA, 1981
- Autres études spécifiques, internes à BMIC SA

Température

Données fournies par le canton

- Service de la protection de l'environnement du canton de Neuchâtel, 2009. Relevés périodiques de la température des cours d'eau. Fichier brut, non publié, 1993-2008.

Données diverses et ponctuelles

- Matthey B. & Donner P., 1986
- BMIC SA, 1981
- Autres études spécifiques, internes à BMIC SA
- Données récoltées lors de la présente étude

L'observation suivante a été faite : les nombreuses données brutes de température récoltées de manière ponctuelle par le SENE sont difficilement valorisables, car les conditions de débit ne sont pas connues et les conditions d'acquisition des données non protocolées. L'examen des données a révélé des valeurs extrêmes parfois surprenantes et peu cohérentes. Dans ces conditions, toutes les données fournies n'ont pu être prises en compte dans le cadre de cette étude. Il est recommandé au Service de l'énergie et de l'environnement de mieux tirer parti de ces données par l'élimination des valeurs incohérentes et par un traitement adéquat des valeurs brutes.

Résultats

Les valeurs représentatives de débit et de température sont représentées pour l'ensemble des cours d'eau neuchâtelois d'importance significative sur l'Annexe 5.1 et dans le Tableau 5.2. De manière générale, la connaissance du débit et de la température des cours d'eau du canton est lacunaire, notamment en raison de l'absence, pendant de nombreuses années, de stations de mesures cantonales avec acquisition de mesures à intervalle fixe.

Température

La Figure 5.1 illustre les températures minimales absolues des cours d'eau en hiver, les températures moyennes annuelles et les températures maximales absolues mesurées en été. Les valeurs représentées n'ont pas de signification statistique, mais peuvent être considérées comme des valeurs minimales absolues. Pour certains cours d'eau (p. ex. le Fleurier, le Bied-de-Môtiers, le Merdasson), les valeurs moyennes ne sont pas connues alors que pour d'autres (p. ex. le Bied de la Brévine, le Ruisseau de la Vaux, etc.) les données sont très lacunaires.

La Figure 5.1 définit les cours d'eau pour lesquels il existe un potentiel théorique pour la production de chaleur et de froid en fonction du critère de température seul. Il est possible de remarquer en particulier que :

- Six cours d'eau ont des températures particulièrement stables, dont les maxima et minima restent dans le domaine de température exploitable pour la production de chaleur et de froid. Il s'agit de la Haute Areuse, la Serrière, la Noiraigue, l'Avidu, le Ruau et le Ruhaut Nord. Ces cours d'eau de faible longueur sont toujours assez proches de leur source et leur alimentation de base est constituée par des eaux souterraines d'origine karstique (Tripet, 1972 ; Matthey, 1976).
- La variabilité annuelle de la température de l'Areuse augmente le long de son cours. Au passage des gorges de l'Areuse, cette variabilité se stabilise en raison de nombreuses résurgences karstiques qui alimentent son cours.

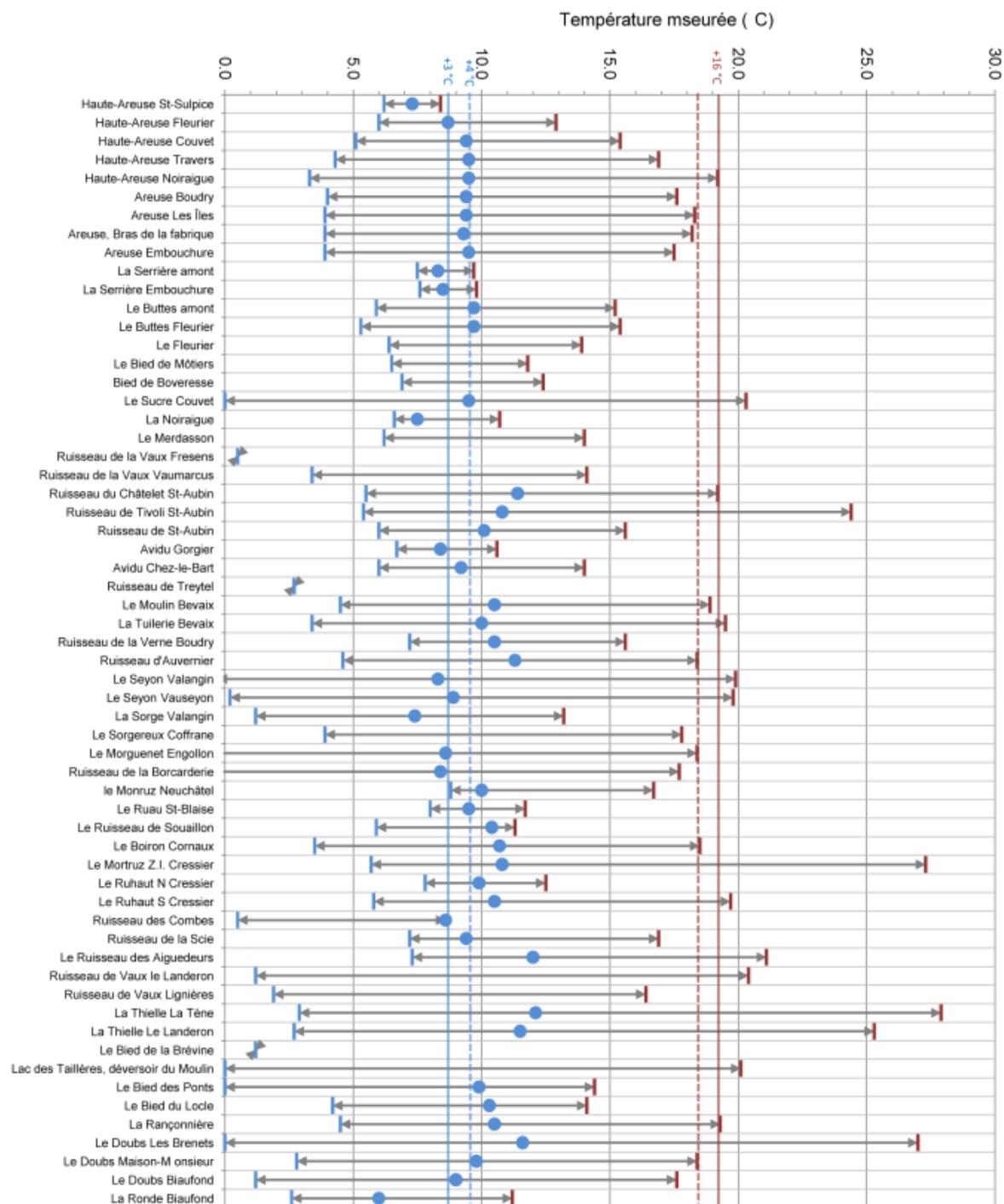


Figure 5.1. Températures minimales, moyennes et maximales des cours d'eau du canton de Neuchâtel.

- Plusieurs cours d'eau ont des températures relativement stables et dont la température minimale en hiver ne descend pas en-dessous des températures limites d'exploitation. Il s'agit de : le Buttes, le Fleurier, le Bied de Môtiers, le Bied de Boveresse, le Merdasson, le Ruisseau de Saint-Aubin, le Ruisseau de la Verne, le Monruz, le Ruisseau de Souaillon, le Ruisseau de la Scie et le Bied du Locle.
- Le nombre de cours d'eau dont la température en été ne dépasse pas 15 °C est plus restreint. Il s'agit de : le Fleurier, le Bied de Môtiers, le Bied de Boveresse, le Merdasson, le Ruisseau de la Vaux, la Sorge, le Ruisseau de Souaillon, le Bied des Ponts et le Bied du Locle.

- Les autres cours d'eau ont des températures annuelles plus variables et dépassant périodiquement les valeurs limites de température exploitable, sous l'effet des déperditions de chaleur par échange atmosphérique et d'une plus grande part d'eaux de ruissellement dans la constitution du cours d'eau.

Débit

La Figure 5.2 représente les débits minimaux (étiage hivernal), moyens et maximaux (débit maximum mesuré) des cours d'eau neuchâtelois. Le débit d'étiage hivernal est le critère déterminant qui permet de fixer le potentiel exploitable en hiver. Le débit d'étiage estival est considéré pour fixer le potentiel de production de froid. Le débit d'étiage estival est en général inférieur au débit d'étiage hivernal. Les principales observations qu'il est possible de faire sont les suivantes :

- Pour les cas où les données étaient suffisantes, le débit d'étiage minimal correspond au Q_{347} , soit le débit dépassé en moyenne 347 jours sur 365. En cas de données insuffisantes, les valeurs de débit minimales observées en hiver et en été ont été considérées. Le détail des données est fourni à l'Annexe 5.1.
- La variabilité du débit des sources karstiques à température stable (la Serrière, l'Areuse, la Noiraigue, etc.) est élevée. De ce fait, la puissance exploitable pourra être ponctuellement très importante. A l'étiage, il est possible de constater que ces cours d'eau ne tarissent jamais et que le débit minimum reste important.
- Les seuls cours d'eau dont on a mesuré un tarissement total en hiver sont le Bied de Boveresse et le Sucre. Il est également observé que d'autres cours d'eau à la température prometteuse subissent une perte considérable de débit à l'étiage hivernal (le Ruisseau de Tivoli, le Monruz, le Ruisseau de la Scie, etc.).
- En été, de nombreux cours d'eau peuvent subir une perte totale de débit comme, par exemple, en août 2009.

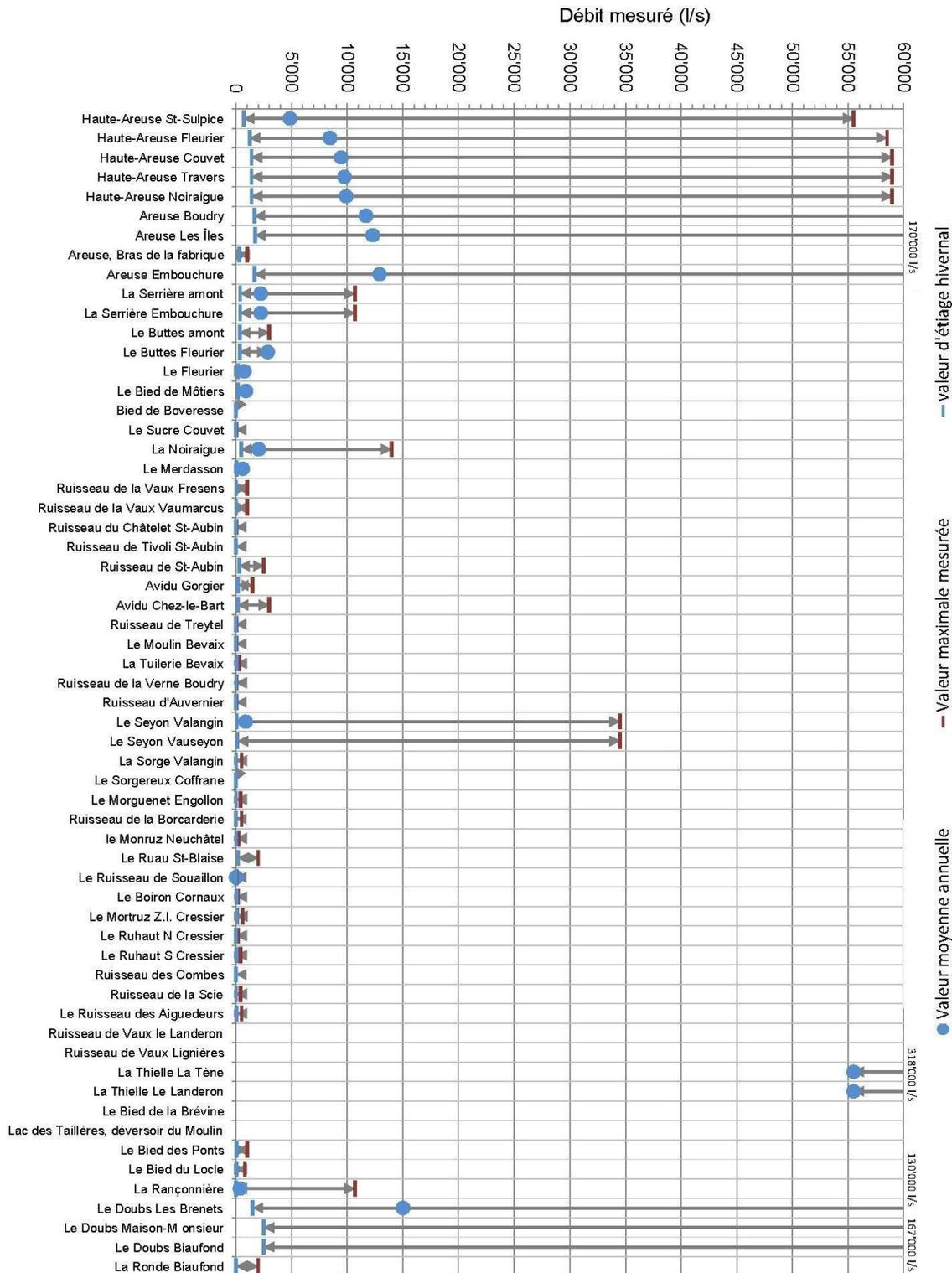


Figure 5.2. Synthèse des débits et des températures à l'étiage hivernal et estival.

Sur les Figures 5.3 et 5.4, sont représentées les conditions de débit/températures les plus extrêmes mesurées dans les cours d'eau neuchâtelois, à savoir :

- Le débit d'étiage hivernal et la température minimale absolue, permettant de définir dans quelle mesure la ressource est exploitable en hiver pour la production de chaleur, sans appoint (Figure 5.3).
- Le débit d'étiage estival et la température maximale absolue, permettant de définir dans quelle mesure la ressource est exploitable en été pour la production de chaleur, sans appoint (Figure 5.4).

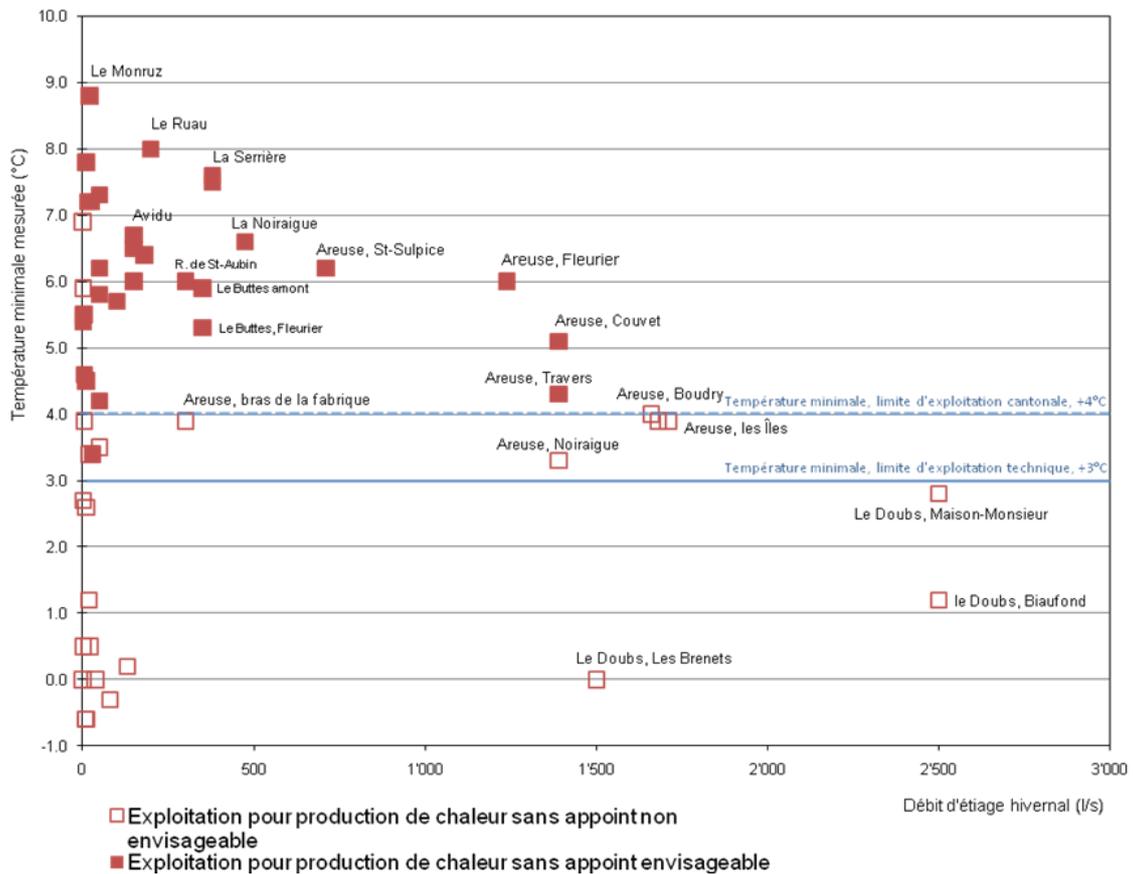


Figure 5.3. Débits d'étiage et température minimale des cours d'eau neuchâtelois en hiver.

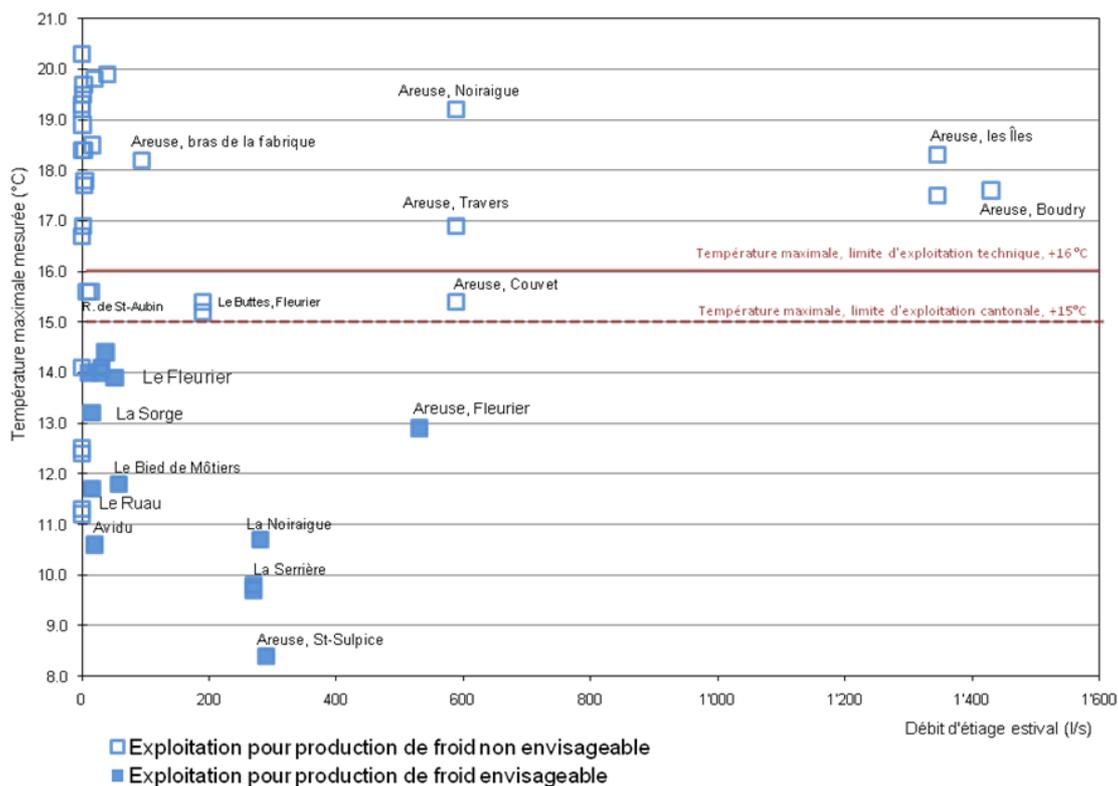


Figure 5.4. Débits d'étiage et température maximale des cours d'eau neuchâtelois en été.

5.3.4 Calcul de la puissance exploitable de chaleur et de froid

Par définition, sur l'ensemble de l'année, tous les cours d'eau contiennent une part d'énergie thermique et frigorifique. Les limites d'utilisation de la ressource sont déterminées par la variabilité annuelle de température et du débit. En effet, pour être exploitable par pompe à chaleur ou pour du rafraîchissement, cette énergie doit être disponible aux moments les plus froids – respectivement les plus chauds – de l'année, lorsque la demande est maximale.

La puissance de l'installation de soutirage thermique ou frigorifique qui sera installée sur un cours d'eau dépendra donc, pour une grande part, des puissances minimales disponibles, c'est-à-dire des conditions de débit/températures les plus défavorables pour la période considérée (Figures 5.3 et 5.4). Ce sont ces conditions, se produisant quelques jours par année, qui ont été considérées pour le calcul du potentiel thermique des cours d'eau neuchâtelois. En dehors de ces périodes, les conditions de débit/températures seront bien plus favorables et le potentiel « moyen » bien supérieur aux valeurs définies dans la présente étude. Il faut garder à l'esprit que, dans le cas où il sera décidé de produire l'énergie avec un appoint dans les périodes les plus défavorables, la puissance moyenne soutirable sera bien supérieure aux valeurs minimales annoncées ici.

Dans l'Annexe 5.2, figure le détail des puissances minimales exploitables pour les cours d'eau neuchâtelois, dans le cas de production de chaleur et de froid. Une distinction est faite entre puissance minimale théorique, puissance minimale exploitable et puissance minimale admise, en fonction des restrictions d'exploitations présentées au point 5.2.3.

Puissance minimale exploitable pour production de chaleur

Pour le calcul du potentiel, la somme des potentiels des cours d'eau exploitables a été effectuée, tout en tenant compte de l'effet d'interaction entre les cours d'eau appartenant à un même bassin versant. Ainsi par exemple, les puissances potentielles en différents secteurs de l'Areuse et de ses affluents ne sont pas cumulables, puisque l'implantation d'une installation à l'amont se répercutera par une diminution du potentiel exploitable plus à l'aval.

La puissance minimale exploitable pour l'ensemble des cours d'eau neuchâtelais est de :

- 47.1 MW si seule la limitation technique de la température du rejet (potentiel théorique) est considérée.
- 20.7 MW si les limitations selon la législation fédérale (potentiel exploitable) sont considérées (point 5.3.1)
- 20.4 MW si les exigences supplémentaires du Service de la faune (potentiel admis) sont considérées.
- 13.1 MW si la position de principe du Service de la faune consulté dans le cadre de cette étude (exploitation autorisée à priori) est considérée. Il considère que l'exploitation thermique des cours d'eau n'est envisageable que pour la Haute Areuse à St-Sulpice et à Fleurier, la Serrière et la Noiraigue. Cette restriction ne sera pas prise en compte dans le présent calcul du potentiel, car il nous semble qu'aucune justification suffisante n'a été formulée.

Le détail du potentiel admis des cours d'eau est représenté sur la Figure 5.5 et la carte des cours d'eau potentiellement exploitable pour la production de chaleur en hiver est fournie en Annexe 5.3. Il est possible de distinguer :

Les cours d'eau dont la puissance thermique admise est supérieure à 2 MW, ce sont :

- La Haute Areuse à Saint-Sulpice (4.5 MW), à Fleurier (7.8 MW) et à Couvet (6.4 MW). La puissance maximale exploitable est donnée à Fleurier, puisqu'elle tient compte des apports en débit et température du Buttes et du Fleurier.
- La Noiraigue (3.0 MW)
- La Serrières (2.4 MW)
- Le Buttes amont (2.2 MW)

Les cours d'eau dont la puissance thermique admise est comprise entre 0.5 et 2 MW, ce sont :

- Le Ruisseau de St-Aubin (1.9 MW)
- La Haute-Areuse à Travers (1.7 MW)
- Le Ruau à St-Blaise (1.3 MW)
- Le Fleurier (1.1 MW)
- Le Bied de Môtiers (0.9 MW)
- L'Avidu à Chez-le-Bart (0.9 MW)
- Le Mortruz en zone industrielle à Cressier (0.6 MW)

Les cours d'eau dont la puissance thermique admise est inférieure à 0.5 MW, ce sont notamment :

- Le Merdasson à Boudry (0.3 MW)
- Le Ruhaut sud à Cressier (0.3 MW)
- Le Ruisseau des Aiguedeurs en amont de la STEP au Landeron (0.3 MW). Le secteur en aval de la STEP n'est pas considéré dans ce bilan, car le potentiel des effluents de STEP est déjà calculé au point 5.4.
- La Tuilerie à Bevaix (0.2 MW)

- Le Ruisseau de la Scie au Landeron (0.2 MW)
- Le Monruz à Neuchâtel (0.1 MW)

Les cours d'eau de moyen à fort débit dont la puissance thermique admise peut être nulle durant quelques jours par année, ce sont principalement :

- L'Areuse à l'aval de Travers jusqu'à son embouchure
- La Thielle
- Le Doubs
- La Ronde à Biaufond
- Le Seyon
- La Sorge
- Le Ruisseau de Vaux
- Le Bied de la Brévine
- Le Bied des Ponts

Au total, le potentiel admis est de 20.4 MW et représente la part minimale qui pourra être exploitée en respectant les directives cantonales relativement strictes, et sans installation d'appoint. L'exploitation de la ressource devrait permettre de produire une puissance de 27.2 MW_{th} par l'utilisation de PAC conventionnelles (COP=4). Dans des conditions hydrologiques normales (débit annuel moyen, température moyenne annuelle), la puissance moyenne exploitable des cours d'eau neuchâtelois est 20 fois supérieure et atteint 570 MW. Pour l'exploitation de cette puissance, des installations d'appoint sont nécessaires lorsque le débit ou la température sont inférieurs aux valeurs annuelles moyennes.

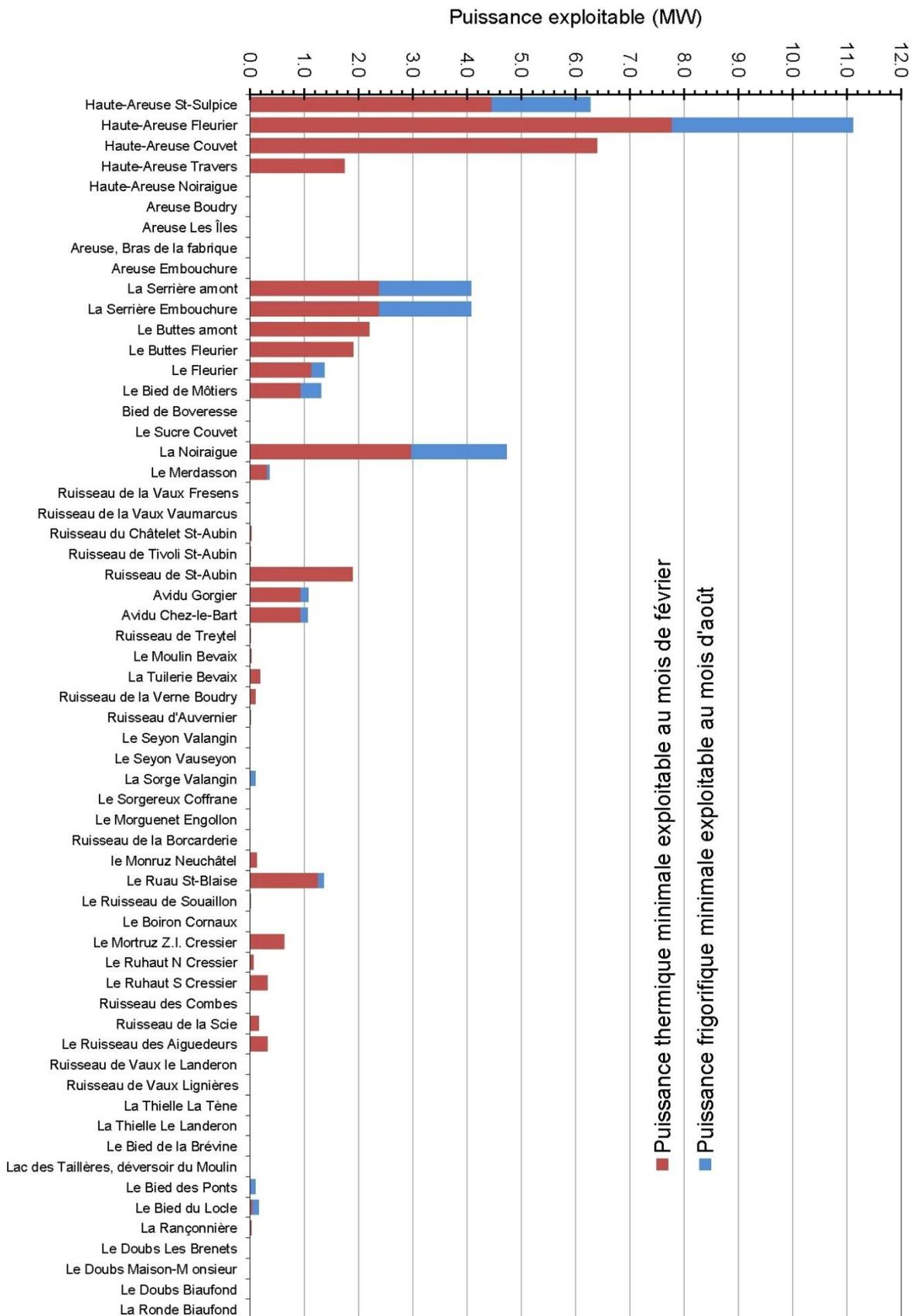


Figure 5.5. Puissances thermiques et frigorifiques exploitables en période d'étiage. Valeurs admises pour les cours d'eau du canton de Neuchâtel.

Puissance minimale exploitable pour production de froid

La puissance minimale exploitable pour la production de froid sur l'ensemble des cours d'eau neuchâtelois est de :

- 24.3 MW si seule la limitation technique de la température du rejet (potentiel théorique) est considérée.
- 8.0 MW si les limitations selon la législation fédérale (potentiel exploitable) sont considérées (point 5.3.1).
- 7.7 MW si les exigences supplémentaires du Service de la faune (potentiel admis) sont considérées.
- 5.1 MW si la position de principe du Service de la faune consulté dans le cadre de cette étude (exploitation autorisée à priori) est considérée. Il considère que l'exploitation thermique des cours d'eau n'est envisageable que pour la Haute Areuse à St-Sulpice et à Fleurier, et la Noiraigue. Cette restriction ne sera pas prise en compte dans le présent calcul du potentiel, car aucune explication suffisamment convaincante n'a été avancée pour justifier cette position.

Le détail du potentiel admis des cours d'eau est représenté sur la Figure 5.5 et la carte des cours d'eau potentiellement exploitable pour la production de froid en été est fournie en Annexe 543. Il est possible de distinguer :

Les cours d'eau dont la puissance frigorifique admise est supérieure à 1 MW, ce sont :

- La Haute Areuse à St-Sulpice (1.8 MW) et à Fleurier (3.3 MW)
- La Noiraigue (1.8 MW)
- La Serrières (1.7 MW)

Les cours d'eau dont la puissance frigorifique admise est inférieure à 1 MW, ce sont :

- Le Bied de Môtiers (0.4 MW)
- Le Fleurier (0.2 MW)
- L'Avidu à Chez-le-Bart (0.1 MW)
- La Sorge à Valangin (0.1 MW)
- Le Ruau à St-Blaise (0.1 MW)
- Le Bied des Pont (0.1 MW)
- Le Bied du Locle (0.1 MW)
- Le Merdasson à Boudry (0.04 MW)

Les cours d'eau de moyen à fort débit dont la puissance frigorifique admise peut être nulle durant quelques jours par année, ce sont principalement :

- L'Areuse à l'aval de Couvet jusqu'à son embouchure
- La Thielle
- Le Doubs
- La Ronde à Biaufond
- Le Seyon

Au total, le potentiel admis de 7.7 MW_{th} représente la part minimale qui pourra être exploitée en respectant les directives cantonales relativement strictes, et sans installation d'appoint. L'exploitation de la ressource devrait permettre de produire une puissance de 7.7 MW_{th} par installation de freecooling. Dans des conditions hydrologiques normales (débit annuel moyen, température moyenne annuelle), la puissance moyenne exploitable des cours d'eau neuchâtelois atteint 570 MW comme pour la production de chaleur.

Exploitation de L'Areuse

Une étude détaillée du potentiel thermique de l'Areuse sur différents secteurs peut être trouvée dans BMIC SA (1981). Les conditions supplémentaires imposées par le canton font que les conclusions avancées par BMIC SA (1981) ne sont pas immédiatement applicables, notamment pour la Basse-Areuse. Pour l'essentiel, il faut retenir les points ci-dessous :

L'Areuse est une ressource thermique de qualité exceptionnelle qui devrait être valorisée. La puissance exploitable à l'étiage hivernal est maximale à proximité de la source, à St-Sulpice et à Fleurier, sous l'effet de l'affluence du Buttes et du Fleurier, qui sont également des ressources de qualité. Entre St-Sulpice et Fleurier, la puissance minimale exploitable (admise) est de $7.8 \text{ MW}_{\text{th}}$ et permettrait de produire un minimum de $20.8 \text{ GWh}_{\text{th}} \cdot \text{an}^{-1}$ de chaleur, soit 38 % de la demande annuelle potentielle en énergie de chauffage située à moins de 300 m de la ressource ($53.9 \text{ GWh}_{\text{th}}$). Cette valeur pourrait naturellement être augmentée dans le cas où la possibilité existe d'interrompre les prélèvements lors de conditions hydrologiques exceptionnelles.

Compte tenu de ces éléments, la proposition d'implanter une installation de grande puissance, gérée par une institution publique ou privée dans le secteur de St-Sulpice-Fleurier apparaît comme un projet tout-à-fait envisageable et dans le strict respect de la protection du milieu naturel. La création de la prise d'eau devrait se faire de préférence dans un secteur où les ressources exploitables en eau souterraine sont peu importantes (voir chapitre NAP), comme, par exemple, le village de St-Sulpice ou en zone industrielle de Fleurier, afin de ne pas concurrencer l'exploitation de la nappe. Compte tenu de la présence d'industries consommant du froid toute l'année, le rendement de l'installation pourra même éventuellement être valorisé en hiver.

La Serrière

Le vallon de Serrières a été historiquement le lieu où se sont établies de nombreuses industries qui firent et font encore la prospérité de la région grâce à une source karstique au débit très régulier. La source de la Serrière jaillit à une altitude de 475 m à l'est de Neuchâtel. Son débit annuel moyen est de $2'220 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. La ville de Neuchâtel lui doit une part essentielle de son développement artisanal et industriel, grâce à la régularité de son débit et par conséquent à sa force mécanique. Dès la création de la chocolaterie Suchard, elle fut régulièrement utilisée comme source de refroidissement. Aujourd'hui, les bâtiments d'EEMA-Engineering sont chauffés par une pompe à chaleur dont l'évaporateur est alimenté par l'eau de la Serrière. Le détail de l'installation n'est pas connu.

Le bassin d'alimentation de la Serrière (88 km^2) est constitué par les affleurements calcaires jurassiques qui entourent le Val-de-Ruz, du Mont-Racine aux Bugnenets, puis sur le versant nord de Chaumont. Les principales caractéristiques hydrologiques et physicochimiques de la source sont données dans la thèse Matthey (1976). L'eau est de qualité bicarbonatée calcique. Elle est trouble en période de crue, ce qui fait que la ville de Neuchâtel a dû renoncer à l'utiliser au moment où elle recherchait à compléter ses ressources en eau de boisson au milieu des années cinquante. Il faut dire que l'existence des concessions hydroélectriques des papeteries et de Suchard constituait un obstacle supplémentaire.

La température de la Serrière est remarquablement régulière. Elle varie entre $7.5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $9.8 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette faible variabilité, associée à un débit d'étiage soutenu en fait une ressource thermique d'excellente qualité pour l'utilisation de pompes à chaleur, mais également pour l'obtention d'une source de froid de qualité sans machine frigorifique (freecooling).

- Débit annuel moyen	$2.22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- Débit instantané maximum	$10.70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

- Débit instantané minimum en hiver 0.38 m³·s⁻¹
- Débit instantané minimum en été 0.27 m³·s⁻¹

La ressource thermique exploitable (admise selon les critères cantonaux) donne un potentiel de :

- Pour le débit minimum de 0.38 m³·s⁻¹ 2.4 MW (chaleur)
- Pour le débit moyen de 2.22 m³·s⁻¹ 14 MW (chaleur)

La ressource frigorifique exploitable (admise selon les exigences supplémentaires cantonales) donne un potentiel de :

- Pour le débit minimum de 0.27 m³·s⁻¹ 1.7 MW (froid)
- Pour le débit moyen de 2.22 m³·s⁻¹ 14 MW (froid)

Ces ressources thermiques et frigorifiques sont donc suffisamment importantes pour justifier une valorisation.

BMIC SA (2009) a proposé la réalisation d'un réseau de distribution d'eau technique pour l'alimentation de pompes à chaleur décentralisées dans le quartier de Serrières, pour une puissance totale de 5.2 MW, dimensionné pour alimenter 70 % des immeubles du quartier.

Cette solution consiste à prélever de l'eau dans la Serrière et à la distribuer aux immeubles du quartier dans lesquels seraient installées des pompes à chaleur électriques ou à gaz. Une installation chaleur-force produisant annuellement l'équivalent de l'électricité consommée par les pompes à chaleur électriques serait installée quelque part sur le réseau de la ville. Cette variante présente l'avantage d'éviter toute perte de transport de chaleur. En revanche, les quantités d'eau à transporter sont importantes et coûteuses en électricité si un réseau aller-retour en circuit fermé n'est pas créé. L'avantage principal de cette solution tient au fait que les conduites de distribution d'eau de la Serrière pourront servir sans autre pour le transfert d'eau pour le rafraîchissement des bâtiments et le contrôle de certains processus industriels. Chaque consommateur soutire la chaleur ou le froid dont il a besoin au travers d'un échangeur de chaleur ou de l'évaporateur de sa pompe à chaleur. De manière à favoriser l'exploitation de la chaleur ou du froid et d'inciter les consommateurs à créer un bon différentiel de température, la société exploitant le réseau facture les quantités d'eau transitant par l'échangeur de chaleur et non l'énergie thermique ou frigorifique. Le réseau fermé est à eau glycolée pour éviter la formation d'éventuelles lentilles de glace sur les évaporateurs des pompes à chaleur.

Le prix moyen de la chaleur délivrée aux bornes de la pompe à chaleur des clients, consommation électrique comprise, a été calculé à moins de 11 cts par kWh, ce qui démontre la faisabilité économique du réseau étant donné que le prix de revient de la chaleur est comparable à celui des combustibles usuels. On consultera la référence BMIC SA (2009) pour le détail technique et financier du réseau proposé.

La Thielle

La Thielle fonctionne comme un canal mettant en communication les lacs de Neuchâtel et de Biemme. La détermination du débit d'étiage n'a pas de signification pratique, car le débit est déterminé par les niveaux respectifs des lacs. Les ressources exploitables sont en moyenne très importantes (350 MW), mais la température de la rivière peut s'abaisser au-dessous de 4 °C, 55 jours par an en moyenne. L'exploitation de la Thielle pourrait être envisagée pour créer des réseaux de grande puissance dans le secteur de la Tène ou du Landeron, là où la demande en chaleur et en froid peut être importante. Le relatif éloignement des demandeurs potentiels représente cependant une limitation au développement d'une telle installation. De plus, le manque de fiabilité thermique de la ressource exige que l'exploitant prévoie une installation de production de chaleur d'appoint.

Plus de détails concernant les variations saisonnières de débit/température de la Thielle peuvent être consultés dans BMIC SA (1981).

5.3.5 Principe et conditions d'exploitation

Après consultation des services cantonaux en charge de délivrer les autorisations (SPCH, SCPE), les principes généraux suivants sont à appliquer pour l'exploitation hydrothermique des cours d'eau :

Le prélèvement ne change en rien le débit du cours d'eau. Seule la température du cours d'eau est modifiée dans le respect des directives fédérales et cantonales.

L'eau peut être dérivée dans un canal de dérivation ou une chambre de pompage en équilibre hydraulique avec le cours d'eau et muni d'une grille (Figure 5.5). L'enrochement sur la berge du cours d'eau ne doit pas être saillant et ne pas modifier le régime du cours d'eau. Seule la dérivation sur de courtes distances est admise et le rejet doit se faire immédiatement à l'aval du point de prélèvement.

Dans les secteurs de cours d'eau où la rive est constituée de graviers en étroite connexion hydraulique avec le cours d'eau, la création d'un ouvrage de captage séparé de la rive du cours d'eau est jugée préférable par les services cantonaux. Les avantages de tels systèmes sont leur absence d'impact à la berge du cours d'eau. En raison de la limitation des débits, ce genre d'ouvrage sera souvent réservé aux installations de faibles puissances. En milieu urbain et pour des cours d'eau aux rives déjà aménagées, seule la solution précédente est techniquement envisageable.

Le pompage direct ainsi que la pose d'un échangeur sur le lit du cours d'eau sont interdits.

La bordure des cours d'eau fait le plus souvent partie du domaine public. L'implantation de l'ouvrage de pompage doit se faire en dehors du domaine public. Pour le passage des conduites ou du canal de dérivation, une concession sur le domaine public doit être accordée.

L'exploitation peut se faire par pompage d'eau dans le canal ou la chambre de dérivation et distribution vers l'utilisateur (systèmes directs), ou par pose d'un échangeur avec circuit intermédiaire fermé rempli d'eau glycolée.

Un contrôle strict de la température du rejet est imposé au requérant avec, au besoin, la pose d'une sécurité en cas de dépassement de la modification de température autorisée ou lors d'un tarissement exceptionnel du cours d'eau. La création d'un seuil fixant le débit minimal en fonction de la puissance maximale de l'installation peut être un moyen de s'assurer que la modification de température ne dépassera en aucun cas les valeurs prescrites.

Les crues peuvent endommager le système de prélèvement par le dépôt de limons ou de matériaux. Un entretien fréquent et attentif doit être effectué pour le bon fonctionnement de l'installation. Il est souvent judicieux de prévoir une installation de secours pour faire face à ce genre de problèmes.

Certains principes d'exploitation ne sont pas encore définis, à savoir par exemple, si la pose de l'évaporateur de PAC directement dans la chambre de dérivation du cours d'eau est autorisée ou non.

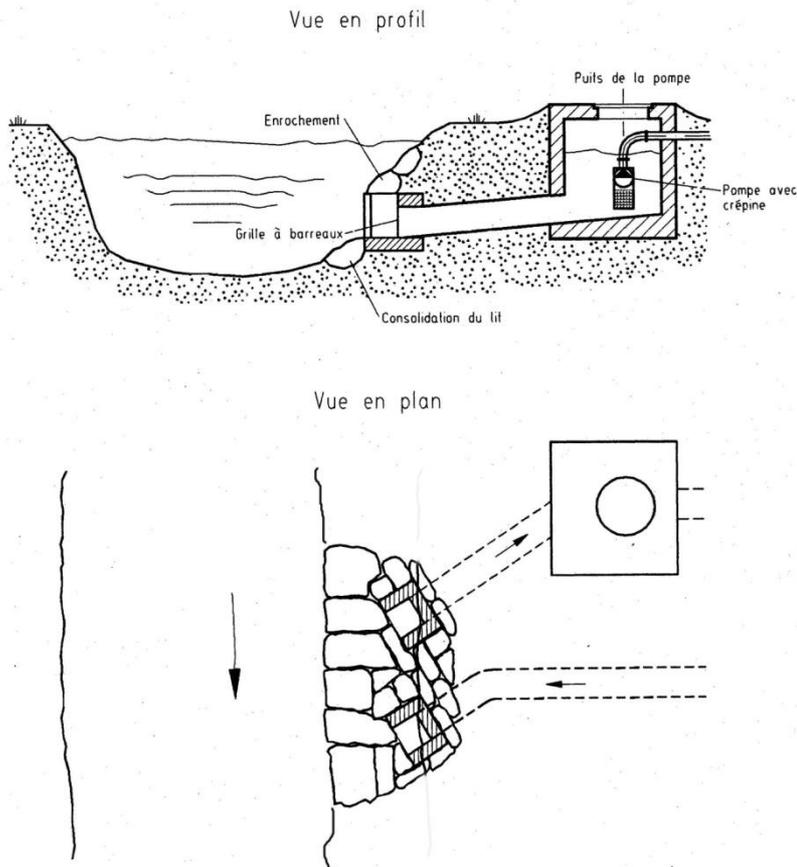


Figure 5.6. Exemple d'installation de prélèvement d'eau de surface (OPED, 1998).

5.3.6. Recommandations

Pour une gestion et une exploitation optimale du potentiel thermique des cours d'eau neuchâtelois, les points suivants devraient être respectés :

L'exploitation regroupée et centralisée de la chaleur des cours d'eau doit être encouragée, afin de s'affranchir de toute influence d'une installation sur l'autre. On évitera ainsi de dégrader le potentiel thermique d'un cours d'eau par l'implantation d'installations de faible puissance réparties en série le long de la ressource. Dans le cas d'une prise d'eau unique avec réseau de distribution, la température de la ressource reste au même niveau pour chaque utilisateur. D'autre part, cela permet une meilleure gestion et un meilleur contrôle de l'énergie prélevée et de la température du cours d'eau après l'usage thermique. Le regroupement des utilisateurs permet d'investir dans un secours et un appoint pour faire face à des situations d'étiage exceptionnelles et des imprévus techniques, comme, par exemple, l'obstruction de la prise d'eau par des limons ou des branchages lors d'une crue.

Il faut insister sur la qualité thermique exceptionnelle de cours d'eau comme L'Areuse, La Noiraigue et La Serrière. Le développement d'installations hydrothermiques sur ces cours d'eau doit absolument être envisagé, d'autant plus que leur exploitation pourra se faire dans le respect de la qualité biologique du cours d'eau.

5.4 Potentiel des effluents de STEP

5.4.1 Généralités

De par la régularité de leur débit et la température généralement élevée des effluents, les stations d'épuration constituent une ressource thermique intéressante dont l'exploitation doit absolument être encouragée.

5.4.2 Méthode de calcul du potentiel

Pour l'évaluation du potentiel des rejets de STEP, le calcul est le même que celui exposé au point 5.3.1. Les directives fédérales autorisent cependant un refroidissement plus important que dans les cours d'eau. Si la portion d'écoulement entre le rejet de STEP et l'émissaire (cours d'eau, lac) n'est pas considéré comme un cours d'eau naturel, le refroidissement du rejet pourra atteindre la température de +3°C (limite technique). Dans le cas où les rejets de STEP se font dans un cours d'eau, la condition est que la température de l'émissaire ne doit pas être refroidie de >1.5°C par rapport à son état naturel. Pour un cours d'eau actuellement sous l'influence d'un rejet thermique de STEP, il est considéré que l'exploitation thermique de l'effluent (refroidissement) aura plutôt un effet positif sur le cours d'eau par rapport à son état actuel.

Comme les conditions de températures des émissaires n'ont pas pu être déterminées au cas par cas, les potentiels exploitables sont estimés ici de manière non détaillée, sur la base de seuls critères techniques à partir d'une température limite d'utilisation de 3°C.

L'évaluation du potentiel des effluents de STEP a été effectuée par une enquête auprès des exploitants de STEP sur l'ensemble du canton. Par rapport aux résultats de BMIC SA (1981), cette actualisation s'est révélée nécessaire, car actuellement une diminution du débit moyen à l'exutoire des stations liées au développement de systèmes séparatifs est constatée. Une autre conséquence des systèmes séparatifs est que le niveau thermique de la ressource a plutôt tendance à s'améliorer, car moins sujet à des infiltrations parasites (eau de neige, eaux claires).

5.4.3 Puissance exploitable pour la production de chaleur

La liste des stations d'épuration (état en 2009) est représentée sur le tableau 5.3, avec les valeurs de débit et température minimales au mois de janvier (températures moyennes mensuelles et températures minimales absolues).

Le calcul du potentiel d'exploitation minimal a été effectué en considérant le débit par temps sec (QTS), représentatif du débit minimal sans infiltrations parasites et de la température minimale absolue mesurée au mois de janvier. Dans de nombreux cas, la température de l'effluent n'est pas connue par l'exploitant. Les débits par temps sec (QTS) ont alors été utilisés avec un refroidissement (ΔT) de 1°C. Le détail du potentiel admis des STEP est représenté sur le tableau 5.3 et la carte des cours d'eau potentiellement exploitable pour la production de chaleur en hiver sur l'Annexe 5.2.

Tableau 5.3. Caractéristiques des effluents de STEP du canton de Neuchâtel en terme de débit, température et potentiel thermique. Synthèse des données existantes et calcul des puissances thermiques exploitables.

STATION D'EPURATION	X	Y	Equivalent habitants raccordés à la STEP	Débit annuel moyen a) l/s	Débit par temps sec QTS l/s	soit par équivalent habitant l/j	Température minimale en janvier		Puissance théorique minimale (janvier) ¹⁾ MW	Puissance théorique moyenne (janvier) ³⁾ MW
							Température minimale en janvier (moyenne mensuelle) °C	Température minimale absolue en janvier °C		
Bevaix	552'496	196'971	3'520	20.14	13.0	319		0.054	0.084	
Boveresse	536'879	196'461	5'956	80.49	30.1	436	5.5	0.314	0.841	
Les Brenets	543'587	212'797	1'000	6.79	2.3	200	7.0	0.039	0.113	
La Brévine	536'591	203'452	340	0.93	0.7	175		0.003	0.004	
La Chaux-de-Fonds	556'014	219'497	39'000	194.38	146.0	323	9.0	1.404	4.875	
La Côte-aux-Fées	527'701	190'948	410	1.00	1.0	211	9.5	0.027	0.027	
Colombier-La Saunerie	556'650	202'110	34'706	141.44	76.4	190	5.7	0.863	1.596	
Engollon (SEVRE)	561'668	211'066	10'500	110.26	10.0	82	4.0	0.042	0.461	
Le Landeron	572'002	211'436	9'071	58.19	28.9	275	8.0	0.604	1.216	
Le Locle	545'610	211'200	10'780	126.86	25.0	200	7.7	0.209	2.513	
Neuchâtel	562'598	204'966	43'012	247.62	139.0	279	9.0	2.905	6.210	
Noiraigue	545'781	200'554	499	9.55	3.5	601		0.015	0.040	
Le Pâquier	565'763	216'381	120	0.46	0.3	200		0.001	0.002	
Les Ponts-de-Martel	545'911	205'028	850	4.55	2.5	251	5.4	0.025	0.086	
Rochefort-Chambrelieu ⁵⁾	552'950	202'321	530	5.43	1.7	277		0.007	0.023	
La Sagne	549'936	208'197	650	1.36	0.8	108		0.003	0.006	
St-Aubin - la Béroche	549'690	193'660	5'180	26.57	11.6	193	10.0	0.339	0.777	
Châtellenie de Thielle (La Tène)	568'450	206'570	16'000	138.95	90.3	488	8.0	1.887	2.904	
Travers	540'603	198'307	4'021	34.28	17.4	374	5.0	0.145	0.287	
Vaumarcus	548'297	192'153	196	2.29	0.5	200		0.002	0.010	
TOTAL				1'211.5	600.9			8.9	22.1	

INDICATIONS

- Les cellules sont laissées vides dans le cas de valeurs non connues ou en nombre insuffisant
- 1) Puissance thermique théorique calculée selon la température minimale absolue du rejet avec un abaissement de la température du rejet de STEP jusqu'à la température limite de 3°C (limite technique)
 - 2) Estimation: dans le cas où la température minimale de la ressource n'est pas connue, la puissance potentielle a été calculée en supposant un refroidissement du rejet de STEP de -1°C
 - 3) Sur la base du débit annuel moyen et de la température moyenne au mois de janvier
 - 4) Dans le cas où la température moyenne en janvier n'est pas connue, on considère la température minimale

ORIGINE DES DONNEES

- a) Valeurs fournies par le Service Cantonal de l'Energie et de l'Environnement
- b) Valeurs fournies par les exploitants de STEP en 2009
- c) Valeur calculée avec un débit de 200 l/j/hab
- d) Repris de BMICSA (1981)

La puissance thermique théoriquement exploitable au mois de janvier pour l'ensemble des STEP du canton est au minimum de 8.9 MW.

On peut distinguer :

Les effluents dont la puissance thermique exploitable est supérieure à 0.5 MW, soit pour les STEP de :

- La Chaux-de-Fonds (1.4 MW)
- La Saunerie à Colombier (0.9 MW)
- Le Landeron (0.6 MW)
- Neuchâtel (2.9 MW)
- Châtellenie de Thielle (1.9 MW)

Les effluents dont la puissance thermique exploitable est inférieure à 0.5 MW, soit pour les STEP de :

- Boveresse (0.3 MW)
- Le Locle (0.2 MW)
- St-Aubin (0.3 MW)
- Travers (0.15 MW)

Pour les autres stations, le potentiel est très faible, soit pour des questions de débit (Les Brenets, La Brévine, La Sagne, etc.), soit en raison de faibles températures minimales (Engollon-SEVRE).

D'autre part, on remarque que :

- Les températures minimales des effluents du Landeron, Neuchâtel, Saint-Aubin et La Tène, sont remarquablement élevées et que les STEP de La Chaux-de-Fonds, le Locle et Colombier sont passablement influencées par les eaux claires.
- En ce qui concerne, la station d'Engollon (SEMVER), les eaux claires froides ont une forte influence sur la température des eaux récoltées et la déperdition de chaleur dans le collecteur d'eau usée, long de plusieurs kilomètres, est probablement importante. Au Val-de-Ruz, la récupération de chaleur des eaux usées devrait s'effectuer en sortie de villages, par échange dans les collecteurs principaux.

L'exploitation des effluents de STEP devrait permettre de produire une puissance de 11.8 MW_{th} par l'utilisation de PAC conventionnelles (COP=4). Dans des conditions de débit et températures moyennes (débit annuel moyen, température moyenne mensuelle en janvier), la puissance moyenne exploitable est 2.5 fois supérieure et atteint 22 MW, soit 29.3 MW_{th}. Cette puissance pourra être exploitée à condition de faire appel à un appoint lorsque le débit ou la température sont inférieurs aux valeurs annuelles moyennes.

5.5 Potentiel du lac de Neuchâtel

5.5.1 Généralités

Le lac est une ressource pratiquement inépuisable au regard de l'utilisation pour la production de chaleur et de froid. Cependant, les niveaux recherchés, avec une température stable toute l'année aux alentours de 6 à 7 °C, sont situés au-dessous de la cote 390 m.s.m., soit à plus de 40 m de profondeur (Sollberger, 1974).

La profondeur de 40 m correspond à la base de l'épilimnion. A partir de cette profondeur, l'influence du réchauffement estival et du refroidissement atmosphérique hivernal est sans effet sur la température de l'eau du lac qui oscille entre 6 et 7 °C toute l'année (Figure 5.7). La légère augmentation à 10 °C observée sur la figure 5.6. au large de Champ-Bougin est liée au brassage des eaux du lac qui s'effectue en général en fin d'année lors du passage des dépressions entre les mois d'octobre et de décembre.

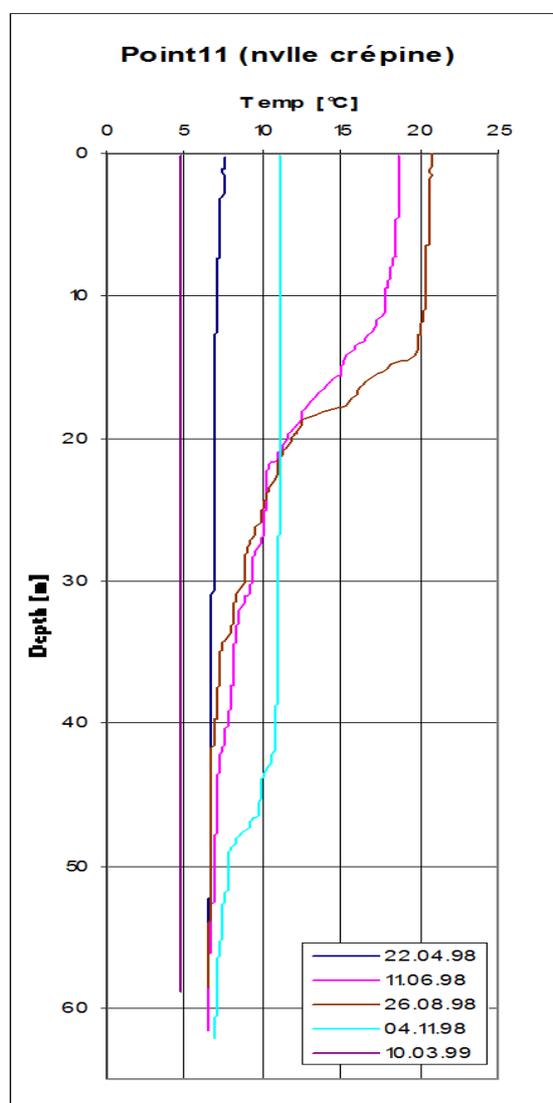


Figure 5.7. Profils de température mesurés d'avril 1998 à mars 1999 au large de Champ-Bougin, Neuchâtel (Services industriels, Neuchâtel).

5.5.2 Principes d'exploitation

L'exploitation des eaux du lac par pompage nécessite la pose d'une conduite et d'une crépine jusqu'à la profondeur de 40 m. La distance pour atteindre la profondeur de 40 m en fonction de la topographie du lac est représentée sur la carte des annexes 5.2 et 5.3. Le diamètre de la conduite est fonction du débit soutiré, mais ne dépasse généralement pas 500 mm. La conduite est généralement enterrée en bordure de lac afin d'éviter toute nuisance. Plus au large, avec l'augmentation de la profondeur, la conduite peut être arrimée sur le fond du lac par des cavaliers en béton.

L'approfondissement du lac est relativement rapide sur l'ensemble du Littoral et des longueurs de conduites de l'ordre de 300 à 700 m suffisent généralement. Dans les secteurs de Monruz, Hauterive, St-Blaise et La Tène, le lac est moins profond et la longueur de conduite nécessaire peut dépasser plusieurs kilomètres. A proximité de l'embouchure de l'Areuse, en raison des arrivées printanières d'eau froide et parfois turbides, l'exploitation des eaux du lac n'est pas toujours favorable. L'Etat préfère la réalisation d'installations de grandes dimensions, afin de limiter le nombre d'ouvrages construits le long des berges de lac.

5.5.3 Calcul de la puissance potentielle exploitable

Pour le calcul du potentiel du lac de Neuchâtel, les résultats de BMIC SA (1981) et Matthey & Donner (1986) ont été repris.

Les ressources exploitables dans les lacs suisses sont définies par les directives de l'Office fédéral de la protection de l'Environnement (OFPE, 1982, p. 30; actuellement OFEV). Du mois de février au mois d'août, le lac se réchauffe notamment sous l'effet d'un échange thermique avec l'atmosphère.

L'énergie absorbée par le lac pour se réchauffer au cours de la période du printemps-été est estimée à 120'000 GWh/an, soit près de 60 fois la demande en énergie de chauffage du canton de Neuchâtel.

La part d'énergie exploitable est fixée à 10% du réchauffement annuel naturel, soit 12'000 GWh/an. Sur une année, cette énergie équivaut à une puissance de 1.36 GW et un flux moyen exploitable de 6.4 W/m².

La puissance exploitable pour la production de chaleur et de froid, exprimée en puissance annuelle moyenne, est fixée à :

- Totalité du lac (214 km²) : 1'360 MW
- Partie neuchâteloise du lac (80 km²) : 509 MW

La valorisation des eaux du lac par pompe à chaleur permettrait donc de produire une puissance de 678 MW_{th} soit 1'350 GWh_{th} durant la saison de chauffage et permettrait de couvrir :

- Plus de 60% de la demande en énergie de chauffage du canton
- 100% de la demande thermique en énergie de chauffage située à moins de 300 m de la rive du lac (209 GWh_{th})

L'exploitation du lac en été permettra également de fournir du froid de très bonne qualité pour usage technique ou rafraîchissement. La puissance totale exploitable pour freecooling est de 509 MW_{frig}.

5.5.4 Autres plans d'eau

En ce qui concerne les autres plans d'eau du canton (Lac des Taillères, Lac des Brenets, lacs de retenues hydroélectriques), leur exploitation n'est à priori pas envisageable, car la température subit de fortes variations saisonnières.

5.5.5 Recommandations

Il faut relever que la faisabilité technique et financière de réseaux de distribution d'eau de lac en ville de Neuchâtel a été démontrée (BMIC SA 2009) et qu'il existe un besoin à combler en matière de production de rafraîchissement sans recourir à des machines frigorifiques. Le lac représente une ressource thermique très facilement valorisable pour la production de chaleur et de froid et ce mode d'exploitation doit être encouragé.

5.6 Procédure d'autorisation

La procédure d'autorisation pour l'utilisation thermique des eaux de surface comprend trois étapes :

- L'utilisation thermique des eaux de surface est soumise à concession (Loi sur les Eaux du 24 mars 1953, Art. 54).
- La demande de concession est précédée d'une étude préalable (LCEaux, 1953).
- En cas d'empiètement sur le domaine public, une demande de permis de construire est menée en parallèle à la procédure de concession.

La procédure complète d'autorisation, déterminée par les Services cantonaux en parallèle à cette étude, est présentée à la figure 5.8.

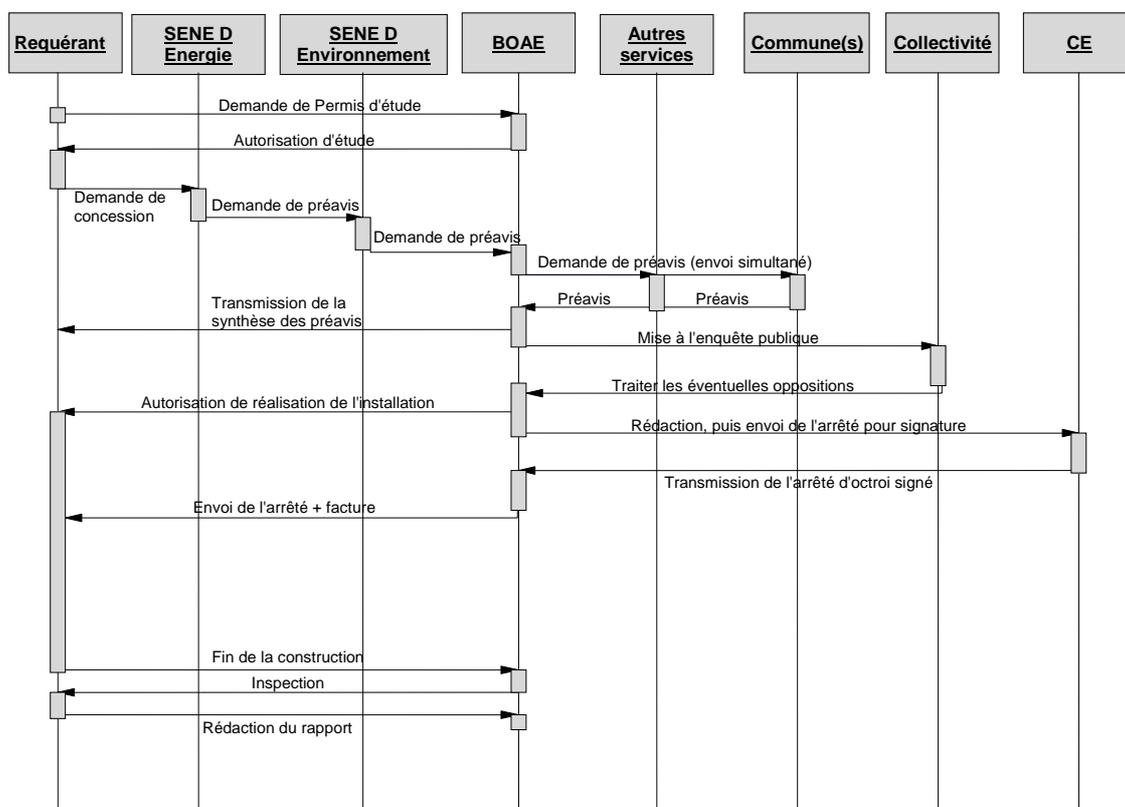


Figure 5.8. Procédure d'autorisation pour l'utilisation thermique des eaux de surface dans le canton de Neuchâtel (source : BOAE). Abrévi. SENE : Service cantonal de l'énergie et de l'environnement ; BOAE : Bureau des ouvrages d'art et de l'économie des eaux (Service ponts et chaussées). CE : Conseil d'Etat.

5.7 Installation existantes

5.7.1 Exploitation des cours d'eau

En 2009, aucune concession pour l'usage thermique des cours d'eau n'est officiellement recensée. La seule installation connue est celle d'EEMA-Engineering sur la Serrière pour la production de chaleur. Le détail de l'exploitation (mode de prélèvement, puissance) n'est pas connu.

5.7.2 Exploitation de la chaleur des effluents de STEP

En 2009, aucune installation de production de chaleur sur rejet de STEP n'est officiellement recensée.

5.7.3 Exploitation des lacs

En 2009, quelques installations de captage d'eau du lac sont recensées. Elles sont principalement utilisées pour la production de froid (froid technique et rafraîchissement), pour une puissance totale de 5 MW environ. Ces installations sont celle de l'Hôtel Beurivage à Neuchâtel et celle de Philip Morris à Serrières. La puissance de la nouvelle installation de Philip Morris n'est pas connue.

5.7.4 Potentiel d'exploitation cantonal, détaillé par ressource et par groupement de communes

La synthèse du potentiel d'exploitation thermique cantonal des eaux de surface du canton de Neuchâtel est fournie au tableau 5.3. La ressource est présentée par ordre du potentiel exploitable. Comme le calcul du potentiel doit se faire au sein d'un même bassin versant et par groupe d'affluents, certains cours d'eau ont été regroupés. Dans le cas où les cours d'eau considérés s'écoulent sur plusieurs communes, le potentiel a été calculé par groupes de communes.

La ressource a ensuite été comparée d'une part à la demande totale en énergie de chauffage des communes concernées et d'autre part à la demande potentielle en énergie de chauffage, soit les utilisateurs situés à moins de 300 m de la ressource. La limite de 300 m est purement indicative et a été choisie arbitrairement. L'annexe 5.4 résume le potentiel cantonal. Un sous-total a été fait d'une part pour les eaux de surfaces et les effluents du STEP et d'autre part pour l'exploitation du lac de Neuchâtel.

Tableau 5.4. Potentiel d'exploitation minimal des cours d'eau, effluents de STEP et lacs du canton de Neuchâtel. Synthèse du potentiel et part des besoins en énergie de chauffage potentiellement couverts.

EXPLOITATION HYDROTHERMIQUE DES COURS D'EAU ¹⁾ ET DES LACS DANS LE CANTON DE NEUCHÂTEL								
Potentiel d'exploitation minimal calculé par bassin versant et par ordre d'importance de la ressource minimale exploitable 3)								
Ressource	Besoins en chaleur estimés sur l'ensemble des communes	Demande potentielle située à moins de 300 m de la ressource exploitable	Puissance de chaleur minimale exploitable, sans appoint ²⁾	Puissance de chaleur exploitable en moyenne ⁴⁾	Production minimale de chaleur par l'utilisation des cours d'eau ³⁾	Pourcentage minimal des besoins de la commune couverts à terme par l'exploitation des cours d'eau ³⁾	Pourcentage minimal des utilisateurs potentiels couverts à terme par l'exploitation des cours d'eau ³⁾	Besoins en chaleurs déjà couverts par la nappe (2009)
	$D_{th\ tot}$	D_{th}	P_{tot}	P_{tot}	$E_{th,tot}$	$E_{th,tot} * 100 / D_{th\ tot}$	$E_{th,tot} * 100 / D_{th}$	$E_{th, expl}$
	GWh _{th} /an	GWh _{th} /an	MW	MW	GWh _{th} /an	%	%	GWh _{th} /an
Total cours d'eau et step	2'123.0	544.2	29.2	588.4	77.9	3.7	14.3	0
Lac de Neuchâtel	717.0	209.0	509.0	509.0	1'357.3	189.3	649.4	15
Total avec lac	2'123.0	753.2	538.2	1'097.4	1435.3	67.6	190.6	15.0

(1) Y compris effluents de STEP

(2) Puissance minimale fournie par la ressource en conditions d'étiage. Puissance exploitable selon contraintes supplémentaires fixées par le canton. Les critères indicatifs sont : température minimale admise dans les cours d'eau, 4°C, température maximale 15°C

(3) Potentiel minimal admis à l'étiage, installation standard avec PAC conventionnelle COP= 4.0, durée de fonctionnement 2'000 h/an

(4) Sur la base du débit annuel moyen et de la température moyenne annuelle. Puissance exploitable selon contraintes supplémentaires fixées par le canton. Les critères indicatifs sont : température minimale admise dans les cours d'eau, 4°C, température maximale 15°C. Pour les cours d'eau de faible à moyenne importance où la puissance moyenne n'est pas connue, le potentiel moyen a été estimé au tiers du potentiel de crue

(-) Dans le cas où la cellule est laissée vide, la valeur n'est pas connue

La synthèse du potentiel des eaux de surface du canton indique que :

- Le potentiel minimal exploitable des cours d'eau et effluents de STEP pour la production de chaleur est de 29.2 MW et permet de produire 77.9 GWh_{th}/an d'énergie de chauffage au moyen de PAC conventionnelles, soit 3.6% des besoins en énergie de chauffage du canton. Si l'installation d'un appoint pour couvrir les besoins en périodes d'étiage est considérée, la puissance exploitable pourra atteindre 588 MW (784 MW_{th}). Dans ces conditions, l'énergie produite annuellement dépendra des conditions hydrologiques et ne peut être calculée que sur une base statistique.
- Sauf exceptions (STEP de la Chaux-de-Fonds), le potentiel est valorisable, car la demande est supérieure à la ressource.
- Le potentiel minimal exploitable des cours d'eau pour la production de froid est estimé à 7.7 MW. La part des besoins couverts n'a pas été calculée, car la demande cantonale de froid n'est pas connue.
- Le potentiel exploitable du lac de Neuchâtel (secteur neuchâtelois) est de 509 MW (1'357 GWh_{th}/an) et permet de couvrir 100% des besoins en froid et en chaleur situés à moins de 300 m de la rive du lac.
- Au total, les eaux de surface représentent une puissance minimale exploitable de 538 MW_{th} (1'435 GWh_{th}/an), soit près de 68% des besoins du canton. L'énergie du lac ne pourra cependant pas être entièrement valorisée, car la demande en bordure de lac n'est pas suffisamment élevée. Si les puissances moyennes sont considérées, la puissance thermique produite par exploitation des eaux de surface 2'925 GWh_{th}/an dépasse la demande totale du canton. Ce calcul ne tient pas compte des appoints alors nécessaires.

En ce qui concerne le potentiel communal, le détail du tableau 5.4. indique que :

- L'exploitation de La Haute-Areuse et de ses affluents est entièrement valorisable et permettrait de combler au minimum 13 % des besoins de la commune de Val-de-Travers.
- L'exploitation de La Noiraigue permettrait de couvrir 100 % des besoins du village du même nom.
- L'exploitation de La Serrière sera également entièrement valorisable et une étude de BMIC SA (2009) a démontré la faisabilité technique et financière d'un réseau de distribution d'eau technique vers des pompes à chaleur.
- Le potentiel des STEP de Neuchâtel, La Tène, Le Landeron et Colombier sont particulièrement valorisables.

5.8 Cartes du potentiel

Les cartes du potentiel des eaux de surface pour la production de chaleur (Annexe 5.2) et de froid (Annexe 5.3) sont également données sous format numérique, afin d'être intégrées à titre informatif au portail du canton (SITN).

Sur ces cartes sont représentés :

- Les cours d'eau évalués avec la localisation des stations de mesures et les puissances thermiques minimales exploitables (admises) pour la production de chaleur et de froid.
- L'emplacement de STEP avec potentiel minimal exploitable des effluents pour la production de chaleur.
- Pour l'Annexe 5.2, une estimation de la demande potentielle en énergie de chauffage en MWh/ha*an, estimée sur la base du volume construit.
- Portion du lac exploitable et délimitation de la distance nécessaire à partir de la rive du lac pour atteindre la profondeur de 40 m en fonction de la topographie du fond du lac.

5.9 Synthèse et recommandations

Dans ce chapitre, la démonstration de la qualité remarquable en tant que ressource thermique de nombreux cours d'eau neuchâtelois (La Haute-Areuse, la Noiraigue, La Serrière, etc.), des effluents de STEP et du lac de Neuchâtel a été effectuée. Les premières propositions d'utilisation thermique des eaux de surface du canton datent des années 1980 déjà, mais leur exploitation est pratiquement inexistante à l'heure actuelle.

S'il est possible de comprendre que l'exploitation des cours d'eau doit respecter des critères très stricts en matière de protection de l'environnement, le respect de ces exigences, la réalisation d'études préalables et la définition de valeurs limite d'exploitation devraient permettre d'utiliser ces ressources de manière raisonnée. En résumé, il n'y a pas nécessairement d'antagonisme entre la protection des cours d'eau et leur exploitation thermique et ceci d'autant plus dans les secteurs urbanisés subissant actuellement de nombreux rejets thermiques non contrôlés.

Des limitations à l'exploitation des cours d'eau tiendront du fait que :

- 1) Les connaissances sur les eaux de surface cantonales en termes de température, débit et biologie sont lacunaires. Actuellement, les services concernés font preuve d'une très grande prudence par rapport aux prélèvements thermiques dans les cours d'eau. Par principe de précaution, l'Etat laisse le soin au requérant de fournir la preuve de l'absence d'impact en fonction d'un refroidissement ou réchauffement du cours d'eau prévu.
- 2) Comme l'état des connaissances sur la température et le débit des cours d'eau est lacunaire, l'acquisition des données nécessaires et demandées lors de l'étude préalable (chroniques de débit, impacts prévisibles) sera très longue et coûteuse. Le requérant sera bien souvent incapable d'apporter les preuves suffisantes de l'absence d'impact, d'autant plus que le coût de l'étude préalable sera souvent disproportionné par rapport aux avantages qu'il est possible de tirer pour des installations de faible à moyenne puissance. Enfin, les connaissances scientifiques sur le milieu aquatique sont bien souvent insuffisantes pour qu'il soit possible de lever tous les doutes.

Il est donc recommandé de :

- Contribuer à l'amélioration de la connaissance des cours d'eau du canton et poursuivre la mise en place de stations cantonales de mesure de débit et de température.
- Mettre en évidence les impacts actuels pour une meilleure définition de l'état naturel des cours d'eau. Actuellement, l'impact de l'urbanisation et des rejets d'eaux usées sur la température des cours d'eau émissaires n'est manifestement pas ou peu considéré.
- Une manière de confirmer ou de lever les doutes serait de faire un état des lieux des cours d'eau neuchâtelois sous l'égide du Service de l'énergie et de la protection de l'environnement et du Bureau de l'économie des eaux, en collaboration avec les milieux universitaires. L'objectif serait de définir l'état hydrologique actuel et considérer les impacts prévisibles dans le cas d'un changement de température donné.
- Considérer la présente étude comme une base servant à définir l'implantation de nouveaux réseaux de mesure de débit/température. Le groupement PDGN se tient à disposition des services intéressés pour définir au mieux l'implantation de points de mesure en fonction des lacunes observées.
- Après discussion avec les services concernés, nous avons remarqué que la position du Service de la faune quant à l'utilisation thermique des eaux de surface méritait d'être clarifiée. Une séance de concertation au sein du Service de l'Energie et de la protection de l'environnement devrait être mise en place rapidement.

- Sur la base des résultats de ce chapitre, de nombreuses propositions d'exploitation ont été formulées. Il faut rappeler l'importance du rôle des collectivités dans le développement de réseaux d'exploitation de la chaleur des eaux de surface de moyenne à grande puissance.

On citera en particulier les très bonnes possibilités de développement dans les secteurs suivants :

- Exploitation de La Haute-Areuse à St-Sulpice pour la production de chaleur.
- Exploitation de La Noiraigue pour la production de chaleur.
- Exploitation de La Serrière pour la production de chaleur et de froid.
- Favoriser l'implantation de conduites de captage d'eau du lac pour des puissances moyennes à élevées. Réalisation d'un réseau d'alimentation en froid au centre ville de Neuchâtel. Alimentation en chaleur et en froid des secteurs urbanisés du lac de Neuchâtel.
- Valorisation des rejets de STEP, en particulier : Colombier, Neuchâtel, Marin, Le Landeron.
- Exploitation de La Thielle par des installations de grande puissance avec appoint.

5.10 Références

- Burger A., 1959. Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. Thèse, Université de Neuchâtel. 304 p.
- Burger A. & Schaer, J.-P., 1996. La vallée du Locle – oasis jurassienne. Cahiers de l'Institut neuchâtelois, nouvelle série.
- Matthey B. & Donner P., 1986. Evaluation du potentiel thermique des cours d'eau du canton de Neuchâtel. Bulletin de l'Arpea, n°130 : pp 39-62.
- Matthey, B., 1976. Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon, Thèse, Université de Neuchâtel, 324 p.
- BMIC SA, 1981 : Chaleur de l'environnement. Ressources exploitables dans le canton de Neuchâtel. Rapport du 20 mai 1981. Commission cantonale de l'énergie, groupe de travail PAC.
- BMIC SA, 2009 : Freecooling en milieu urbain. Réseau de distribution d'eau de lac et d'eau souterraine pour couvrir les besoins en rafraîchissement et en chaleur des bâtiments- Etude de faisabilité pour la Ville de Neuchâtel- Suisse. Rapport final du 23 décembre 2009.
- OPED, 1998 : Exigences relatives aux pompes à chaleur servant à l'utilisation de la chaleur, Office de la protection des eaux et de la gestion des déchets du canton de Berne, 4^e édition.
- SNV, 1983 : mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Recueil de normes ISO 16.
- Sollberger H., 1974. Le lac de Neuchâtel (Suisse). Ses eaux, ses sédiments, ses courants sous-lacustres. Thèse, Université de Neuchâtel, 434 p.
- Tripet, J.-P., 1972. Etude hydrogéologique de la source de l'Areuse. Matér. géol. Suisse, sér. Hydrologie, N° 21.

6. Potentiel des aquifères profonds (APR)

6.1 Introduction

La précédente étude du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel - PGN (CREGE, 2008) a vu la réalisation de coupes géologiques et de cartes du canton sur lesquelles figurent les régions où les aquifères profonds possèdent un potentiel d'utilisation géothermique. Les régions où le potentiel géothermique d'un ou de plusieurs aquifères profonds est en adéquation avec les zones de consommateurs existantes ou potentielles ont été mises en évidence.

Sur la base des résultats de PGN, la présente étude du potentiel des aquifères profonds a les buts suivants :

- Sur la base des résultats obtenus par le projet PGN et de la carte des implantations possibles de doublets géothermiques, calculer le potentiel théorique des APR pouvant être installés dans le canton.
- Etablir une carte de la densité de volume construit et donc de la consommation de chauffage à l'échelle cantonale.
- Proposer un certain nombre de sites prioritaires en fonction des conditions géologiques et de consommation de chaleur, où un doublet géothermique pourrait être implanté.

6.1.1 Exemple du déroulement d'un projet de géothermie profonde

Lors de l'étude du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN 2008), il a été choisi, par définition et de manière arbitraire, que les ressources APR du canton seraient limitées à un domaine de profondeur compris entre 450 et 2000 m. En considérant un gradient géothermique moyen de 30 °C/km, 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 si des remontées d'eau chaude d'origine plus profonde sont interceptées par un forage. Au contraire, des courts-circuits favorisés par des structures karstiques à forte perméabilité peuvent entraîner, pour une profondeur donnée, des températures inférieures à la normale.

Modes d'exploitation

Dans la plupart des cas, les fluides contenus dans les aquifères profonds sont moyennement à fortement minéralisés et contiennent certains gaz en quantité plus ou moins abondante, ce qui les rend impropres à la consommation et n'autorise pas de les rejeter après leur refroidissement dans une rivière, un lac, ni dans une nappe phréatique de faible profondeur. Par conséquent, après l'usage thermique de ces fluides profonds, il est nécessaire de les refouler dans le même aquifère au moyen d'un second forage (puits d'injection), pour éviter ainsi tout impact sur l'environnement. L'autre avantage notoire de ce mode d'exploitation est de conserver la totalité du fluide dans l'aquifère et de n'extraire que la chaleur, ce qui permet de maintenir la pression hydraulique dans le forage de production et de ne pas augmenter les coûts de pompage au cours du temps.

Dans le cas rare où les eaux souterraines profondes ne sont que faiblement minéralisées et non sulfurées, il est envisageable, après le refroidissement, d'obtenir l'autorisation d'évacuer l'eau dans le réseau hydrographique de surface (OFEN 1998). Un seul puits de production (singlet) suffira alors.

Dans la plupart des installations, le fluide géothermique est produit par une pompe électrique immergée placée dans la partie supérieure du forage (50-200 m). Dans quelques rares cas où la pression artésienne de l'aquifère est suffisamment élevée, le forage est mis en production naturelle sans pompe.

Le mode d'exploitation à deux puits est appelé un doublet géothermique (Figure 6.1). Un forage de production amène l'eau chaude à la surface au moyen de la pompe immergée, vers un échangeur de chaleur situé à proximité de la tête de puits et permettant de transmettre l'énergie géothermique à un circuit secondaire, pour éviter les problèmes de corrosion et de dépôt dans les conduites du réseau de chauffage par l'eau géothermale.

Afin d'éviter un court-circuit provoqué par une circulation trop rapide dans l'aquifère entre le forage de pompage et le forage d'injection et ainsi l'arrivée du front thermique après quelques années seulement, la base des puits doit se situer à une distance suffisante – généralement entre 300 et 1000 m – dépendante de la profondeur, de la perméabilité et du débit de production. 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. Dans le cas de l'installation de Riehen (BS), les deux forages ont été forés en 1988-89 verticalement et à environ 1 km de distance, car il s'agissait de la première installation du genre en Suisse et du premier forage géothermique profond de la région bâloise.

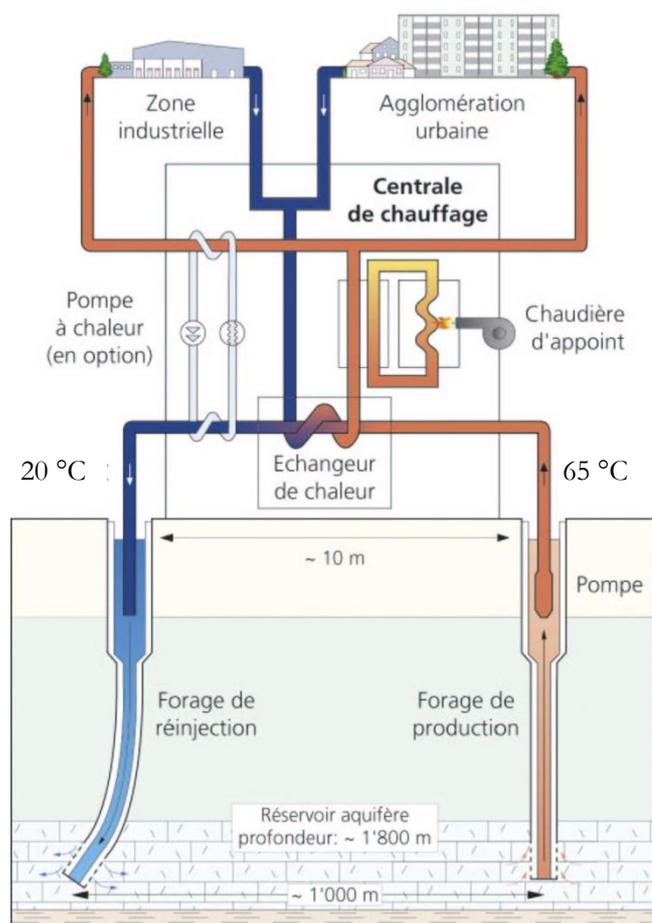


Figure 6.1. Schéma d'un doublet géothermique (Graphique : S. Cattin, 2002).

En cas de température insuffisante pour un usage direct dans un CAD (chauffage à distance), une pompe à chaleur (PAC) peut être utilisée afin de rehausser le niveau de température et d'augmenter la production. Une autre option consiste à construire une centrale hybride (bivalente) avec une autre source d'énergie (bois, déchets, etc.). Dans ce cas, la chaleur géothermique sert à préchauffer le retour du fluide du CAD. L'eau géothermale refroidie est enfin restituée à l'aquifère profond par le forage d'injection. A titre indicatif, les domaines de température attendus en tête du puits de production se situeront, dans le canton, entre 25 et 70 °C, selon le type d'aquifère et sa profondeur.

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 :

- Bâtiments datant d'avant 1980 et chauffés par radiateurs : > 60 °C
- Bâtiments datant d'après 1980 et chauffés par radiateurs : > 50 °C
- Bâtiments chauffés par chauffage au sol : ≤ 40 °C
- Bâtiments chauffés par ventilation : 35 °C
- Bâtiments MINERGIE : 30-35 °C
- Serres agricoles : > 30 °C
- Centre thermal : > 30 °C
- Pisciculture : < 30 °C

Le niveau de température chez le consommateur n'est pas une limitation à l'exploitation des APR. Il est possible de mieux isoler les bâtiments et d'avoir recours à des machines thermiques (PAC) lorsque les niveaux de chaleur sont trop bas.

Phasage typique d'un projet

Phase A pré faisabilité (6 - 10 mois)

Etude préliminaire portant sur les aquifères profonds et la valorisation de la chaleur et recherche des partenaires investisseurs.

- Vérification des hypothèses géologiques avancées à ce jour et obtention d'une image de la géologie profonde aussi précise que possible, sur la base des documents géologiques disponibles (cartes, coupes, profils lithostratigraphiques, etc.), ainsi que de l'interprétation des lignes sismiques existantes.
- Détermination de la profondeur des aquifères du Dogger et du Muschelkalk sur les sites déterminés comme favorables par l'étude de valorisation de la chaleur (forages situés à proximité des principaux utilisateurs de chaleur).
- Estimation des débits exploitables par puits profonds déviés grâce aux informations disponibles et calcul des domaines de température des eaux sur la base d'un gradient géothermique normal (30 °C/km) ou modifié par différentes hypothèses géologiques.
- Au moyen des informations géologiques les plus réalistes, des débits estimés et des coûts des forages profonds, détermination du potentiel de valorisation économique de l'énergie par une approche des consommateurs potentiels sur le terrain.
- Présélection de sites d'intérêt pour un doublet géothermique.
- Formulation de recommandations sur les études à réaliser pendant la phase B.

Phase B faisabilité (env. 18 mois)

- Etude géologique et géophysique, notamment une nouvelle campagne de sismique réflexion, si nécessaire, sur les sites présélectionnés.

- Etude de la valorisation de la chaleur.
- Planification des forages d'exploration, appel d'offres pour les forages.
- Recherche de financement pour la réalisation de la phase C sur les sites sélectionnés.
- Sélection d'un nombre restreint de sites parmi le choix de la phase A.

Phase C avant-projet et réalisation (env. 24 mois)

- Concept d'un nouveau réseau de chauffage à distance ou concept de transformation d'un réseau existant.
- Réalisation du premier forage profond, tests et diagraphies.
- Réalisation du deuxième forage, tests et diagraphies.
- Finalisation du doublet géothermique.
- Mise en place par étapes du concept choisi pour le réseau CAD, avec priorité pour les éco-quartiers et les nouveaux quartiers.

6.1.2 Avancement des projets dans le canton de Neuchâtel

Les études déjà menées sur la géothermie dans le canton de Neuchâtel, PGN en 2008 et PDGN en 2009, permettront de raccourcir la durée de la phase du concept et de la préfaisabilité d'un projet de géothermie profonde en apportant déjà un certain nombre de réponses.

Grâce à ces études, une image globale de la géologie profonde a été obtenue et la phase A consistera donc essentiellement à affiner la géométrie des structures profondes pour une présélection de sites. Cela sera réalisé au moyen de coupes géologiques de détail basées, si possible, sur des lignes de sismique existantes.

Cela permettra également la détermination plus précise de la profondeur, donc de la température attendue des aquifères cibles. Un travail d'exploration géologique sera également nécessaire afin de cerner plus exactement la nature (largeur, rejet, localisation, etc.) des systèmes de failles intéressants pour une zone donnée.

L'étude de valorisation de la chaleur devra être menée par des spécialistes en énergie, car c'est elle qui déterminera parmi les sites sélectionnés lesquels sont économiquement viables. En effet, aucune étude existante n'apporte de réponses à ce sujet à l'exception de celle menée sur Marin (Tecnoservice Engineering, 2004). Il faudra également présenter des recommandations sur les études complémentaires à mener pour la phase B.

6.1.3 Concept des forages géothermiques

Les opérations de forage sont réalisées dans le but d'atteindre un réservoir géothermique et de pouvoir apporter à la surface le fluide caloporteur avec une température et un débit suffisant pour assurer l'économie du projet. Pendant le processus de foration, l'appareil de forage (rig, foreuse, plate-forme de forage) remplit des fonctions diverses. Il doit notamment assurer la rotation de l'outil de forage (trépan, tricône) pour atteindre la zone de production du réservoir géothermique. D'autre part, la circulation de la boue de forage est vitale pour maintenir le forage ouvert et accessible et pour faire remonter les débris de roche (cuttings). Finalement, la puissance de l'appareil de forage doit permettre de retirer en tout temps le train de tiges hors du trou et d'assurer le contrôle du poids sur l'outil de forage pour garantir un taux de pénétration optimum.

Appareils et chantier de forage

Le choix d'un appareil de forage approprié est l'une des plus importantes décisions lors de la

planification d'un forage. Le rig doit posséder une marge de sécurité suffisante (puissance) et des spécifications techniques appropriées au type de forage prévu (profondeur, diamètre). Les rigs utilisés pour des forages géothermiques profonds sont similaires à ceux engagés pour l'exploration pétrolière ou gazière, avec quelques différences. En effet, les débits de production du fluide géothermique doivent être significativement plus élevés que ceux des hydrocarbures et par conséquent les diamètres de puits et de tubage sont plus grands (Figure 6.2).



Appareil Foraco BF830



Appareil Foraco BF831



Appareil Ideco H-525



Appareil Drillmec G-102

Figure 6.2. Appareils de forage capables d'atteindre une profondeur de 1'500 m (Foraco foreuses BF830 – BF831), 2'000 m (Ideco H-525) et 2'500 m (Drillmec G-102).

A titre d'exemple, les puits réalisés pour des doublets géothermiques dans le bassin parisien nécessitent des appareils de forage permettant d'atteindre 2'000 m de profondeur avec une certaine marge de sécurité. Une superficie de 4'000 m² est nécessaire à l'installation du chantier sans aucune restriction de place, mais elle peut être réduite de moitié en zone urbaine dense où les parcelles sont limitées en nombre et en surface (Figure 6.3).

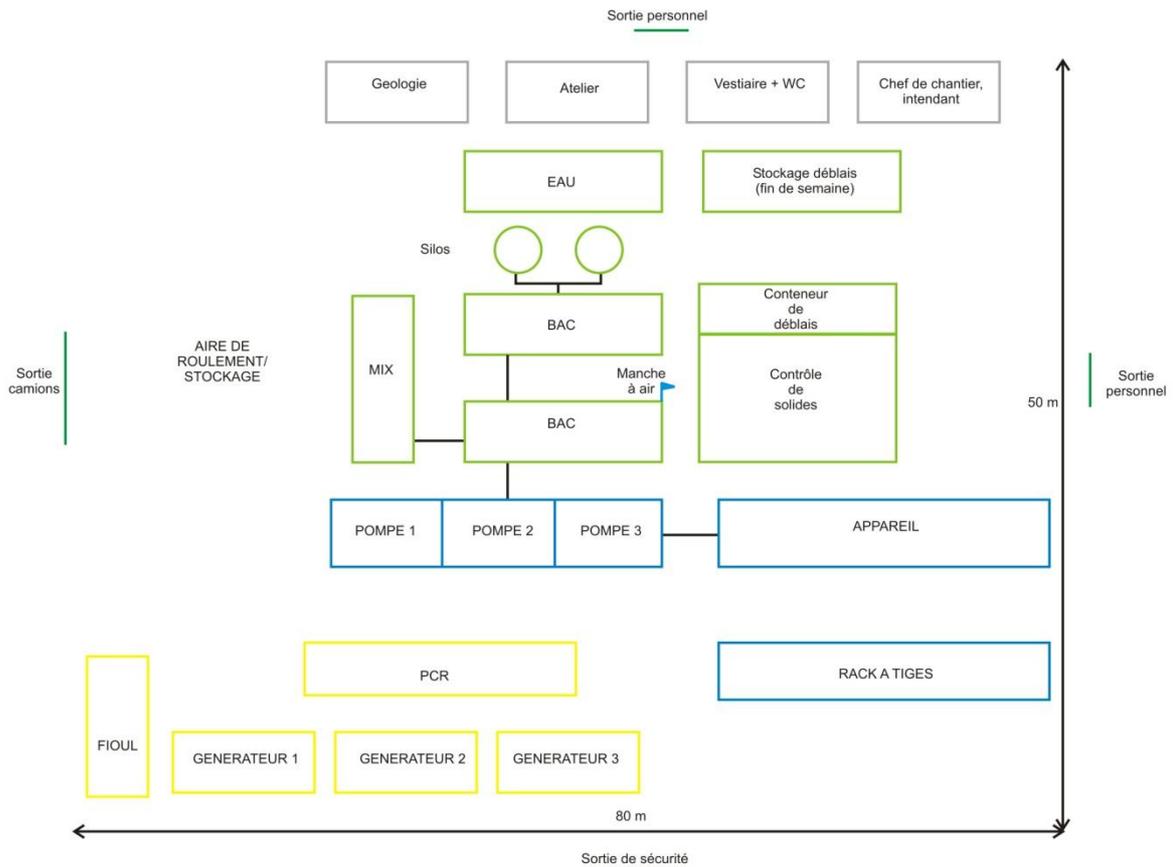


Figure 6.3. Emprise du chantier de forage d'un doublet géothermique en région parisienne pour atteindre un réservoir vers 2'000 m de profondeur (Ungemach & Antics, 2009).

La durée des opérations de forage est très variable et dépend évidemment de la profondeur finale mais également de la connaissance géologique des terrains à perforer. Dans une région où de nombreux forages existent, la durée des opérations diminue sensiblement. Par exemple, un puits géothermique à 1'800 m de profondeur dans l'aquifère du Dogger du Bassin parisien réalisé avec un appareil de grande dimension prend actuellement 30-35 jours (forage, diagraphies, complétion et tests). Cette rapidité est due à l'excellente connaissance acquise durant les 40 ans d'expérience de la géothermie française. Dans une zone de prospection peu ou pas connue, les durées de forage peuvent augmenter de 50 % en raison des surprises géologiques rencontrées (types de roche, épaisseurs, zones de fractures, etc.).

Lorsque le doublet géothermique est achevé, le chantier est démonté et le terrain est remis en état. Si la centrale de chauffage n'est pas construite sur la même parcelle, les têtes de puits et les conduites aller-retour peuvent être intégralement enterrées. Des plaques métalliques au sol seront alors les seuls témoins de la présence du doublet.

Techniques de perforation

La grande majorité des forages profonds sont réalisés par la méthode rotary, qui consiste à faire tourner depuis la plate-forme de forage tout le train de tiges à l'extrémité duquel se trouve le tricône qui va broyer la roche. La boue de forage est injectée à travers le train de tiges et ressort par l'outil de forage. Elle a de multiples fonctions : refroidir et lubrifier le tricône, faire remonter les cuttings vers la surface et tenir les parois du trou ouvertes.

Au cas où l'on doit procéder à une déviation du forage pour viser un cible qui n'est pas à la verticale du chantier, la boue de forage est injectée par le train de tiges dans une turbine qui entraîne le tricône placé juste en dessous. Cet assemblage permet d'initier une déviation qui sera ensuite

poursuivie par la méthode rotary.

Finalement, dans le cadre d'une campagne de prospection par forages profonds (> 2 forages), la technique de forage slimhole diminue sensiblement les coûts de forage de 25 à 50 %, car elle permet de réduire les diamètres de forage, la taille du rig et celle du chantier (Vuataz, 1997). Des mesures et des tests divers peuvent être exécutés dans les forages slimhole, mais leur diamètre réduit augmente les pertes de charge et limite par conséquent le débit de production.

Dans le cas d'un forage vertical d'une profondeur de 400 à 600 m dans des roches dures (calcaires, grès, granite, etc.), on peut utiliser la technique de forage au marteau-fond-de-trou. Cette méthode offre un taux de pénétration beaucoup plus rapide et donc le prix du forage est nettement moins élevé que son équivalent avec la méthode rotary. L'outil de forage est un marteau pneumatique actionné par de l'air comprimé qui est injecté à travers les tiges de forage. On économise également la boue de forage car les cuttings sont remontés par l'émulsion de l'air comprimé et de l'eau de la formation entrant dans le forage. Cependant, pour que le marteau soit efficace, il est nécessaire d'avoir un compresseur puissant de plus de 50 bars, mais ils sont rares en Suisse.

Finalement, la technique du carottage permet d'obtenir dans les zones d'intérêt pour la géothermie des carottes (cylindre de roche peu perturbée et représentative de la profondeur de forage), soit de manière continue (forage de type minier) ou discontinue pour des zones précises. Le coût d'un forage intégralement carotté est plus élevé que celui d'un forage destructif (rotary), mais il peut apporter des informations très importantes sur la structure de la zone du réservoir. Il est également possible de réaliser un puits en deux phases, la première en destructif et la deuxième en carottage, certains appareils de forage étant mixtes, ils peuvent utiliser les deux techniques successivement.

Mesures et tests des forages

Lorsque le forage profond est terminé ou lors d'une phase de tubage intermédiaire, on procède à des mesures des paramètres physiques dans le forage au moyen des outils de diagraphies suspendus à un câble (logging). Ces opérations sont très importantes car elles apportent des renseignements détaillés sur les caractéristiques des formations géologiques et aquifères rencontrées lors de la perforation et elles ne doivent pas être négligées, car leur coût ne représente que 2 à 5 % du prix total du forage.

Afin de pouvoir estimer la productivité ou l'injectivité d'un forage, des tests hydrauliques sont engagés lorsqu'un réservoir potentiel est atteint en cours de forage ou à la fin de celui-ci, dans la partie non tubée du fond du puits. Le test le plus classique est l'essai de pompage par paliers de débits successifs, d'une durée allant de quelques heures à quelques semaines. Sa fonction est d'abord de nettoyer le forage et ensuite de pouvoir calculer le débit et la température de production à long terme lors de la future exploitation. Finalement, des prélèvements seront analysés pour connaître le chimisme du fluide géothermique et les risques de corrosion et/ou de dépôt de minéraux sur les parois des forages et des conduites de surface.

Dans le cas d'un doublet, l'un des deux forages servira pour l'injection du fluide refroidi et donc un test d'injectivité permet également d'évaluer les performances de ce puits. En effet, malgré leur proximité dans l'aquifère profond (distance horizontale de 500 à 1'000 m), les deux puits n'auront pas forcément les mêmes caractéristiques thermiques, hydrauliques et chimiques.

Equipement des forages

L'équipement des forages (tubage, pompe, tête de puits) dépend de la profondeur du puits et du débit de production, mais surtout des caractéristiques chimiques du fluide qui sera produit puis réinjecté. Si le fluide n'est pas corrosif, un matériel standard sera utilisé, mais des aciers spéciaux devront être considérés pour les tubages et la tête de puits si la salinité du fluide géothermique est élevée et/ou si les caractéristiques du fluide dans les conduites (après l'échangeur, dans le puits de réinjection) provoquent des phénomènes de corrosion et de dépôt.

Si nécessaire, un traitement chimique peut être installé sur le puits de production. Il consiste en l'injection d'un inhibiteur de corrosion (composé organique de type phosphonate, polyacrylate) au fond du puits pour protéger l'ensemble de la boucle géothermale. La formation d'un film protecteur ralentit la corrosion et empêche la croissance cristalline de minéraux secondaires (Figure 6.4).

Il existe de nombreux inhibiteurs de corrosion et sa sélection est faite en fonction du chimisme de l'eau et de la présence plus ou moins abondant de gaz (surtout H₂S et CO₂) et de bactéries. Les inhibiteurs de corrosion ont plusieurs fonctions : anti-corrosif, anti-dépôt, dispersant et biocide.

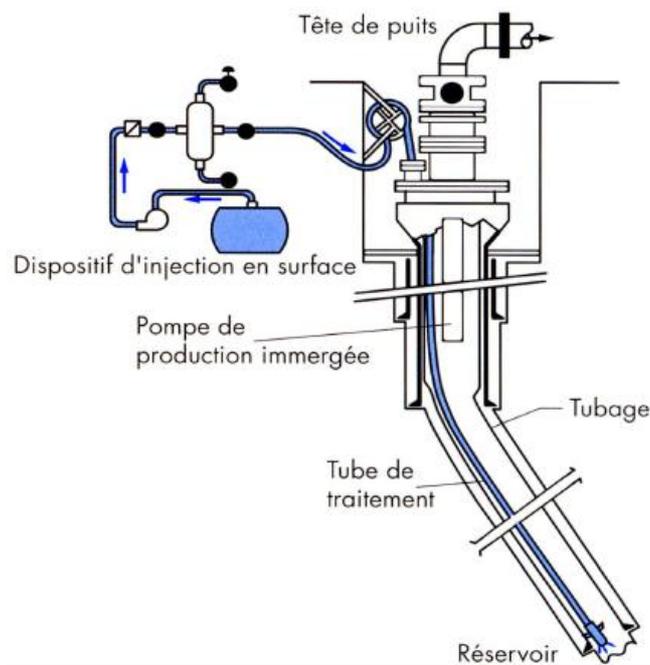


Figure 6.4. Schéma d'une tête de puits de production, du tubage et du traitement chimique par injection en fond de puits (Lemale & Jaudin, 1998).

Coût et économie du projet

Les coûts de forage d'un doublet géothermique sont difficiles à quantifier au préalable, sans connaître le site du chantier et de la centrale, la période choisie, le nombre de forages (1 ou 2) et la profondeur finale. Tous ces critères influencent fortement les prix et seuls, un appel d'offre préliminaire et un appel d'offre détaillé permettront de préciser les coûts. Le prix du mètre de forage évolue rapidement en fonction de l'offre sur le marché du forage pétrolier, et donc du prix du baril de pétrole ! La disponibilité des appareils de forage pouvant atteindre ou dépasser 2'000 m de profondeur peut également atteindre un seuil critique et retarder la réalisation d'un projet de plusieurs mois.

Dans le rapport final de l'étude PGN (2008), un tableau donnait les coûts de forage pour des ouvrages de 500 à 2'500 m de profondeur. Ces prix sont montés et redescendus durant ces dix dernières années, mais les ordres de grandeur peuvent être conservés. De plus, des estimations précises liées à des projets de géothermie profonde en Suisse sont aussi mentionnées dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1. Coût estimé en Suisse de forages géothermiques équipés, sur la base de quotations de plusieurs entreprises.

Profondeur du forage (m)	Coût moyen estimé d'un forage (Mio CHF)	Référence
500	1.2 ± 0.1	(1)
1'000	2.5 ± 0.2	
1'500	3.7 ± 0.4	
2'000	6.4 ± 0.6	
2'500	9.2 ± 1.0	
2'300	9.0	(2)
3'600	11.0	
Doublet à 2'500	10 ± 2.0 (pour 2 forages)	(3)

(1) Communic. écrite de Geothermal Explorers, 2008 ; (2) Bianchetti et al. 2009 ; (3) Dewarrat & Bianchetti, 2009.

Le coût total du projet géothermique dépendra évidemment de l'existence, de la transformation ou de la construction d'un réseau de chauffage à distance.

Une étude de faisabilité technico-économique devra être réalisée simultanément au choix d'une zone de prospection, mais avant la sélection du site de forage proprement dit. Cette étude doit permet de quantifier les consommateurs potentiels de chaleur, la valorisation de la chaleur et le prix de vente prévisionnel du kWh thermique.

Impact environnemental

L'impact positif des installations de géothermie en aquifères profonds est attribué à la substitution de CO₂ et d'autres gaz émis par des combustibles fossiles. Généralement, l'exploitation des aquifères profonds passe par un doublet, et par conséquent, l'intégralité du fluide géothermique (eau, gaz, sels dissous) sont réinjectés dans la même formation après refroidissement.

La principale question environnementale est liée au chantier provisoire de forage. Comme tout chantier de construction, il engendre du trafic et du bruit supplémentaires. La différence fondamentale avec la construction d'un bâtiment est lié à la durée du travail. En effet, afin de sécuriser les travaux de forage et de minimiser les coûts, un forage profond est presque toujours réalisé 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Des mesures anti-bruit sont prises sur le chantier dès le début des travaux, telles que la localisation et le concept du chantier, le type de machines et les parois anti-bruit.

En amont des procédures d'autorisation auxquelles sera soumis le projet lors de sa concrétisation, un examen préalable des principaux impacts environnementaux devra être réalisé pour vérifier la faisabilité et la pertinence du projet du point de vue de la protection de l'environnement.

Selon l'Ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement (OEIE), un projet de géothermie profonde est assujéti à la procédure de l'étude d'impact sous le chiffre 21.4 de l'OEIE (installations géothermiques y compris celles qui exploitent la chaleur des nappes phréatiques) d'une puissance de 5 MW_{th}. Néanmoins, il est possible qu'un doublet géothermique dans le canton de Neuchâtel délivre une puissance inférieure à 5 MW_{th} et soit soumis à une procédure plus légère.

Cet examen préalable des principaux impacts environnementaux doit porter sur les différentes phases du projet : phase de mise en œuvre, phase d'exploitation et phase de mise hors service. Pour chacune d'entre elles, l'impact des critères suivants doit être examiné et quantifié : trafic routier, bruit et vibrations, sismicité induite, air, eaux de surface, eaux souterraines, milieu naturel et

paysage, sols, sites pollués et gestion des déchets.

Acceptation sociale du projet

Même si les bénéfices environnementaux et économiques d'une opération de géothermie profonde sont a priori reconnus, de manière générale l'acceptation sociale de grands projets énergétiques quels qu'ils soient n'est jamais gagnée d'avance et doit être prise en compte dès le début du projet. Une collaboration avec la population locale doit être instaurée et des réponses honnêtes doivent être données aux questions et aux craintes formulées. Une information complète et répétée doit être fournie régionalement et localement, tant auprès des autorités communales que de la population et des écoles. Des séances et des documents d'information seront planifiés déjà lors des phases préliminaires et pendant la réalisation du forage des visites de chantier seront organisées.

Les meilleures solutions technologiques et organisationnelles doivent être appliquées, afin de garder une image positive du projet en particulier et de la géothermie en général auprès de la population et des futurs consommateurs. En effet, une image dégradée en raison d'erreurs techniques ou de gestion sera très difficile à restaurer.

6.2 Présentation des résultats de l'étude PGN

L'étude PGN a permis de mettre en évidence que les trois principales formations géologiques représentant un intérêt du point de vue de l'utilisation thermique des aquifères profonds étaient, en allant de la plus superficielle à la plus profonde, le Malm, le Dogger et le Muschelkalk. Les couches situées sous le Muschelkalk jusqu'au sommet du cristallin constituent également des formations géologiques avec un potentiel thermique élevé. Cependant, elles n'ont pas été traitées dans cette étude en raison du manque total d'informations à l'échelle du canton.

6.2.1 Gradient géothermique et conditions hydrogéologiques particulières

Gradient géothermique

Les écoulements souterrains rapides dans des systèmes karstiques développés peuvent provoquer un refroidissement significatif dans les formations calcaires. De ce fait, la température à la base des réseaux karstiques a été fixée à 7 °C et une valeur conservatrice de 30 °C/km a été choisie pour le gradient régional.

Critères de sélections des aquifères

Pour une exploitation géothermique optimale des APR, les conditions standard suivantes ont été définies :

Formation aquifère permettant de soutirer un débit minimum de 10 à 20 l·s⁻¹ par puits

Température minimale de 30 °C

Minéralisation de l'eau inférieure à 5 g·l⁻¹

Forage à une distance maximale de 1 km des premiers consommateurs

Forage d'une profondeur maximale de 3 km

Des exceptions ont cependant été prises en considération lorsque l'un de ces critères n'était pas atteint, mais qu'il était compensé par d'autres caractéristiques plus favorables.

6.2.2 Géologie et localisation des zones potentielles

Malm

Composé essentiellement d'une alternance de calcaires et de marnes, cet aquifère est en position médiane dans la colonne stratigraphique du canton de Neuchâtel (PGN, 2008), ce qui a pour conséquence une profondeur et des températures relativement faibles. Il s'agit cependant, en terme de volume, de l'aquifère le plus important pour l'eau potable du canton de Neuchâtel avec une épaisseur d'environ 400 m. Il faut également tenir compte du fait qu'il affleure fréquemment en haut des rampes (voir les coupes géologiques en fin de chapitre), ce qui a pour conséquence une importante karstification et lui fait bénéficier d'une excellente recharge. On s'attend donc à trouver des débits importants comme par exemple dans le forage de Bevaix-Treytel où, à une profondeur de 200 m, un débit de 75 l·s⁻¹ d'eau à 14 °C a été obtenu (Muralt, 1999).

Dogger

Le Dogger, comme le Malm, est composé de marnes et de calcaires, mais ces derniers y sont plus marneux, avec comme conséquence des débits attendus inférieurs à ceux dans le Malm. Cependant, cet aquifère représente la cible géothermique principale en raison de son enfouissement plus important et de son épaisseur d'environ 300 m. Il est connu, dans le canton de Neuchâtel, comme

un aquifère intéressant pour ses ressources en eau potable à faible profondeur et, au pied du Jura dans le forage pétrolier de Hermringen, comme un aquifère géothermique potentiel.

Muschelkalk

Cet aquifère est le plus profond pris en compte par l'étude, mais comme il n'affleure pas dans le canton, il est très mal connu. En se basant sur différents forages hors du canton qui l'ont traversé, on peut déduire un certain nombre de ses caractéristiques. Il doit avoir une épaisseur inférieure à 100 m et les débits attendus doivent être plus faibles que ceux du Malm, car les calcaires qui le composent sont légèrement plus marneux. Les fluides de cette formation sont, selon toute vraisemblance, fortement minéralisés, car ils ont traversé des couches évaporitiques. Cependant, il doit être présent sur l'ensemble du territoire cantonal et, du fait de sa profondeur, les fluides qu'il contient sont potentiellement les plus chauds des trois aquifères. De ce fait, il reste une cible intéressante, même si les informations le concernant sont très lacunaires.

6.2.3 Résultats

La localisation des aquifères profonds est évidemment liée à la structure géologique et tectonique du Jura. Cette dernière, a été étudiée par l'établissement d'une série de 10 coupes géologiques (PGN, Annexe 6.4) qui ont montré une structure principalement formée d'une succession de plis sur rampe (fold-bend-fold). Ces chevauchements ayant une orientation générale vers le nord-est, l'enfouissement des couches augmente vers le sud-est, car c'est là que se trouve le bas des rampes et c'est donc dans ces zones que la ressource est la plus chaude et la plus intéressante du point de vue géothermique.

Il s'avère également que ces structures de bas de rampes correspondent généralement au fond des vallées, où se situent les principales localités du canton. La région du littoral est également localisée en bas de rampe et, à cet endroit, l'enfouissement est le plus important. Parallèlement, on y trouve une forte densité de population qui pourrait bénéficier de ce potentiel géothermique.

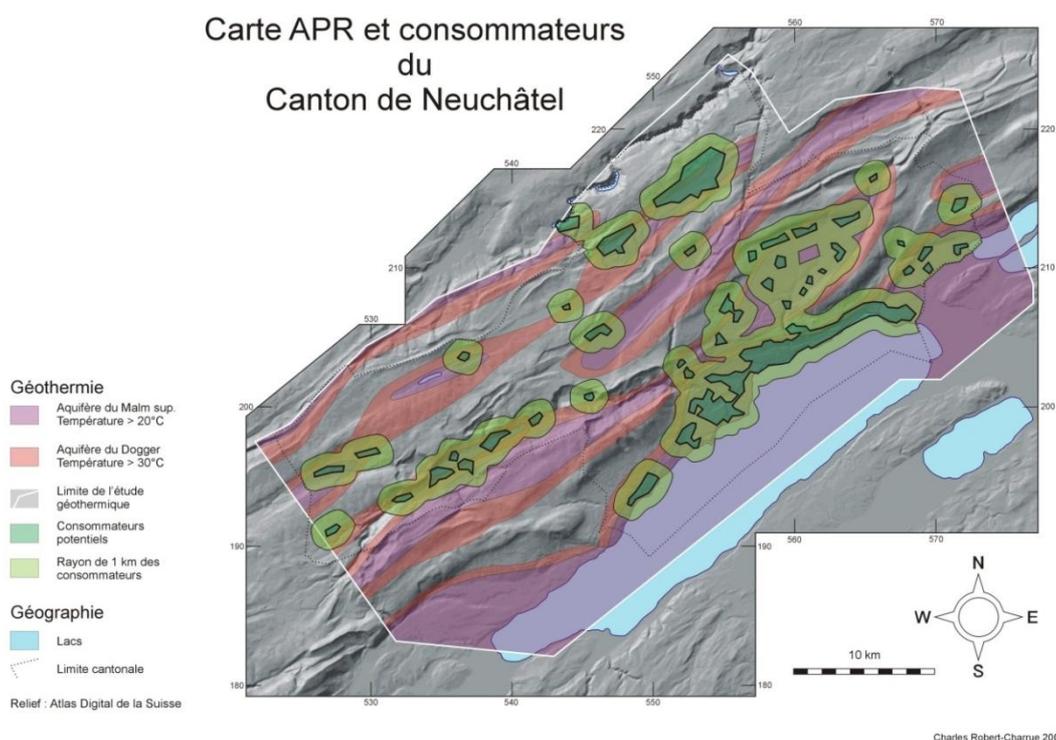


Figure 6.5. Carte des consommateurs potentiels combinée au potentiel géothermique théorique du Malm et du Dogger (PGN, Figure 5.18. et Annexe 5.8).

Dans l'étude PGN (2008), lors de l'estimation des puissances géothermiques pour un certain nombre de sites, un débit minimal de $10 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ainsi que le gradient de $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ ont été utilisés par défaut. Cependant, il n'a pas été tenu compte de l'effet d'une éventuelle concentration de conduits karstiques ou de l'abaissement de la zone saturée qui pourraient produire un refroidissement supplémentaire.

La température des aquifères du Malm et du Dogger étant relativement faible, leur exploitation à des fins géothermiques ne pourrait vraisemblablement pas se faire sans l'utilisation de pompes à chaleur. Par contre, dans le cas de nouveaux quartiers construits avec les standards Minergie ou d'éco-quartiers, des fluides d'une température de l'ordre de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ pourraient peut-être être exploités de manière directe sans pompe à chaleur. Le débit du Malm est vraisemblablement supérieur à celui utilisé pour les calculs du Tableau 6.2 et un débit doublé donnerait évidemment une puissance thermique doublée. Il faut également garder à l'esprit que ces puissances, bien que pouvant être de valeur égale, ne le sont pas dans la réalité de l'utilisation. En effet, en passant du Malm au Dogger par exemple, un débit plus faible peut être compensé par une température plus élevée. Si l'on compare les aquifères du Muschelkalk et du Dogger qui ont des puissances estimées similaires, les températures plus élevées du Muschelkalk permettent potentiellement de ne pas utiliser de pompes à chaleur et d'avoir un rendement plus élevé. D'autre part, une ressource à plus haute température implique souvent un rejet à température plus élevée également, sauf si des utilisateurs de chaleur en cascade peuvent être connectés au CAD. C'est pour ces raisons, la puissance théorique de l'aquifère du Muschelkalk est proche de celle du Dogger.

Tableau 6.2. Puissance géothermique estimée pour une sélection de sites (Marin-Epagnier, Neuchâtel, Valangin et La Chaux-de-Fonds) et pour les trois aquifères profonds (PGN, 2008; Tableau 5.8.).

	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 ⁻¹	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	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	1.4	1.1	1.4	1.3

6.3 Méthodologie de l'étude

6.3.1 Quantification du potentiel

La quantification du potentiel géothermique des aquifères profonds présents sur le territoire du canton de Neuchâtel s'est effectuée en se basant principalement sur les résultats de l'étude PGN, puisqu'il n'y a pas de nouvelles données à disposition sur les APR. Pour commencer, un modèle des APR a été créé en les découpant en blocs où les différents paramètres (température, profondeur) sont considérés comme constants. Ensuite, en se basant sur la formule de Gringarten (1978) reprise par les directives de l'OFEN (1992), il a été possible de calculer une puissance théorique pour un doublet dans ces blocs-aquifères. Il a suffi, dès lors, de multiplier cette puissance par le nombre de doublets qu'il est théoriquement possible d'implanter pour obtenir un potentiel par bloc-aquifère.

6.3.2 Constitution du modèle par bloc-aquifère

Ce type de modèle relativement grossier a été choisi en raison de la quantité et de la qualité des données à disposition. En effet, l'absence de forages et d'informations précises sur le sous-sol profond ne permet ni d'établir un modèle plus précis ni de le calibrer. Les aquifères du Malm et du Dogger ont donc été découpés grâce aux coupes établies lors du projet PGN et aux accidents tectoniques majeurs connus dans le canton (Figure 6.6). Les informations concernant le Muschelkalk étant encore plus lacunaires, et considérant que cet aquifère est vraisemblablement présent sur l'ensemble du territoire cantonal, ses caractéristiques ont été considérées constantes.

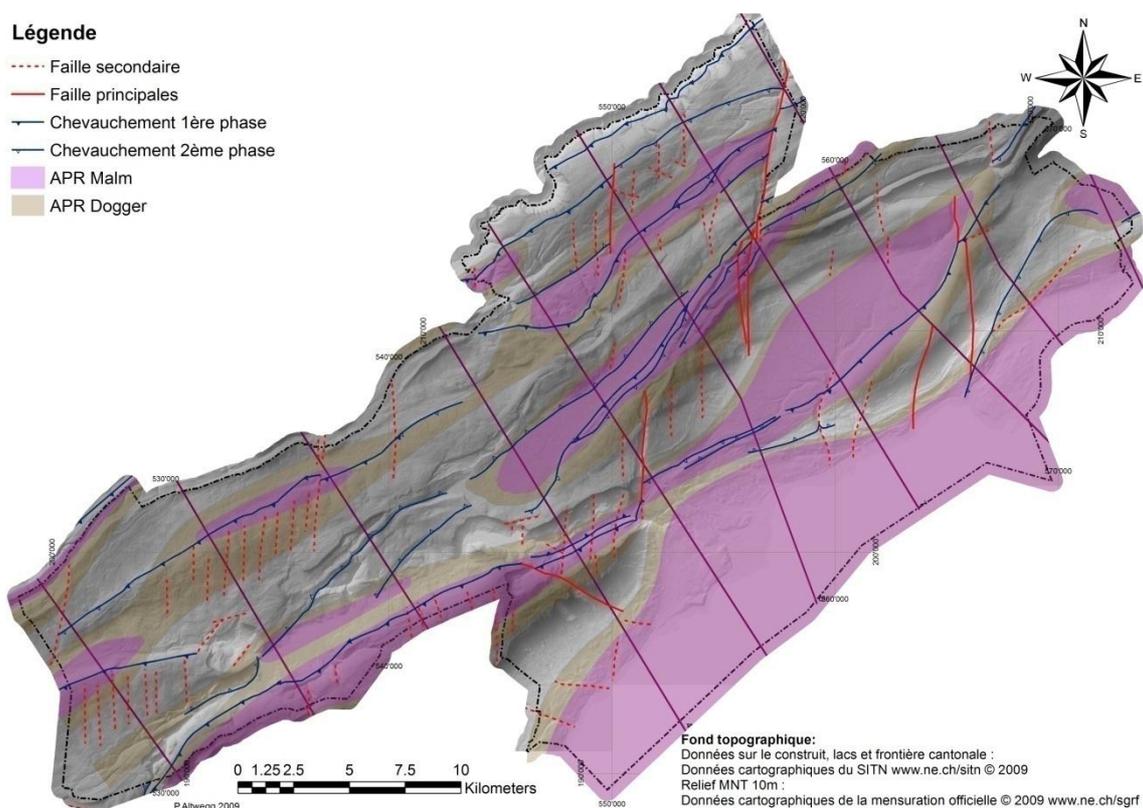


Figure 6.6. Carte des aquifères profonds, localisation des coupes géologiques PGN et des principaux accidents tectoniques dans le canton de Neuchâtel.

6.3.3 Puissance théorique des installations

La puissance thermique théorique maximale d'un forage géothermique peut être calculée en suivant les recommandations de l'OFEN (1992) grâce à la formule de Gringarten (1978) :

$$Q_{géo} = \rho C_p \cdot D \cdot \Delta T \text{ en } W_{th}$$

avec :

ρ la masse volumique du fluide en $kg \cdot m^{-3}$

C_p la chaleur spécifique en $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

D le débit en $m^3 \cdot s^{-1}$

ΔT la différence entre la température de production et celle de réinjection en $^\circ C$

Dans le cas de cette étude, le fluide considéré est de l'eau et ρC_p vaut donc $4.186 \cdot 10^6$. En utilisant l'unité de débit $l \cdot s^{-1}$ pour obtenir une puissance théorique en MW_{th} , ce nombre doit être multiplié par 10^{-9} , ce qui donne la formule la suivante :

$$Q_{géo} = 4.186 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot \Delta T \text{ en } MW_{th}$$

La puissance théorique dépend donc uniquement du débit et du différentiel de température, et si l'une de ces deux variables est fixe, la puissance théorique est proportionnelle à la deuxième.

Température

La différence de température exploitable va dépendre de plusieurs facteurs parmi lesquels la température de la ressource et le mode d'utilisation du fluide ont évidemment une influence prépondérante.

La température de la ressource dépend principalement de la profondeur de la roche mère et de la vitesse du fluide dans la roche et dans le forage. En effet, la roche va chauffer le fluide qui y circule jusqu'à l'équilibre thermique. Or, dans le cas de roches fortement karstifiées, les vitesses d'écoulement ne permettent pas cet équilibre et la température de la ressource sera donc inférieure à celle du massif régional. Les forages effectués dans la région de l'arc jurassien montrent qu'en règle générale, lorsque les débits sont élevés, la température de la ressource est sensiblement plus basse (Figure 6.7).

Dans le Tableau 6.3, les données d'une sélection de forages localisées dans l'arc jurassien sont présentées. A partir de ces données, on peut mettre en relation la température du réservoir et le débit (Figure 6.7) ainsi que la profondeur du réservoir et le débit (Figure 6.8).

Tableau 6.3. Données de différents forages de la région de l'arc jurassien tirées de la base de données BDFGeotherm (www.crege.ch/BDFGeotherm/) sauf pour le forage de Bevaix (données PGN).

A) Canton de Neuchâtel	Température du réservoir (°C)	Débit (l·s⁻¹)	Profondeur (m)	Aquifère
Bevaix	9 - 15	75	300	Malm
St-Aubin				
SA1	11 - 13	31	313	
SA2	13 - 14	20	380	Malm
SA3	12 - 13	20	315	
Val de Ruz				
Dombresson	13	?	372	Crétacé - Malm
La Brévine				
Puits communal	7	?	450	Malm
La Chaux-du-Milieu				
Clé d'Or	6 - 7	?	450	Malm
Le Locle				
Col des Roches	Gradient géothermique : 14 °C·km ⁻¹	?	450	Malm

B) Autres cantons	Canton	Température du réservoir (°C)	Débit (l·s⁻¹)	Profondeur (m)	Aquifère
Courtemaîche	JU	25	7.9	257	Malm
Delémont	JU	22 – 25			Malm
S1			28	356	
S2			15	352	
S3			28	352	
Muriaux	JU				
FM1		13	12	498	Dogger
FM2		13	5	500	Dogger
Moiry	VD	18 – 20	6	370	Malm
Yverdon F4	VD	30 – 35	28	455	Malm
Yverdon F5	VD				
200		25	83	200	Malm
400		30 – 35	42	400	Malm
784		40 – 45	1.8	784	Malm
1117		40 - 60	2.5	1117	Dogger
Yverdon	VD				
La Grève 1 (Arkina)		35 – 40	15.3	682	Malm
Thônex F1	GE	70 – 75	3.1	1998	Dogger

Hermrigen F1 1300 2050	BE	50 85	2.8 —	1300 2050	Dogger Muschelkalk
Moutier La Foule	BE	12	83	190	Malm
Sonvillier SON1 SON2	BE	20 15	22.5 18.3	445 330	Malm
Tavannes	BE	14	27.5	315	Malm
Schinznach Bad S2 S3A1 S3A2	AG	50 – 55 55 – 65 65	6.8 8.3 0.75	692 744 944	Muschelkalk
Seon	AG	20	25	291	Molasse
Reinach	BS	80 – 90	0.1	1793	Muschelkalk
Riehen	BS	65 – 70	20	1247	Muschelkalk
Itingen	BL	22	4.8	246	Muschelkalk

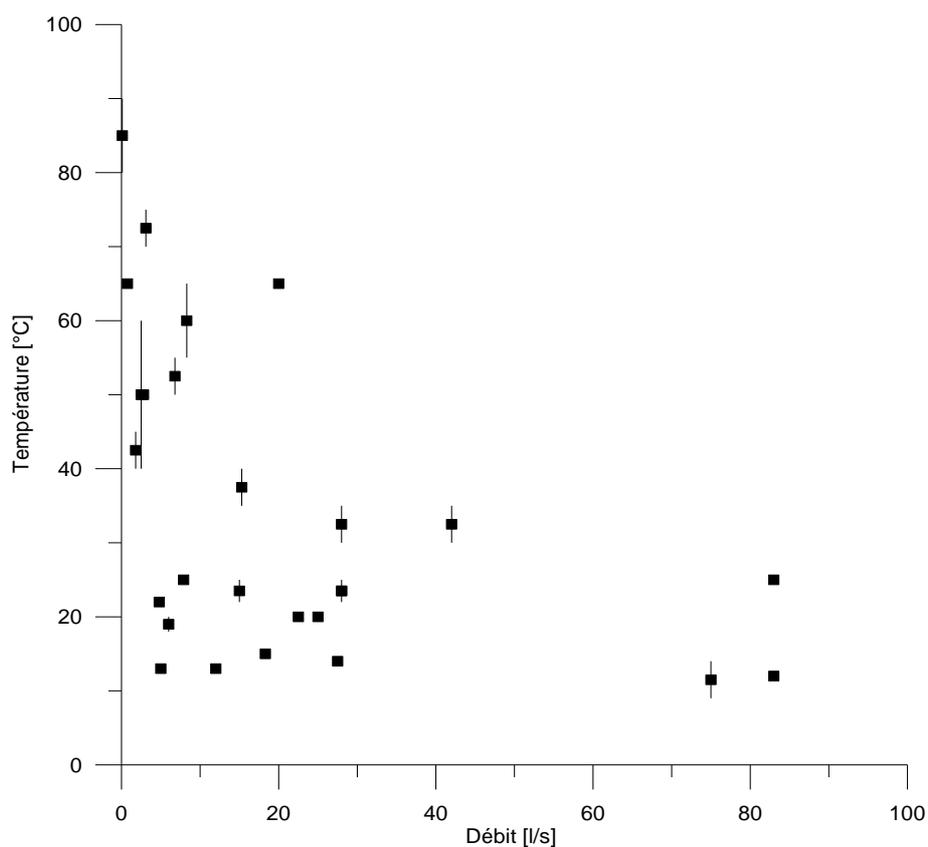


Figure 6.7. Température en fonction du débit dans différents forages de la région de l'arc jurassien. Les données utilisées sont celles du Tableau 6.3.

Dans cette étude et en l'absence de données suffisantes, seuls la profondeur et un gradient géothermique moyen de 30 °C/km ont été pris en compte pour déterminer la température de la

ressource dans le canton de Neuchâtel.

On distingue deux modes d'utilisation du fluide géothermique : l'usage direct et l'usage indirect au moyen d'une pompe à chaleur. Pour l'utilisation directe, la chaleur du fluide est employée directement, si possible en cascade jusqu'à une température de l'ordre de 20 °C.

Avec une pompe à chaleur, la température du fluide va être élevée par cette dernière avant de servir dans l'installation de chauffage. Cette technique a l'avantage de permettre l'usage de fluides géothermiques dont la température est trop basse, mais elle a un coût énergétique. Par contre, l'utilisation d'une pompe à chaleur permet d'abaisser la température du fluide à 10 °C environ, ce qui représente un gain par rapport à l'usage thermique direct des fluides.

Débit

Les débits attendus sont fonction du faciès de la roche réservoir. Dans les cas qui nous intéressent ici, plus la composante marneuse (étanche) est importante, plus les débits seront faibles. Pour la détermination des débits, il faut également tenir compte de la profondeur. En effet, il a été constaté, qu'en règle générale, plus un forage est profond, moins les débits sont importants en raison d'une diminution de la karstification dans les calcaires et de la densité des fractures ouvertes qui est plus faible (Figure 6.7).

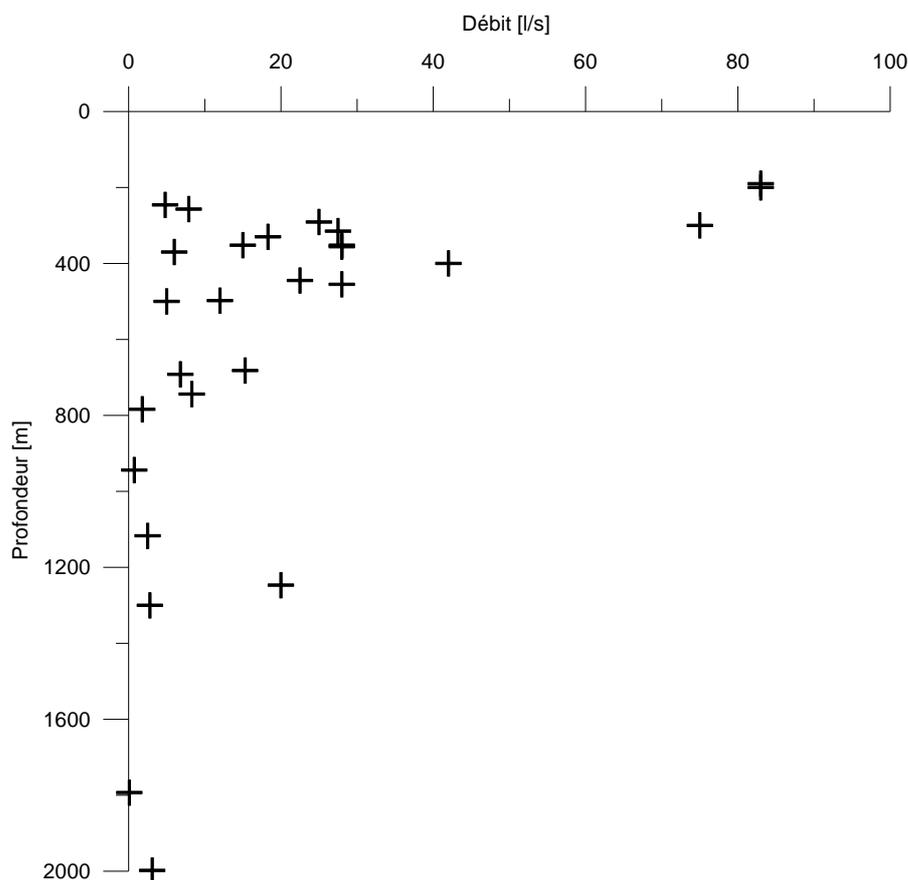


Figure 6.8. Variation du débit en fonction de la profondeur pour les différents forages de l'arc jurassien (données du Tableau 6.3).

Un autre facteur important pour la détermination des débits est l'état de fracturation de la roche. En effet, une roche dure (par ex. calcaire) fortement tectonisée aura une perméabilité nettement plus importante et par conséquent, les débits seront vraisemblablement plus élevés. Le Tableau 6.4 résume les débits établis dans cette étude pour les différents aquifères profonds et deux types de conditions de la roche. Cela a également permis de réaliser un abaque des puissances probables

pour le canton (Figure 6.8).

Tableau 6.4. Débits attendus dans les différents aquifères profonds du canton de Neuchâtel. Les débits sont exprimés en $l \cdot s^{-1}$.

Débits ($l \cdot s^{-1}$)	Malm	Dogger	Muschelkalk
Roche saine	15 – 20	10 – 15	10 - 15
Roche tectonisée	20 – 40	15 – 30	15 - 20

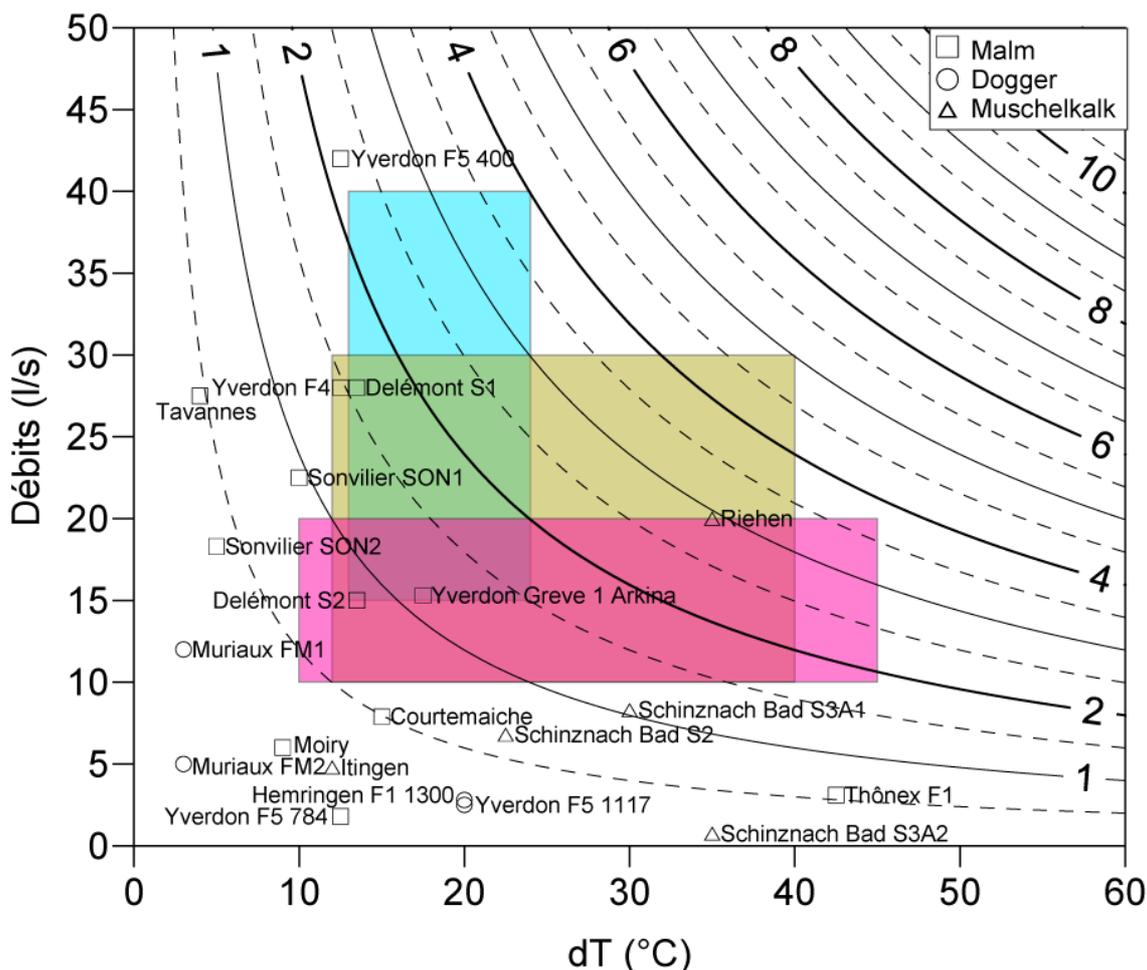


Figure 6.9. Abaque des puissances théoriques probables pour le canton de Neuchâtel. Les courbes représentent les puissances estimées en MW_{th} . Le rectangle bleu représente le domaine de puissance attendue pour le Malm, le rectangle brun celui attendu pour le Dogger et le rectangle violet celui du Muschelkalk. Ces puissances ont été calculées pour des températures de réinjection de respectivement 10 °C pour le Malm, 20 °C pour le Dogger et 30 °C pour le Muschelkalk. Les différents points représentés sont des forages effectués dans les divers aquifères de l'arc jurassien.

6.3.4 Calcul du potentiel des APR

Le débit, la température et la profondeur des aquifères étant considérés comme fixes pour un bloc-aquifère donné, il est possible de calculer la puissance théorique d'un doublet géothermique dans le bloc. De ce fait, si l'on connaît le nombre de doublets qu'il est possible d'implanter à la verticale d'un bloc-aquifère, il est possible de déterminer le potentiel théorique d'un bloc en multipliant la puissance théorique d'un doublet par ce nombre.

Calcul de l'emprise d'un doublet géothermique

Afin de connaître le nombre de doublets pouvant être installés à la verticale d'un bloc du modèle, il faut déterminer la surface d'emprise d'un doublet. Cette surface doit être calculée pour réduire au minimum le risque de percement thermique entre les deux forages ainsi que l'interaction entre des doublets voisins.

Les techniques de forage actuellement utilisées en géothermie ne permettent pas de dépasser une distance égale à la moitié de la profondeur entre le fond de deux puits forés depuis un même point en surface. Par conséquent, cette distance de $P/2$ a été choisie comme critère. En effet si cet intervalle est suffisant pour éviter le percement thermique entre les deux puits d'un même doublet, le double de cet espacement devrait pouvoir éviter toute interaction entre des doublets voisins.

La formule obtenue pour la surface d'emprise d'un doublet géothermique est la suivante :

$$S = P^2 \left(1 + \frac{\pi}{4} \right) \text{ en m}^2 \text{ où } P \text{ est la profondeur du puits en mètres.}$$

La géométrie de cette surface peut être observée sur la Figure 6.10.

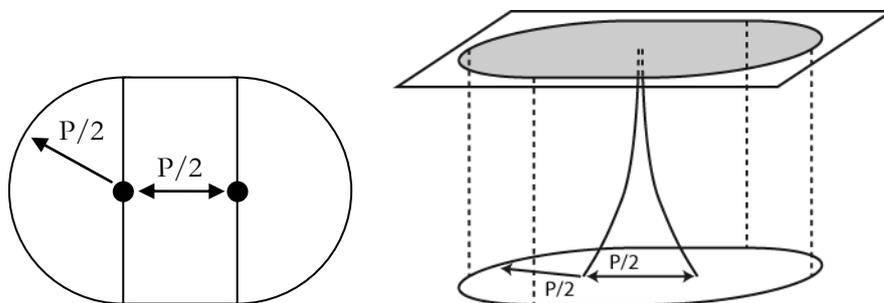


Figure 6.10. Zone d'emprise d'un doublet

Tableau 6.5. Exemple de surface d'emprise d'un doublet en fonction de sa profondeur

Profondeur du forage (m)	250	500	750	1000	1500	2000
Emprise (ha)	11	44	100	178	401	714

6.3.5 Consommateurs de chaleur

Afin d'affiner et de valider la carte des consommateurs de chaleur établie lors de PGN, le cadastre cantonal a été utilisé pour dresser une carte de la densité du volume construit par hectare. La distance de 1 km choisie lors de la première étude n'a plus été prise en considération, afin de se baser uniquement sur le domaine construit et, de ce fait, ces zones sont beaucoup moins étendues (Figure 6.11).

A cette carte ont également été ajoutés les réseaux de chauffage à distance (CAD) existants, même s'ils fonctionnent actuellement à des températures ne permettant pas une fourniture directe par l'énergie géothermique. Cependant, ils informent sur les régions où de tels systèmes sont aujourd'hui économiquement rentables. De plus, les réseaux devraient, dans les années à venir, subir progressivement une rénovation ayant pour but de réduire leur température de distribution.

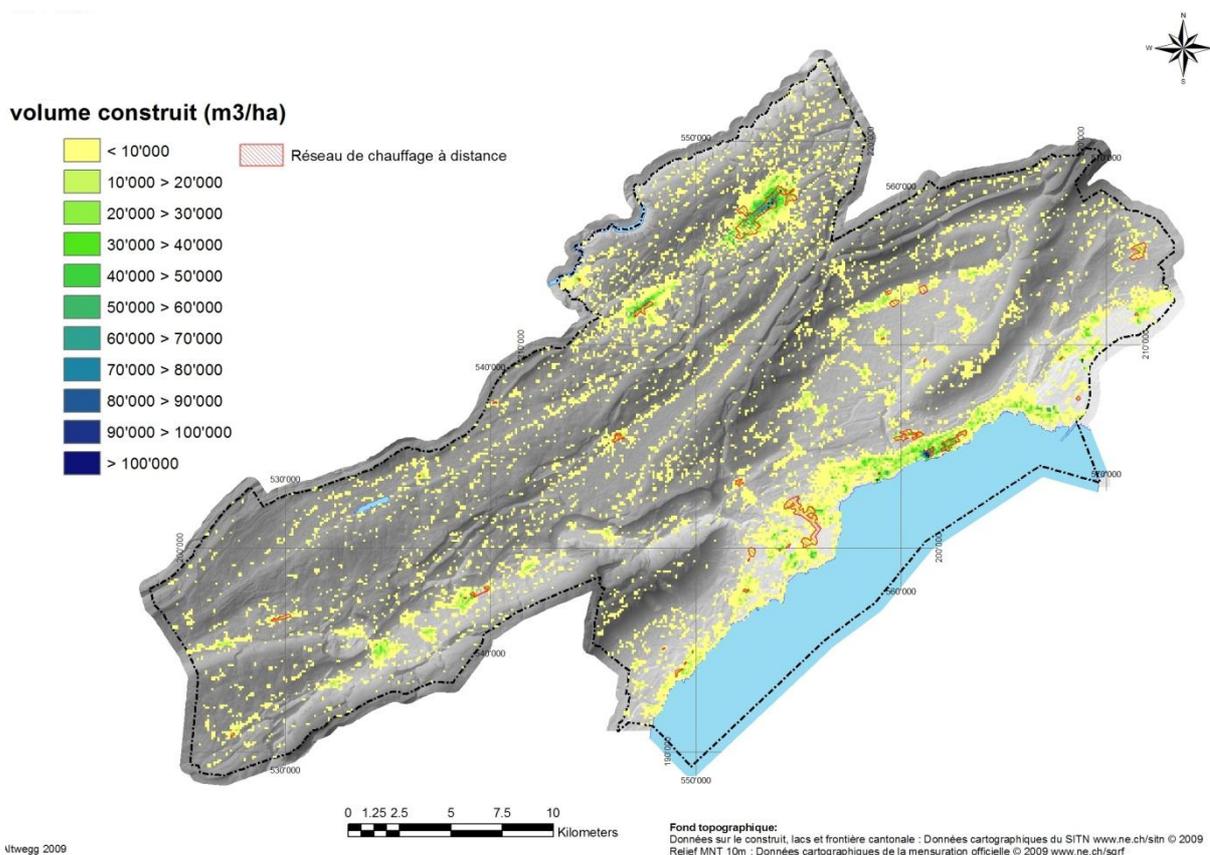


Figure 6.11. Carte des densités de volumes construits par hectare ($m^3 \cdot ha^{-1}$) dans le canton de Neuchâtel et des réseaux de chauffage à distance. Données sur le domaine construit, lacs et frontière cantonale : données cartographiques du SITN www.ne.ch/sitn © 2009. Fond topographique : MNT 10 m : données cartographiques de la mensuration officielle © 2009 www.ne.ch/sgrf.

6.4 Résultats

6.4.1 Potentiel géothermique global

En raison du grand nombre de paramètres intervenant dans le calcul du potentiel géothermique, il n'est pas possible d'obtenir un nombre unique pour quantifier le potentiel géothermique global. Ce dernier sera donc exprimé sous la forme d'un domaine min-max pour chacun des trois aquifères.

Tableau 6.6. Estimation des puissances géothermiques théoriquement disponibles pour les différents aquifères profonds présents sous la surface du canton de Neuchâtel.

Aquifères profonds	Malm	Dogger	Muschelkalk
Débits (l·s⁻¹)	15 – 20	10 – 15	10 - 15
Profondeur moyenne (m)	500	900	1750
Température moyenne (°C)	23.5	35	51
Surface potentielle (km ²)	212	406	803
Nombre de doublets théoriques	722	440	204
Puissance moyenne d'un doublet (MW_{th})	0.84 – 1.12	0.62 – 0.92	1.25 – 1.88
Puissance potentielle disponible (MW_{th})	595 - 795	260 – 390	255 - 384

Le potentiel cumulé des trois aquifères serait par conséquent compris entre 1.1 et 1.6 GW_{th} ce qui permettrait de couvrir l'ensemble des besoins en chauffage du canton de Neuchâtel. Il ne faut cependant pas perdre de vue un certain nombre de points :

- Le nombre d'installations considérées et leurs coûts pour exploiter l'ensemble de ce potentiel.
- Une partie de ce potentiel se situe dans des zones relativement éloignées des consommateurs.
- La puissance calculée par aquifère se base sur certaines hypothèses qui pourraient fortement les faire varier, suite à la réalisation des premiers forages de prospection.
- Seuls trois aquifères ont été considérés, mais il existe aussi un potentiel géothermique entre le Muschelkalk et le sommet du socle cristallin.

Les températures moyennes annuelles de l'air utilisées ici sont de 7 °C pour le Val-de-Travers et pour la région du Locle et de La Chaux-de-Fonds, ainsi que de 10 °C pour la région du Littoral. Comme lors de l'étude PGN (2008) et en l'absence de données locales, la température des aquifères a été calculée en utilisant un gradient uniforme de 30 °C/km. Ce calcul est une estimation qui ne tient pas compte d'un possible drainage du flux géothermique par les écoulements karstiques. Par conséquent, les puissances thermiques calculées sont vraisemblablement trop élevées pour l'aquifère du Malm.

6.4.2 Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde

Une présélection de sites de forages potentiels a été effectuée pour une dizaine de communes du canton. Ces communes ont été sélectionnées sur la base de leur nombre d'habitants, de la densité du volume construit, ainsi qu'en fonction des conditions géologiques locales établies grâce à des coupes. Il a été décidé que ces sites devaient également avoir une surface horizontale supérieure ou égale à 4000 m², ce qui représente l'emprise standard d'un chantier pour un forage de 2000 m de profondeur. Il ne s'agit néanmoins pas d'une liste exhaustive des sites potentiels et, tant la liste des communes que celle des sites devront être modifiées lors de la phase préliminaire d'un projet de géothermie profonde. La surface choisie variera en fonction de l'aquifère cible, de la densité d'habitation et des contraintes économiques et environnementales. Une analyse multicritère a été menée sur ces sites, afin de déterminer lesquels étaient les plus favorables. Les critères de pondération sont présentés dans le Tableau 6.7, mais aucune étude détaillée des sites n'a été menée au cours de cette étude.

Tableau 6.7. Critères de pondération utilisés pour l'analyse des sites de forages potentiels.

Géologie	++	Faille transformante et chevauchement
	+	Faille transformante ou chevauchement
	+/-	Pas de faille à proximité
Réseau de chauffage	++	Grand réseau, site attenant
	+	Grand réseau, site à proximité ou petit réseau et site attenant
	+/-	Réseau limité et site proche, ou grand réseau mais site relativement éloigné
	-	Réseau limité et site à proximité
	--	Pas de réseau
Nombre d'habitants	++	>10000 habitants
	+	>5000 habitants
	+/-	>4000 habitants
	-	>3000 habitants
	--	<3000 habitants

Afin de calculer les puissances disponibles par doublet géothermique et pour chaque aquifère, un certain nombre de paramètres a été établi. La température de retour du fluide a ainsi été fixée à 10 °C pour le Malm, 20 °C pour le Dogger et 30 °C pour le Muschelkalk avec des débits compris entre 15 et 20 l·s⁻¹ pour le Malm, entre 10 et 15 l·s⁻¹ pour le Dogger et de 10-15 l·s⁻¹ pour le Muschelkalk. Ces critères déterminent également les conditions d'utilisation de la ressource : le Malm est utilisable uniquement en le couplant d'une pompe à chaleur (PAC), le Dogger est utilisable sans PAC pour des éco-quartiers et des quartiers au standard Minergie, mais le recours à une PAC est obligatoire pour les autres cas. Le Muschelkalk, grâce à sa température de production plus élevée, peut être utilisé sans PAC.

Dans la série des zones sélectionnées ci-dessus, les informations sont présentées sous une forme identique : une coupe géologique, un plan de situation avec la localisation des parcelles, un tableau résumant les caractéristiques principales des trois aquifères potentiels et un tableau contenant l'évaluation des critères de présélection des sites.

Littoral Ouest

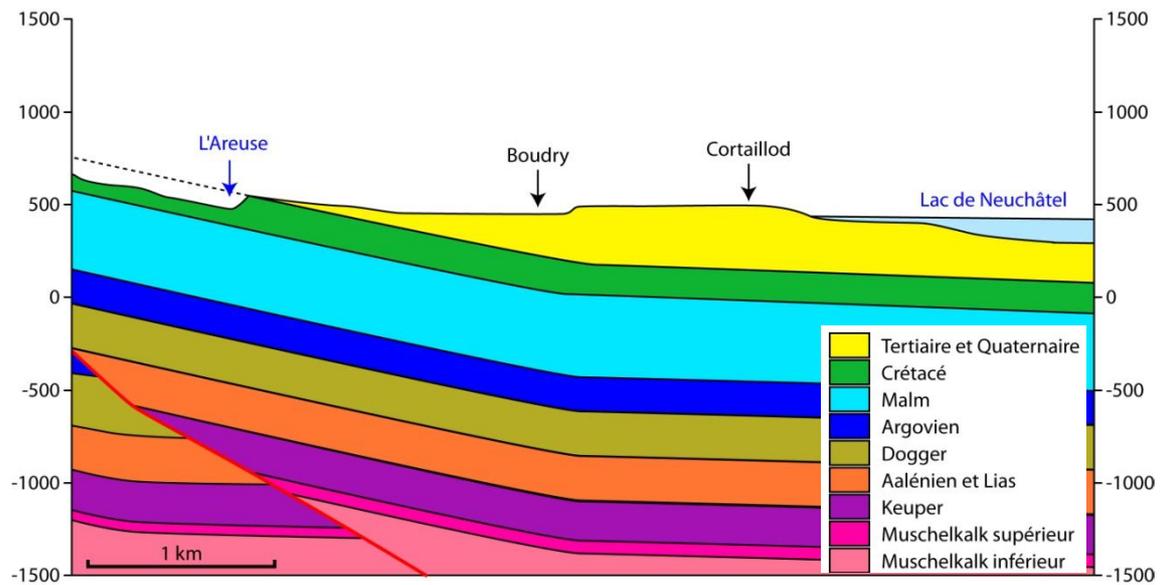


Figure 6.12. Coupe géologique NW-SE dans la région du Littoral ouest modifiée d'après la coupe no 5, PGN, 2008.

La région du Littoral Ouest est caractérisée géologiquement par un approfondissement des couches en direction du sud-est. La température augmente donc au fur et à mesure que l'on se rapproche du lac. Cependant, bien que favorable, la géologie ne présente pas d'accidents tectoniques prononcés qui favoriseraient les écoulements profonds aux abords des sites sélectionnés. Il faut ajouter à cela que les communes de Bevaix et de Cortailod possèdent relativement peu d'habitants et ne disposent pas de grands réseaux de chauffage à distance. Le site retenu se trouve sur la commune de Boudry, au lieu dit « Les Buchilles ». Deux autres sites ont été présélectionnés sur la commune de Colombier qui possède un vaste réseau de chauffage à distance. Ce dernier étant alimenté par l'usine d'incinération des ordures ménagères (SAIOD), ces sites ne pourront être envisagés qu'en cas de changement du fonctionnement du CAD. Les profondeurs des aquifères pour les sites sélectionnés ont été calculés grâce aux coupes 4 et 5 de l'étude PGN (2008).

Bevaix

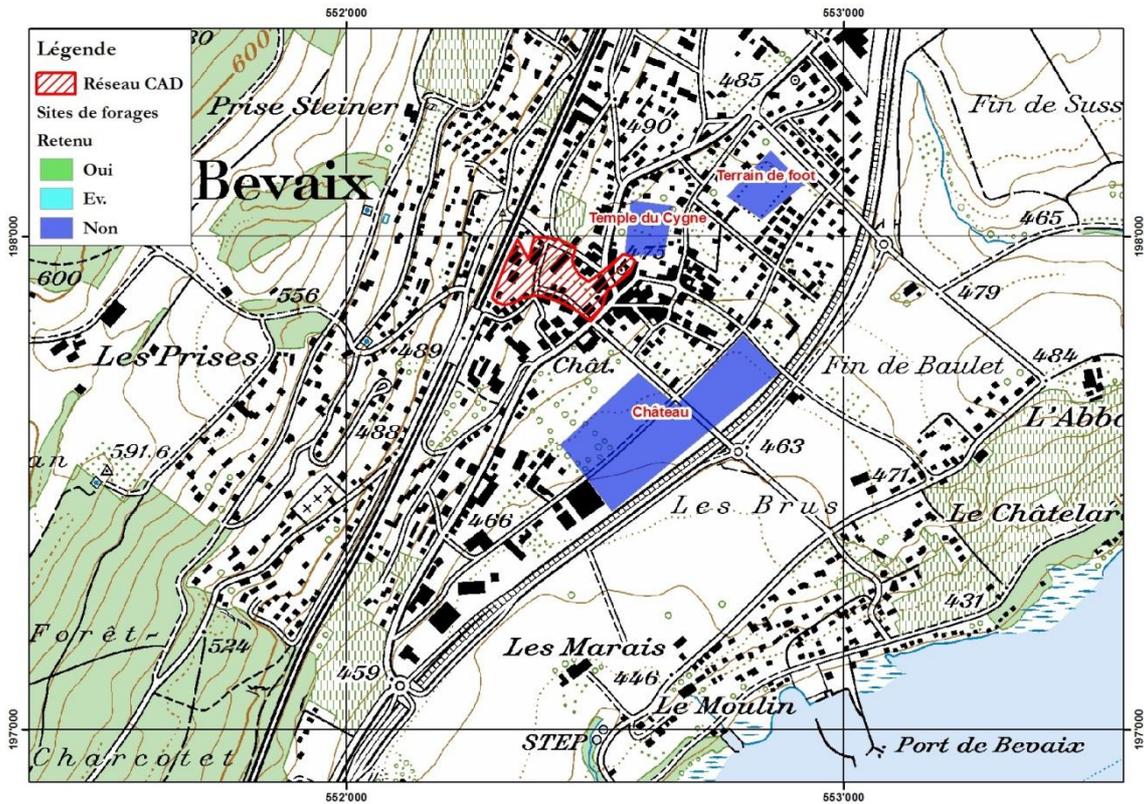


Figure 6.13. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde à Bevaix.

Tableau 6.8. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de Bevaix.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	500 – 915	1050 – 1350	1770 – 1870
Température (°C)	25 – 37	42 – 51	63 – 66
Puissance (MW _{th})	0.9 – 2.3	0.9 – 1.9	1.4 – 2.3

Tableau 6.9. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à Bevaix.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Château	60'000	+/-	+/-	-
Temple du Cygne	9'000		+	
Terrain de football	11'000		+/-	

Boudry

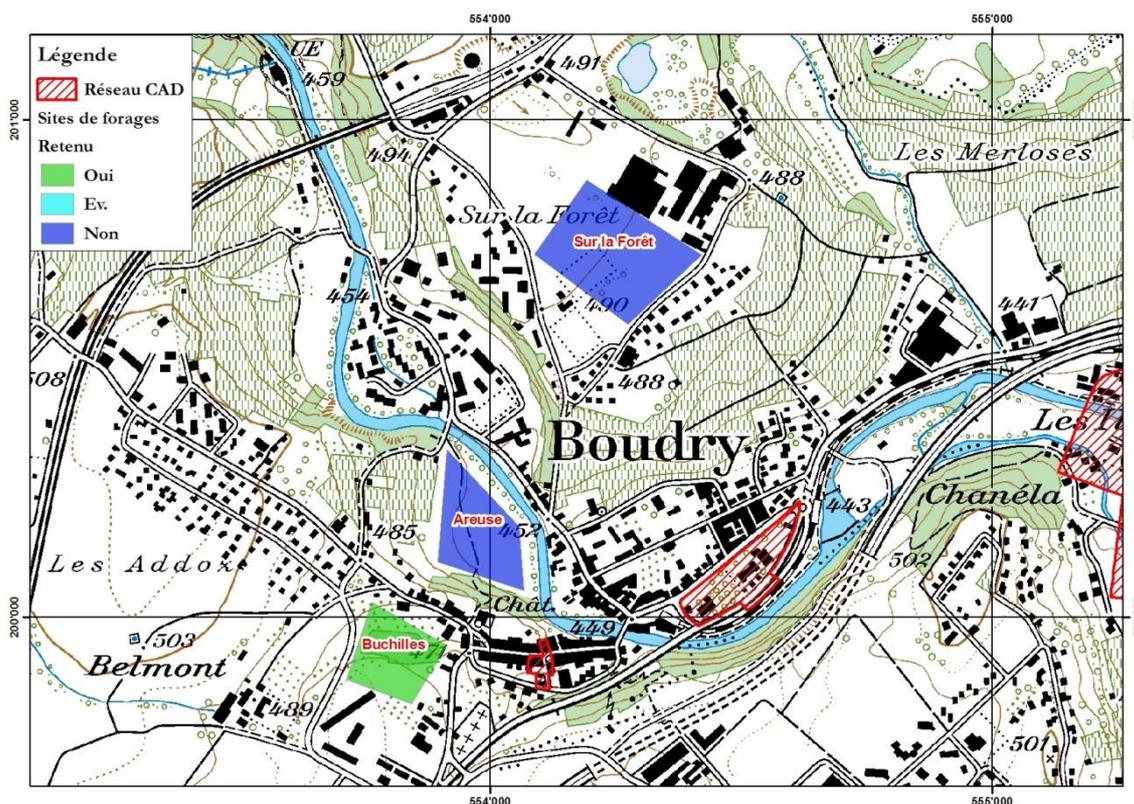


Figure 6.14. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde à Boudry.

Tableau 6.10. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de Boudry.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	350 – 875	1000 – 1300	1700 - 1800
Température (°C)	22 – 37	41 – 50	62 – 65
Puissance (MW _{th})	0.7 – 2.3	0.9 – 1.9	1.3 – 2.2

Tableau 6.11. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à Boudry.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Sur la Forêt	50'000	+/-	--	+/-
Areuse	25'000		--	
Buchilles	30'000		--	

Colombier

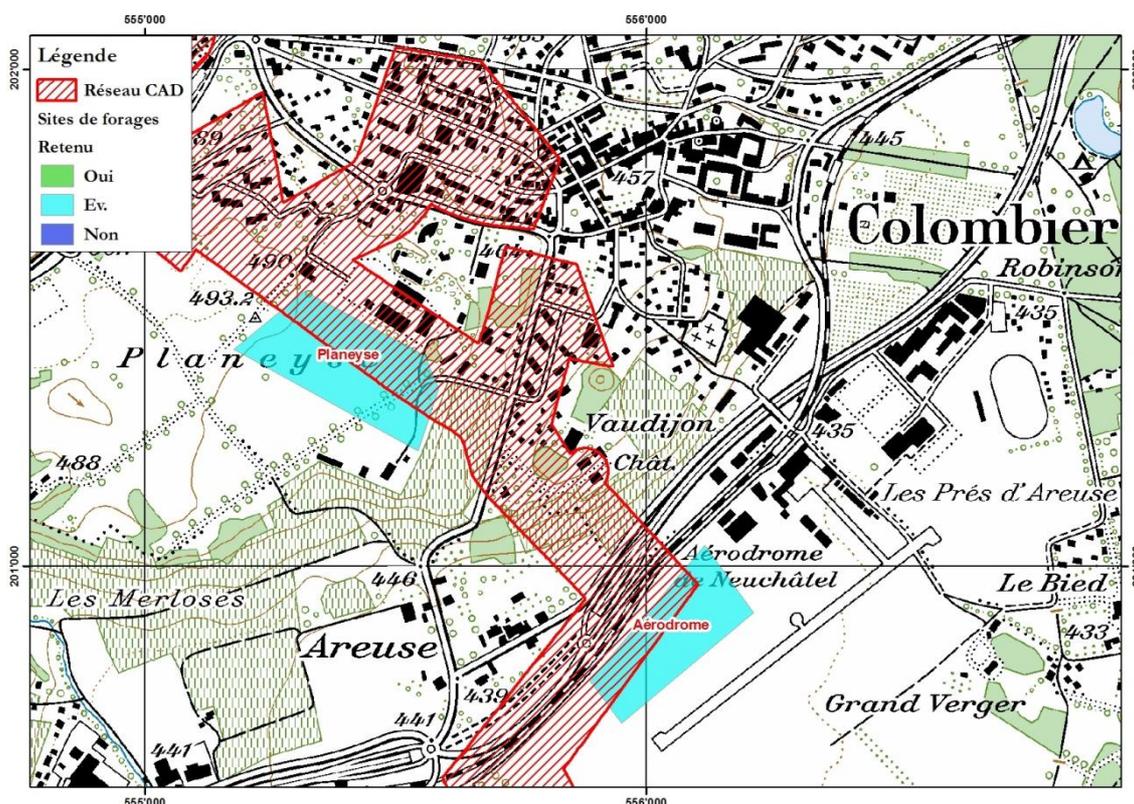


Figure 6.15. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde à Colombier.

Tableau 6.12. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de Colombier.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	350 – 750	1000 – 1300	1700 - 1800
Température (°C)	21 – 33	40 – 49	61 – 64
Puissance (MW _{th})	0.7 – 1.9	0.8 – 1.8	1.3 – 2.1

Tableau 6.13. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à Colombier.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Aérodrome	65'000	+/-	++	+
Planeyse	50'000		++	

Cortaillod

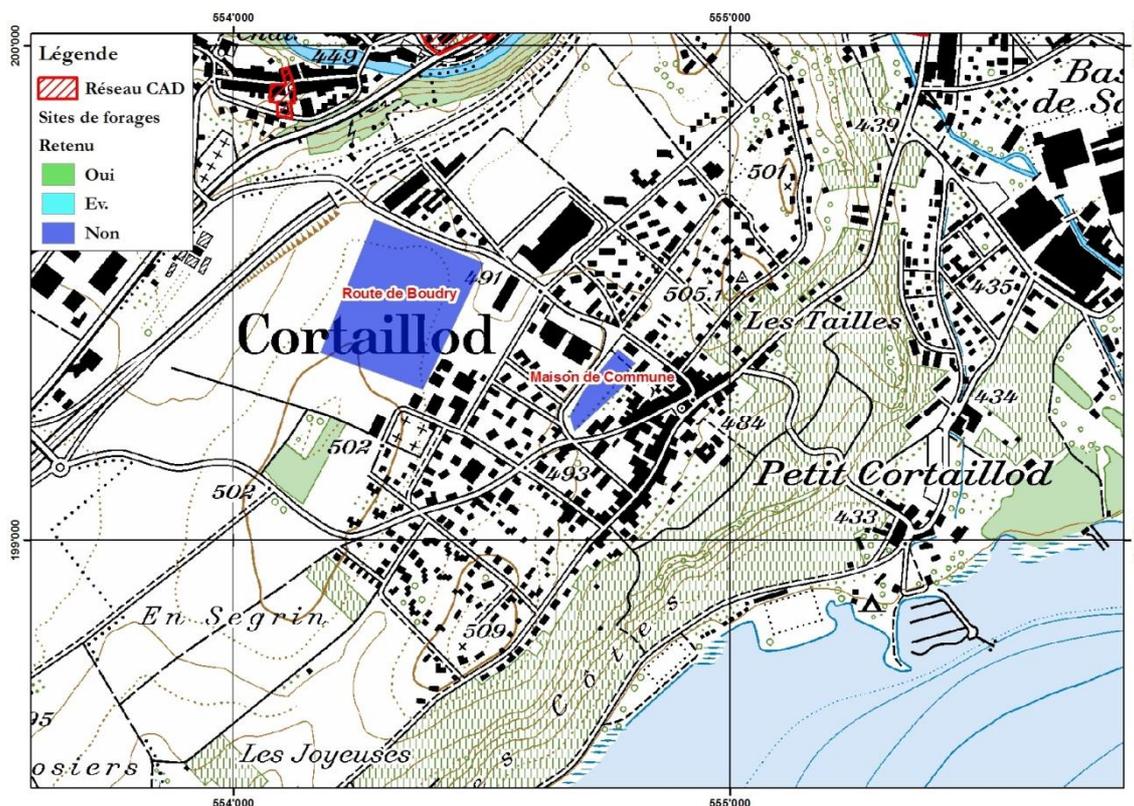


Figure 6.16. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde à Cortaillod.

Tableau 6.14. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de Cortaillod.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	500 – 915	1050 – 1350	1770 – 1870
Température (°C)	25 – 37	42 – 51	63 – 66
Puissance (MW _{th})	0.9 – 2.3	0.9 – 1.9	1.4 – 2.3

Tableau 6.15. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à Cortaillod.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Route de Boudry	65'000	+/-	--	+/-
Maison de Commune	8'500		--	

Val de Travers

Couvet

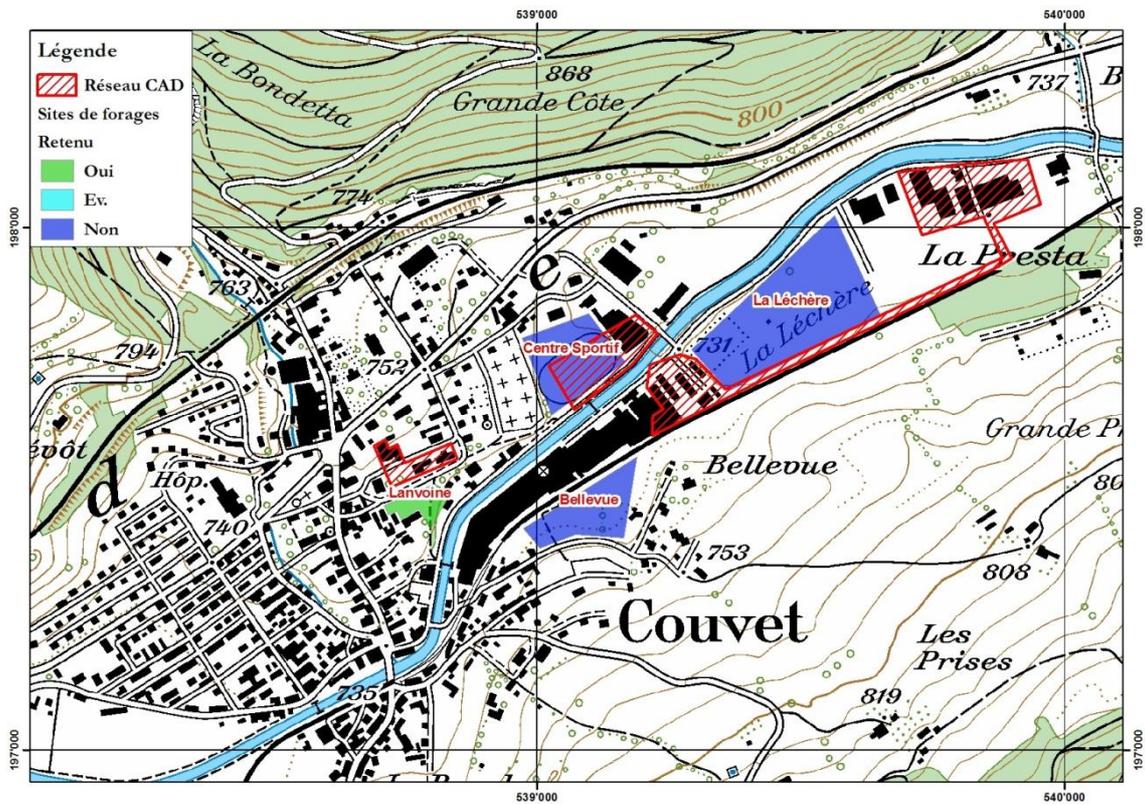


Figure 6.17. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde à Couvet.

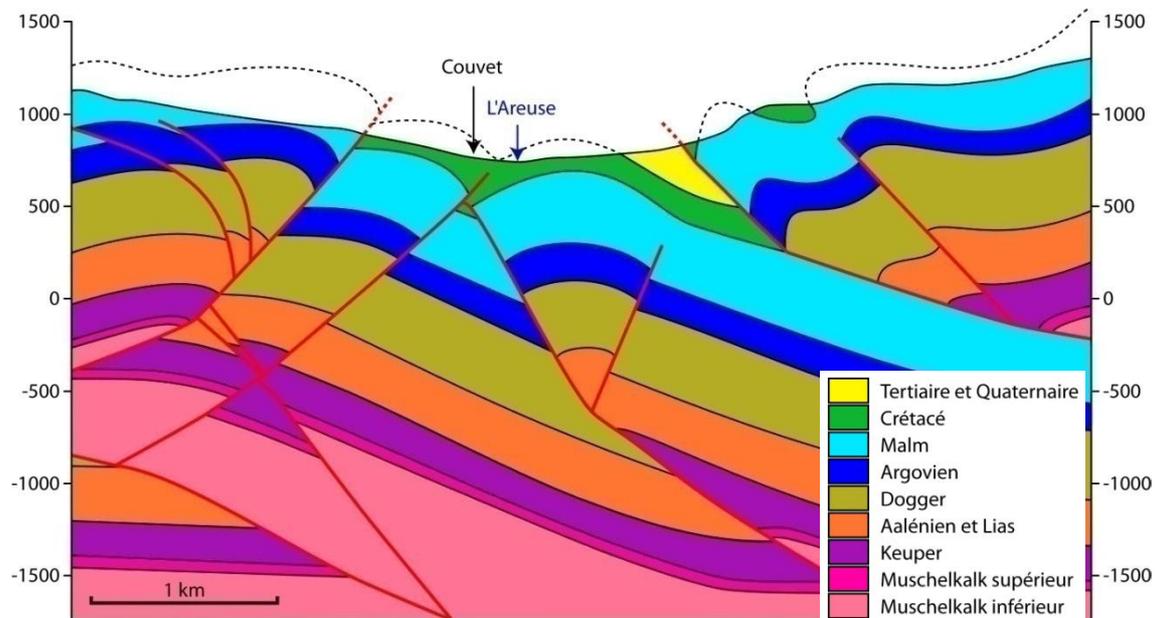


Figure 6.18. Coupe géologique NW-SE passant par Couvet, modifiée d'après la coupe no 3, PGN, 2008.

Tableau 6.16. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de Couvet.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	100 – 750	675 – 1400	1600 – 2000
Température (°C)	10 – 30	27 – 49	55 – 67
Puissance (MW _{th})	0 – 1.6	0.3 – 1.8	1.1 – 2.3

Tableau 6.17. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à Couvet.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Centre sportif	21'000	+	+/-	--
Lanvoine	4'800		+/-	
Bellevue	17'000		+/-	
La Léchère	55'000		+/-	

La région de Couvet est intéressante pour l'implantation d'un forage de géothermie profonde, car la géologie est particulièrement favorable du fait de la présence, à plusieurs profondeurs, de couches aquifères en raison des chevauchements et rétrochevauchements observés. Cet environnement géologique assez tumultueux peut apporter des avantages économiques avec l'option de pomper un fluide géothermique relativement profondément et de le réinjecter dans la même formation, mais à plus faible profondeur. D'autre part, les chances de réussite d'un forage sont augmentées en traversant plusieurs fois la même formation aquifère. Par contre, l'exploration de la zone sera plus difficile en raison de cette complexité géologique. Parmi les quatre sites présélectionnés, c'est celui de « Lanvoine » qui semble prioritaire, car il est le plus proche des consommateurs et proche des réseaux de chauffage à distance existants.

Fleurier

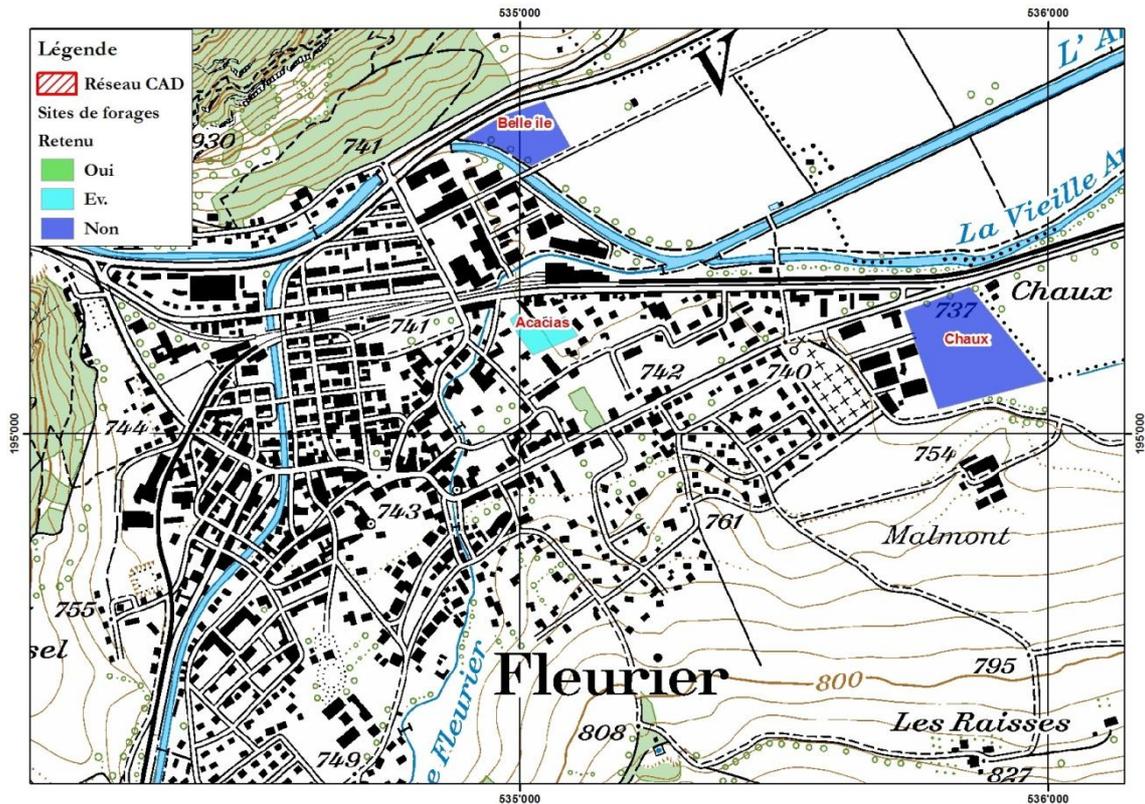


Figure 6.19. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde à Fleurier.

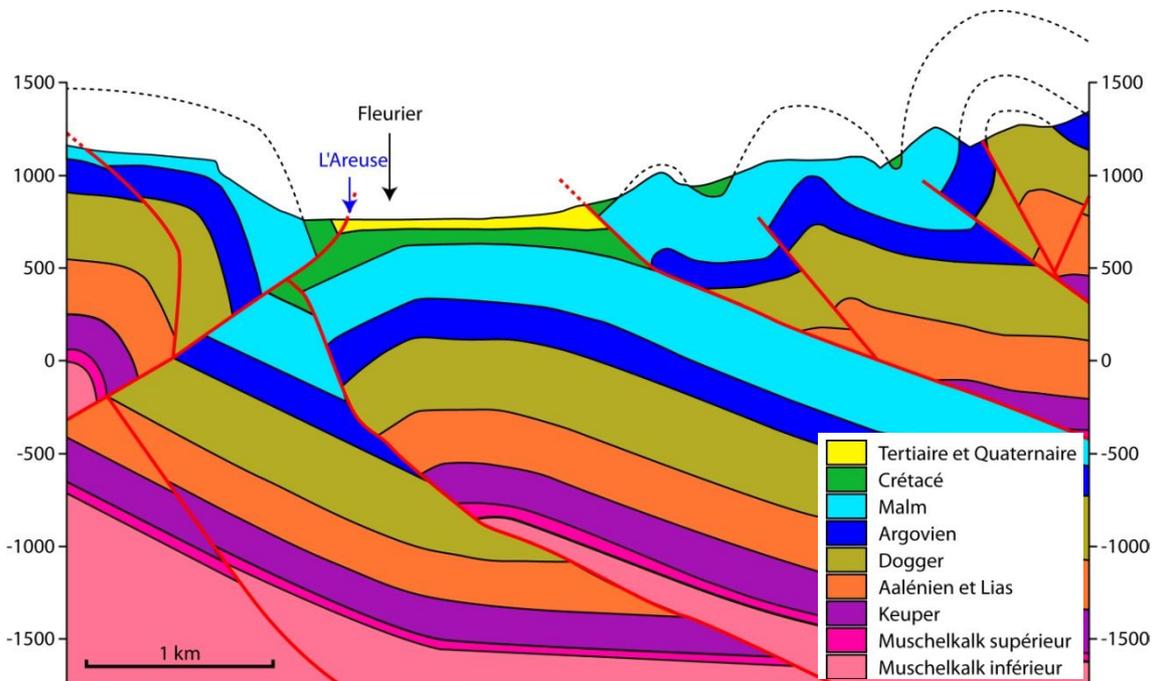


Figure 6.20. Coupe géologique NW-SE passant par Fleurier, modifiée d'après la coupe no 2, PGN, 2008.

Tableau 6.18. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de Fleurier.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	150 – 950	660 – 1750	2000 – 2300
Température (°C)	12 – 36	27 – 60	67 – 76
Puissance (MW _{th})	0.1 – 2.1	0.3 – 2.5	1.6 – 2.9

Tableau 6.19. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à Fleurier.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Chaux	35'000	+	--	-
Belle Île	12'500		--	
Acacias	5'200		--	

A Fleurier, les conditions géologiques sont proches de celles évoquées pour la commune de Couvet. La profondeur estimée des formations aquifères est même légèrement plus importante ce qui permettrait d'obtenir des températures plus élevées qu'à Couvet. Cependant l'absence de réseau de chauffage à distance diminue l'intérêt de cette zone. Toutefois, le premier site à investiguer serait celui dit des « Acacias » car il est plus proche des consommateurs de chaleur.

La Chaux-de-Fonds

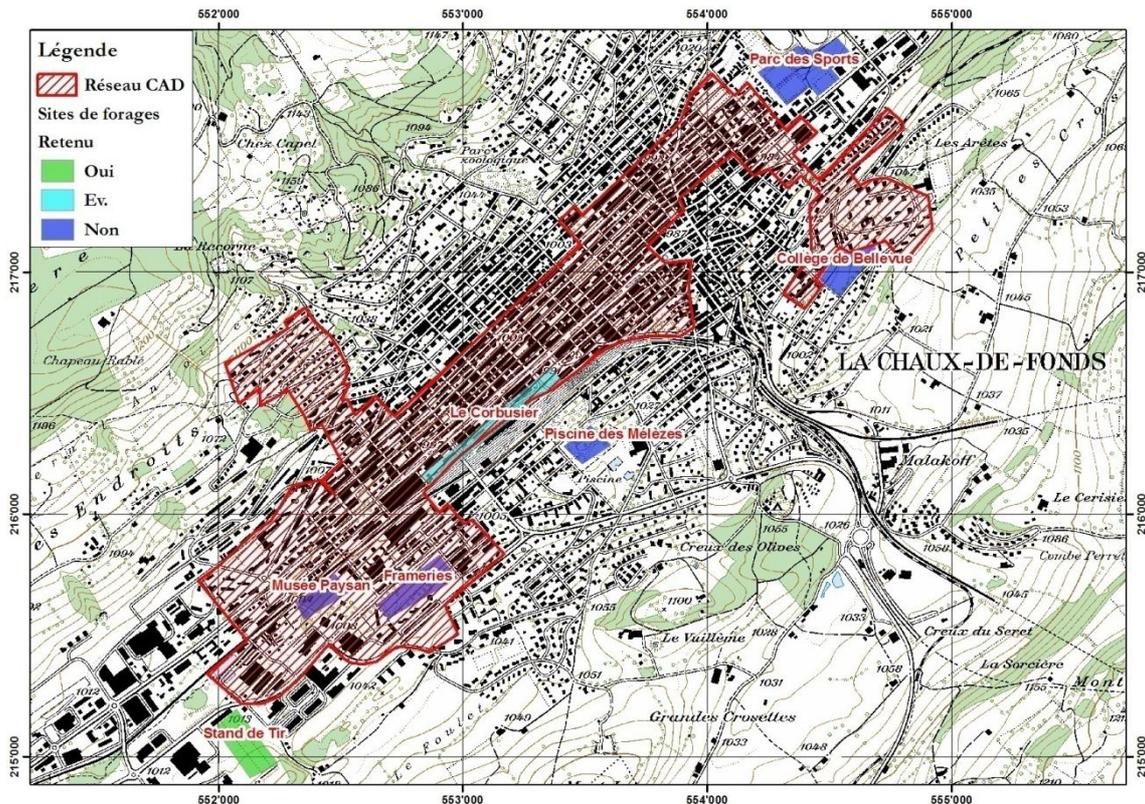


Figure 6.21. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde à La Chaux-de-Fonds.

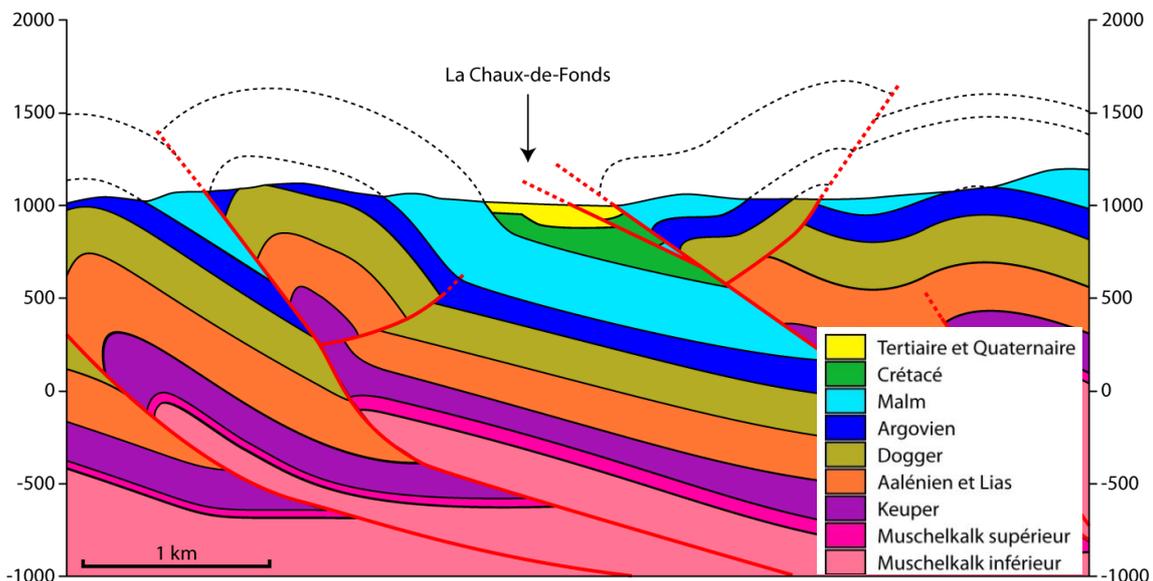


Figure 6.22. Coupe géologique NW-SE passant par La Chaux-de-Fonds, modifiée d'après la coupe no 7, PGN, 2008.

Tableau 6.20. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de La Chaux-de-Fonds.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	100 – 800	650 – 1150	1200 – 1700
Température (°C)	10 – 31	27 – 42	43 – 58
Puissance (MW _{th})	0 – 1.8	0.3 – 1.4	0.5 – 1.8

Tableau 6.21. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à La Chaux-de-Fonds.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Collège de Bellevue	22'000	+/-	++	++
Parc des sports	55'000		++	
Frameries	33'000		++	
Musée Paysan	18'000		++	
Le Corbusier	42'000		++	
Piscine des Mélèzes	16'000		+	
Stand de tir	33'000		++	
CISA	5'000		++	

La région de La Chaux-de-Fonds est géologiquement caractérisée par un approfondissement progressif des couches géologiques vers le sud-est. Cependant, les couches aquifères sont moins profondes que dans la région du Littoral et les températures attendues sont par conséquent inférieures. Par contre, la complexité géologique peut augmenter les chances d'obtenir un débit important. La présence d'un réseau de chauffage à distance bien développé et la forte densité de population en font une région propice pour un projet de forage géothermique profond.

Lors de contacts préliminaires, le Service de l'énergie de la ville a montré un fort intérêt, car La Chaux-de-Fonds fait partie des villes de l'énergie et un projet de géothermie profonde correspond à son plan directeur énergétique.

Deux sites sont à retenir particulièrement : le stand de tir, car il se trouve dans une région en développement et proche du réseau de chauffage à distance et le site de CISA où l'aménagement d'un quartier Minergie est prévu (projet MEU). Finalement, le quartier Le Corbusier au centre ville va être entièrement réaménagé, mais il est déjà trop tard pour inclure un projet de géothermie profonde à ce développement.

Le Locle

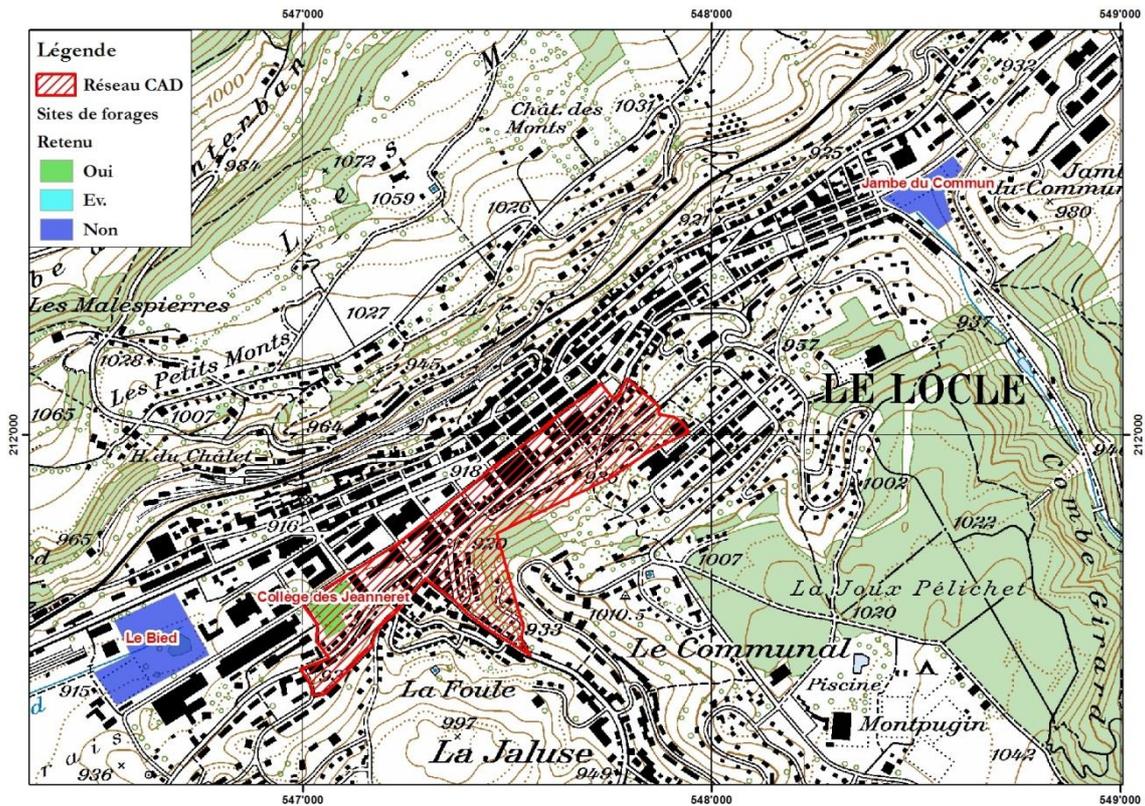


Figure 6.23. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde au Locle.

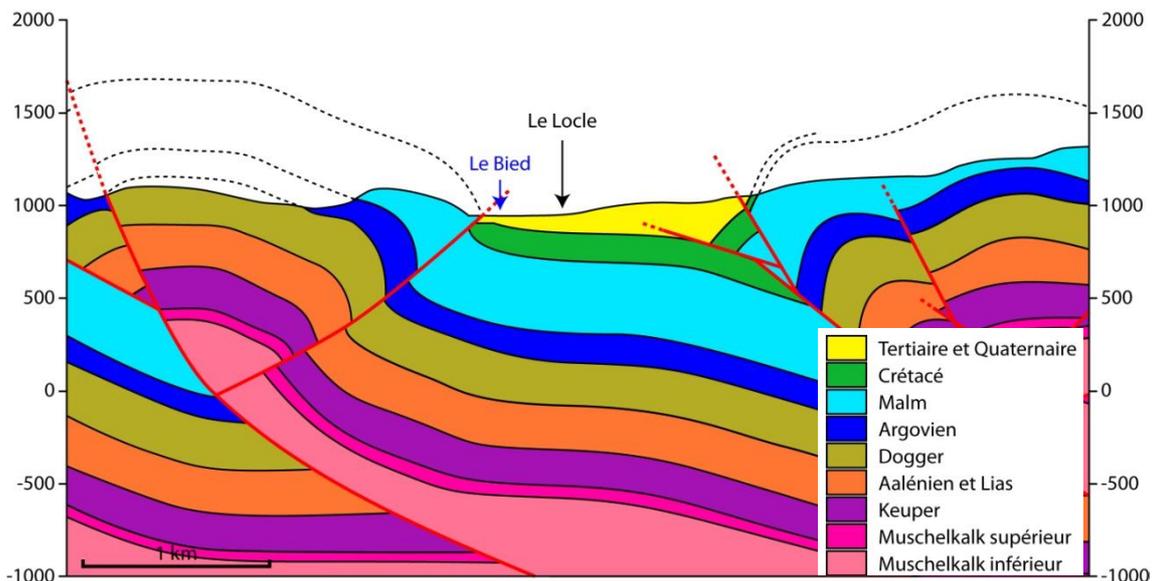


Figure 6.24. Coupe géologique NW-SE passant par le Locle, modifiée d'après la coupe no 5, PGN, 2008.

Tableau 6.22. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région du Locle.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	190 – 625	730 – 1020	1430 – 1875
Température (°C)	13 – 26	29 – 38	50 – 63
Puissance (MW _{th})	0.2 – 1.3	0.4 – 1.1	0.8 – 2.1

Tableau 6.23. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés au Locle.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Le Bied	40'000	+/-	+	++
Collège des Jeanneret	9'000		++	
Jambe du Commun	15'000	+	+/-	

La géologie de la région du Locle ressemble à celle de La Chaux-de-Fonds avec un approfondissement des couches vers le sud-est. Il s'agit d'une ville avec une forte densité de volume construit et un réseau de chauffage à distance important. Sur la base de ces critères, le site du Collège des Jeanneret est le plus intéressant car proche du réseau. Cependant, le site nommé « Jambe du Commun » se situe sur le prolongement d'une faille transformante. Ces failles facilitent généralement l'écoulement des fluides et par conséquent, si un forage recoupait cette faille en profondeur, le débit et donc la puissance attendus seraient nettement plus élevés. Les conditions géologiques sont similaires pour la région du Crêt-du-Locle qui n'a pas été retenu dans le cadre de cette étude, en raison de la faible densité actuelle des consommateurs de chaleur.

St-Blaise – Marin-Epagnier

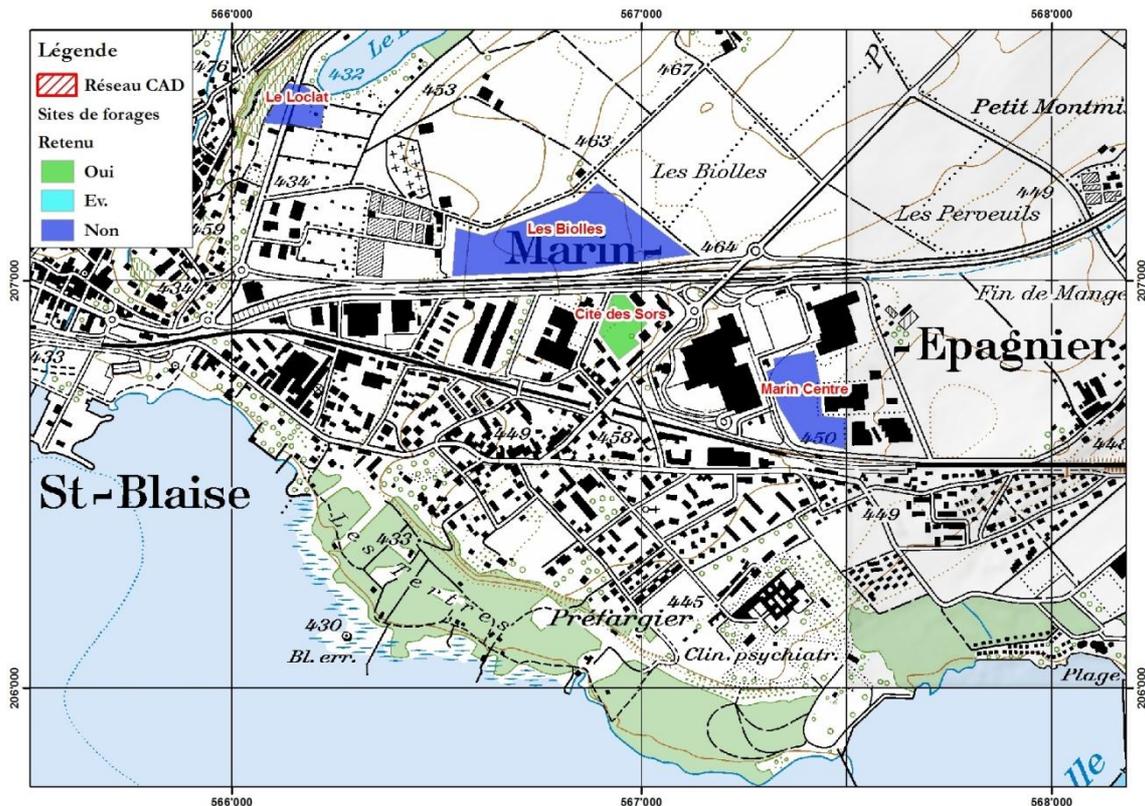


Figure 6.25. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde dans la région de St-Blaise – Marin-Epagnier.

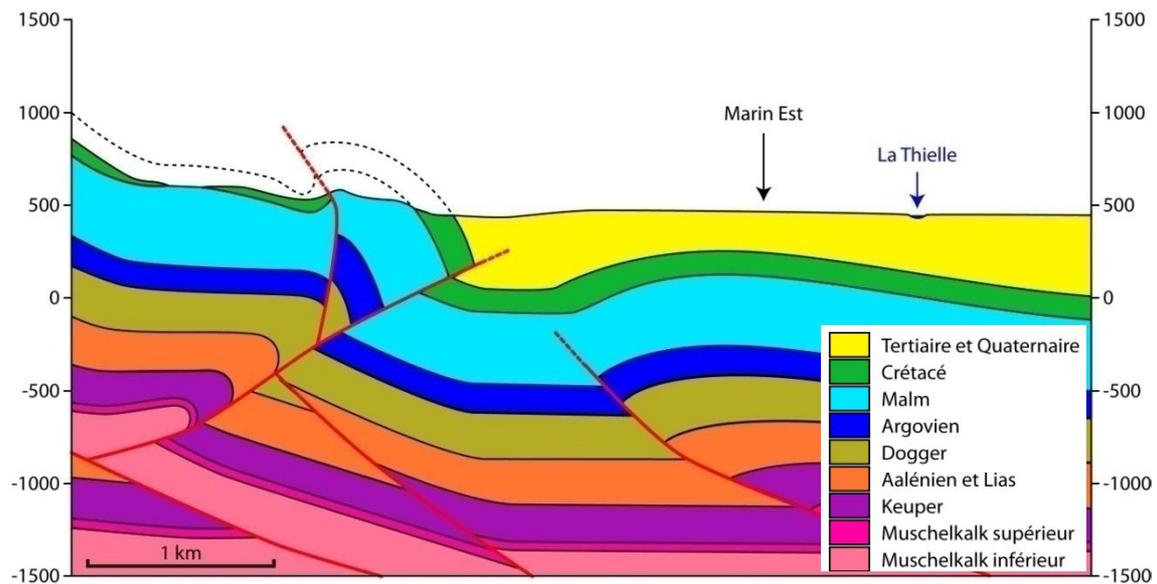


Figure 6.26. Coupe géologique NW-SE passant par Marin-Epagnier, modifiée d'après la coupe no 8, PGN, 2008.

Tableau 6.24. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de St-Blaise – Marin-Epagnier.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	350 – 915	850 – 1300	1670 – 1830
Température (°C)	21 – 37	36 – 48	60 – 65
Puissance (MW _{th})	0.7 – 2.3	0.7 – 1.8	1.3 – 2.2

Tableau 6.25. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à St-Blaise et Marin-Epagnier.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. habitants
Marin Centre	25'000	+/-	--	+
Cité des Sors	11'000		--	
Les Biolles	71'000		--	
Le Loclat	11'000	++	--	

La densité de volume construit est élevée dans cette région et la géologie est favorable pour entamer une prospection géothermique. De plus, des études préliminaires pour un projet de géothermie profonde ont été réalisées dans le passé (Matthey, 1986; GEOREPONSE, 1996; Tecnoservice Engineering, 2004), ce qui permettrait de raccourcir la phase A du projet. Cependant, le concept actuel a été lié à la construction d'une centrale à gaz à Cornaux et le site retenu à Marin n'est pas le plus favorable d'un point de vue géologique. En effet, si le seul critère de sélection est d'ordre géologique, le site le plus favorable serait celui du « Loclat » car il se trouve dans le prolongement d'une faille transformante et d'un chevauchement qui doivent favoriser la circulation des fluides. L'extension géographique et en profondeur de ces structures devrait être précisée au moyen d'une campagne de géophysique profonde (sismique réflexion et gravimétrie) avant le choix définitif du site.

Neuchâtel

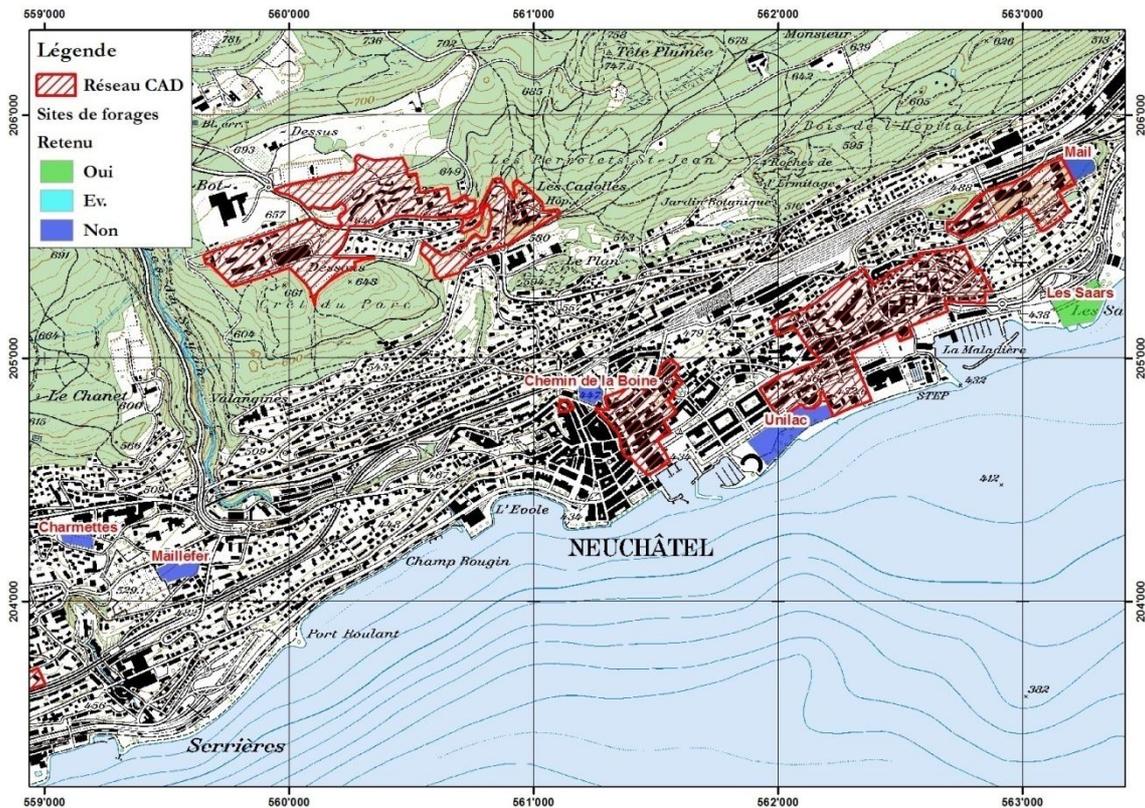


Figure 6.27. Sélection préliminaire de sites de forages pour une opération de géothermie profonde dans la région de Neuchâtel.

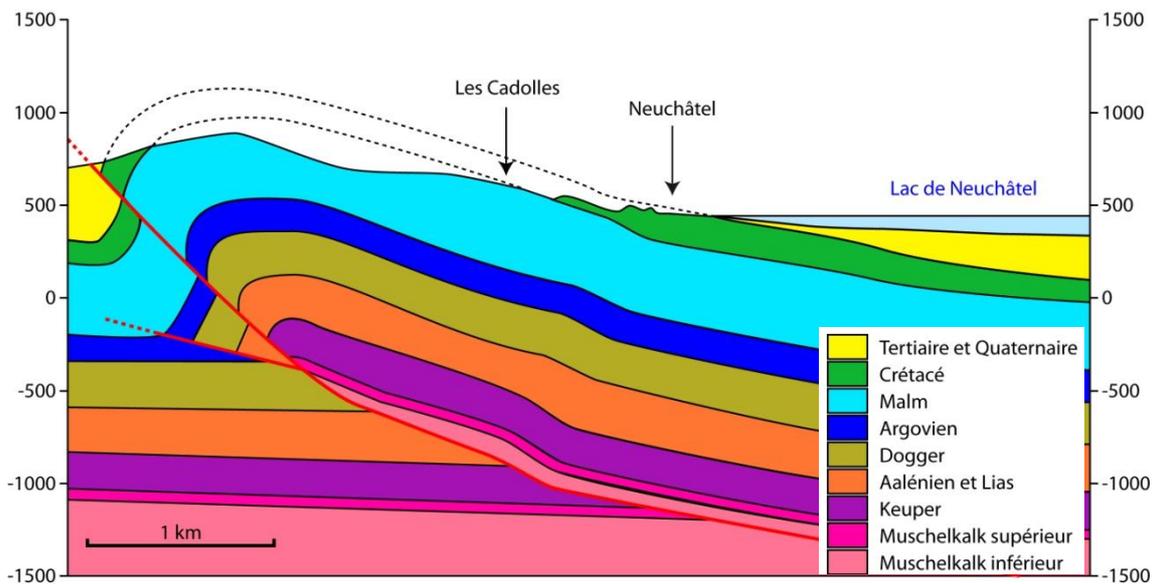


Figure 6.28. Coupe géologique NW-SE passant par le Locle, modifiée d'après la coupe no 7, PGN, 2008.

Tableau 6.26. Résumé des caractéristiques attendues pour les aquifères profonds dans la région de Neuchâtel.

	Malm	Dogger	Muschelkalk
Profondeur (m)	100 – 600	690 – 1050	1440 – 1670
Température (°C)	13 – 28	31 – 42	53 – 60
Puissance (MW _{th})	0.2 – 1.5	0.5 – 1.4	1 – 1.9

Tableau 6.27. Résultats de l'analyse multicritère pour les sites présélectionnés à Neuchâtel.

Nom	Surface (m²)	Géologie	Réseau de chauffage	Nb. Habitants
Maillefer	14'000	++	--	++
Charmettes	7'000	++	--	
Chemin de la Boine	7'500	++	+/-	
Unilac	33'000	+	++	
Les Saars	27'000	++	+	
Mail	12'000	++	++	

La région de la ville de Neuchâtel avec sa forte densité de volume construit et la présence d'un certain nombre de réseaux de chauffage à distance est favorable à un projet de géothermie profonde. La région de Monruz est particulièrement intéressante en raison de la présence d'une faille transformante qui pourrait fortement augmenter le débit de production. Dans l'état des connaissances actuelles, c'est le site dit « les Saars » qui a été présélectionné. A noter que l'étude de Matthey (1986) avait déjà retenu cette zone comme particulièrement favorable.

6.5 Synthèse et suite du programme

L'évaluation du potentiel géothermique des aquifères profonds accomplie dans le cadre du Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel - PDGN a permis de faire des progrès supplémentaires dans la reconnaissance et la quantification du potentiel de cette technologie. Par contre, aucune amélioration des connaissances lacunaires du sous-sol profond n'a pu être réalisée, puisqu'il n'était pas prévu de mener des campagnes de géophysique ou de nouvelles interprétations géologiques. D'autre part, l'ensemble de la documentation sur le sous-sol profond du canton avait déjà été collectée et compilée lors de l'étude du Potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN, 2008).

Par conséquent, la tâche essentielle a été de quantifier à l'échelle du canton le potentiel géothermique des trois aquifères principaux, à savoir le Malm, le Dogger et le Muschelkalk. Ceux-ci ont été découpés en blocs-aquifères dans lesquels la température et la profondeur ont été évaluées. Ensuite, il a été possible de calculer une puissance théorique pour un doublet dans ces blocs-aquifères. Finalement, en multipliant cette puissance par le nombre de doublets qu'il est théoriquement possible d'implanter, on a obtenu un potentiel géothermique par bloc-aquifère (Tableau 6.28)

Tableau 6.28 Synthèse des puissances géothermiques théoriquement disponibles pour les différents aquifères profonds présents sous la surface du canton de Neuchâtel.

Aquifères profonds	Malm	Dogger	Muschelkalk
Nombre de doublets théoriques	722	440	204
Puissance moyenne d'un doublet (MW _{th})	0.84 – 1.12	0.62 – 0.92	1.25 – 1.88
Puissance potentielle disponible (MW_{th})	595 - 795	260 – 390	255 - 384

L'autre objectif de ce projet était de préparer une sélection préliminaire de sites de forages pour des opérations de géothermie profonde en tenant compte de trois types de critères : la présence de conditions géologiques favorables, l'existence d'un réseau de chauffage à distance et la densité de consommateurs de chaleur. Pour une dizaine de communes réparties dans le canton, une série de parcelles de terrain non construites et d'une superficie de plus de 4'000 m² pouvant accueillir un chantier de forage ont été sélectionnées à titre d'exemple. Ensuite, la profondeur, la température et la puissance thermique par doublet géothermique ont été calculées pour les trois aquifères potentiels du Malm, du Dogger et du Muschelkalk. A partir de ces informations détaillées par commune incluant un plan de situation et une coupe géologique, une deuxième sélection des sites comprenant le plus de critères favorables a été réalisée (Tableau 6.29).

Tableau 6.29. Résumé des caractéristiques moyennes des principaux sites retenus.

Régions	Sites retenus	Malm			Dogger			Muschelkalk		
		Prof (m) ⁽¹⁾	T (°C) ⁽²⁾	P (MW _{th}) ⁽³⁾	Prof (m) ⁽¹⁾	T (°C) ⁽²⁾	P (MW _{th}) ⁽³⁾	Prof (m) ⁽¹⁾	T (°C) ⁽²⁾	P (MW _{th}) ⁽³⁾
Boudry	Buchilles	600	29	1.4	1150	45	1.3	1750	63	1.7
Colombier	Aérodrome Planeyse	550	27	1.2	1150	45	1.3	1750	63	1.7
La Chaux-de-Fonds	CISA Stand de tir	450	19	0.7	900	33	0.7	1450	51	1.1
Fleurier	Acacias	550	24	1.2	1200	44	1.4	2150	72	1.8
Le Locle	Collège des Jeanneret	400	18	0.6	875	32	0.6	1650	57	1.4
St Blaise-Marin-Epagnier	Le Loclat Cité des Sors	625	30	1.5	1075	43	1.2	1750	63	1.7
Neuchâtel	Les Saars	350	21	0.8	850	36	0.8	1550	58	1.5

(1) Prof : profondeur moyenne de l'aquifère (m)

(2) T : température moyenne de l'aquifère (°C)

(3) P : puissance thermique du forage de production (MW_{th}), calculée en considérant les valeurs suivantes :

- Température de réinjection : Malm (10 °C), Dogger (20 °C), Muschelkalk (30 °C).
- Débit de production : Malm (15-20 l·s⁻¹), Dogger (10-15 l·s⁻¹), Muschelkalk (10-15 l·s⁻¹).

Des réflexions devront également être menées pour préciser dans chaque région les domaines de température pouvant être utilisés en raison des bâtiments existants ou des quartiers à construire (chauffage direct, chauffage avec PAC, CAD hybride, etc.).

Il est également vivement recommandé que les résultats de cette étude du potentiel géothermique des aquifères profonds soient présentés aux autorités communales et cantonales, notamment dans les régions qui présentent le potentiel le plus significatif. En effet, pour le bon déroulement d'un projet de ce type, un ancrage local et un fort soutien des autorités est indispensable.

Dans le cadre des mesures de relance économique mises en place par le canton et du soutien à la création d'un centre de compétence en géothermie à l'Université de Neuchâtel, ainsi qu'au développement de la géothermie sur le territoire cantonal, un nouveau programme appelé GeoNE a débuté dès mai 2010. Une phase initiale, basée sur les résultats de PGN (2008) et de PDGN (ce rapport) a déjà permis de sélectionner trois régions dont le potentiel géothermique en aquifères profonds est plus marqué :

- Littoral Ouest (Neuchâtel - St. Blaise)
- Littoral Est (Bevaix - Vaumarcus)
- La Chaux-de-Fonds - Le Locle

Les critères de sélection sont multiples et la quantité et la qualité des informations sur les caractéristiques des aquifères potentiels et leur hétérogénéité spatiale ne permettent pas, pour le moment, de fixer un ordre de priorité entre ces trois régions : ce sont donc les investigations ultérieures, telles que les futures campagnes de géophysique qui préciseront les sites les plus prometteurs. De plus, les prochains contacts avec les services communaux et cantonaux en charge de l'élaboration des plans de développement permettront de fixer d'autres critères liés au potentiel de consommation de chaleur et d'intégration dans les communautés urbaines concernées.

A court terme, le programme GeoNE élaborera un concept d'exploration des ressources en aquifères profonds en phases successives après avoir retenu deux régions prioritaires sur les trois sélectionnées. Dès l'été 2010, des campagnes de géophysique (gravimétrie et éventuellement magnéto-tellurique) seront engagées pour mieux définir les structures géologiques et préparer un modèle géologique 3D. Finalement, un programme de nouvelles lignes sismiques complétant celles déjà réalisées pour la prospection pétrolière devra être défini et exécuté avant l'implantation des premiers forages d'exploration.

6.6 Références

- AJENA & PLANAIR, 2005. Les énergies renouvelables au service du développement durable, région Val de Ruz. Potentiel de production d'énergies renouvelables et autonomie énergétique, 3 pp.
- Andenmatten Berthoud N., 2003. Assessment and evaluation of geothermal potential in Switzerland (Atlas des Ressources Géothermiques Suisses). Rapport Annuel 2003 pour l'Office fédéral de l'Energie, Berne. Energieforschung projekt 100'022, 70 pp.
- Banks D., 2009. Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. Hydrogeology Journal, published online 16 January 2009, 7 pp.
- Bianchetti G., Mariller F. & Arn R., 2009. GP – La Côte, Projet de géothermie profonde sur la côte vaudoise. Rapport de phase A, Module A1 « Aquifères profonds », 78 pp.
- Bianchetti G., Marillier F. & Arn R., 2009. GP La Côte. Rapport de Phase A. Module A1 « Aquifères profonds ». Rapport pour l'OFEN et le SEVEN, 53 pp.
- Bianchetti G., Crestin G., Kohl T. & Graf O, 2006. Agepp, Alpine Geothermal Power Production, Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône. Etude préliminaire. 77 pp.
- Boisdet A. et al., 1990. Current state of exploitation of low entalpy geothermal energy in France. Geothermal Resources Council Transactions, vol. 14, Part 1, August 1990, p. 55-61.
- Borreguero M., 1996. Projet d'exploitation géothermique de Marin, Etude préliminaire, GEOREPONSES. 31 pp.
- BRGM & AFME, 1985. Prescriptions minimales et recommandations spécifiques aux forages géothermiques, Dogger du Bassin parisien. Service public géothermie et hydroénergie, 65 pp.
- Coudret J.-M. & Ferrandes R., 1987. Energie géothermique. Technique de l'ingénieur 8, 20 pp.
- Dewarrat P. & Bianchetti G., 2009. AGEPP. Phase B - Etude de faisabilité technico-financières. Valorisation de la chaleur & business plan. Rapport de synthèse, 49 pp.
- DGRST, 1976. La géothermie. Chauffage de logements. Rapport, 24 pp.
- Gringarten, A.C., 1978. Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for mountainous terrain: a model study. Journal of Geophysical Research, 94 (B7), p. 9439 – 9451.
- Groupe de travail boucle géothermale, 1987. Recommandations spécifiques pour la conception, l'exploitation et l'entretien d'une boucle géothermale, Dogger du Bassin parisien, rapport, 129 pp.
- 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.
- Groupement PGF, 2005. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg, Rapport final pour le Service des transports et de l'énergie, Fribourg.
- Groupement PGV, 2003. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud, Rapport final pour le Service de l'environnement et de l'énergie, Vaud.
- Király L., 1973. Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel, suppl. du Bull. de la SNSN tome 96, 1973, IGUN, CHYN.
- Király L., 1966. Remarques sur la tectonique de la région de Saint-Blaise (Neuchâtel), Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., p. 121-128.
- Lemale J. & Jaudin F., 1998. La géothermie, une énergie d'avenir, ARENE, 117 pp.
- 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.
- Lemale J. & Pivin M., 1986. La filière géothermique premier bilan, évaluation technico-économique de la géothermie basse énergie en France, AFME, 80 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, 104 pp.
- Menjoz A., 1989. Gestion et exploitation des aquifères profonds du bassin parisien, Exposé du 13.06.1989 à Reinach, 18 pp.
- Perritaz D. & Dewarrat P., 2009. GP – La Côte, Projet de géothermie profonde sur la côte vaudoise. Rapport de phase A, Module A2 « valorisation de la chaleur », 71 pp.
- Rojas J., Brach M., Criaud A., Fouillac C., Martin J.C. & Menjoz A., 1989. Characterization and modelling of low enthalpy geothermal reservoirs; example of the Paris Basin. Geothermal Europea Update, Fourth international seminar on the results of EC geothermal energy research and demonstration, Florence, Italy, April 27-30, 1989. International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research and Demonstration, vol. 4, p. 109-118.
- Syndicat mixte pour la géothermie à Meaux, 1984. Géothermie à Meaux, 10 pp.
- Signorelli S., Andenmatten Berthoud N. & Kohl T., 2004. Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz. Schlussbericht, Energieforschung projekt 100'022, 55 pp.
- Signorelli S. & Kohl T., 2006. Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik, N° 39, 107 pp.
- Signorelli S. & Kohl T., 2007. Atlas des ressources géothermiques de la suisse occidentale. Contribution à la géologie de la Suisse, Geophysique, N° 40, 57 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.
- 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.
- Ungemach P. & Antics M., 2009. Conception et réalisation d'un doublet géothermique dans le bassin parisien : le cas de La Courneuve-Nord, GPC IP, Roissy. Présentation à la Table ronde sur les projets de géothermie profonde en Suisse romande, le 11.06.09, Neuchâtel.
- Vallat P., 2009. GP – La Côte, Projet de géothermie profonde sur la côte vaudoise. Rapport de synthèse de la phase A, 10 pp.
- Vuataz F.-D., 1997. Applications des techniques de forage slimhole pour la prospection des aquifères profonds. *Eclogae geol. Helv.*, 90, p. 497-512.

7. Séminaires d'information aux professionnels

7.1 Objectifs

En dépit du très bon potentiel d'exploitation de la chaleur du sous-sol dans le canton de Neuchâtel, le nombre d'installations en fonction reste modeste, voire anecdotique dans le haut du canton. La formation de professionnels et la diffusion de l'information de manière ciblée est un des moyens qui permettra de développer à terme les installations géothermiques de faible profondeur et de faire connaître de manière générale le potentiel thermique du sous-sol.

Six demi-journées d'information répétées de novembre 2009 à janvier 2010 ont été organisées sur les thèmes de la géothermie de faible profondeur et l'exploitation thermique, avec pour objectif d'encourager, favoriser et faciliter l'utilisation de l'énergie géothermique de basse enthalpie dans le canton de Neuchâtel. Afin de toucher au plus près les divers acteurs et intervenants du milieu de la construction, de l'énergie et du chauffage, le programme des séminaires a été présenté à plusieurs catégories de professionnels avec, à chaque fois, une adaptation du contenu au public cible et en des lieux différents.

7.2 Actions entreprises

7.2.1 Programme général

Le programme général des séminaires est présenté en Annexe 7.1. La série de séminaires s'est déroulée à six reprises, conformément au programme prévu. De manière à délivrer l'information de manière ciblée, le programme a été conçu et organisé en fonction des catégories professionnelles suivantes :

- Architectes et ingénieurs du bâtiment	11 novembre 2009, Neuchâtel, Unimail	A1
	2 décembre 2009, Fleurier, dépôt TRN	A2
- Bureaux techniques, entreprises de forage et installateurs	18 novembre 2009, Pesieux, Collège des Coteaux	B1
	21 janvier 2010, La Chaux-de-Fonds, Neode	B2
- Géologues et spécialistes du sous-sol	10 décembre 2009, Fleurier, dépôt TRN	G1
- Service communaux, cantonaux et médias	28 janvier 2010, Hauterive, Laténium	C1*

7.2.2 Programme détaillé

Pour chacun des séminaires, un programme détaillé a été élaboré (Annexe 7.2). Le programme du dernier séminaire C1, destiné aux services communaux, cantonaux et médias a été revu (C1*) en raison du faible nombre d'inscrits (c.f. 7.2.5).

Les professionnels ont été informés sur les possibilités qui s'offrent à eux dans le domaine de la géothermie de faible profondeur, avec un accent particulier sur les points suivants :

- Aperçu de l'ensemble des techniques de la géothermie peu profonde (fonctionnement et types de PAC, sondes géothermiques verticales, géostructures énergétiques, champs de sondes

géothermiques et installations de grande dimension, exploitation des nappes phréatiques, exploitation des eaux de surface).

- Principes de dimensionnement et exemples d'installation, pour chacune des techniques présentée. Diffusion de bonnes règles.
- Possibilités d'exploitation dans le canton et procédures d'autorisation, pour chacune des techniques présentées.
- Développements récents en matière de l'exploitation de la chaleur du sous-sol à l'échelle du canton : règles de dimensionnement particulières, cartes et documents nouvellement disponibles sur le portail du canton.
- Documentation cantonale et fédérale, informations diverses et documents de référence (norme SIA 384/6, D025, guides d'aide au dimensionnement).
- Clôture de chaque demi-journée par une visite d'installations techniques, incluant un document résumant les caractéristiques techniques, à savoir :
 - *Ecole de la Maladière, Neuchâtel (A1)*, champ de sondes géothermiques, PAC gaz, puits canadien et solaire thermique (BMIC SA).
 - *Dépôt TRN, Fleurier (A2, G1)*, PAC gaz alimentée par la nappe phréatique (BMIC SA).
 - *Collège des Coteaux, Pesoux (B1)*, champ de sondes géothermiques, PAC gaz et stockage saisonnier par solaire thermique (BMIC SA).
 - *Musée Laténium, Hauterive (C1)*, rafraîchissement par freecooling, captage d'eau souterraine (BMIC SA).
 - *Patek Philippe, La Chaux-de-Fonds, (B2)* champs de sondes géothermiques. Initialement prévue, la visite avec présentation de l'installation n'a pas pu être réalisée, car le maître d'ouvrage n'a pas souhaité donner l'accès aux installations techniques avant l'inauguration officielle et l'ingénieur responsable n'a pas souhaité présenter le projet.

7.2.3 Intervenants

Conformément au programme prévu, les intervenants ont été les suivants :

- | | |
|--|---|
| - Bernard Matthey,
<i>Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils S.A</i> | Introduction, sondes géothermiques verticales, champs de sondes géothermiques, visites techniques

A1, A2, B1, B2, G1, C1 |
| - Marc Affolter,
<i>Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils S.A</i> | Exploitation des nappes phréatiques, exploitation des eaux de surface, documentation cantonale

A1, A2, B1, B2, G1, C1 |
| - Jules Wilhelm,
<i>Ingénieur-Conseil</i> | Champs de sondes géothermiques, géostructures énergétiques

A1, A2, C1 |
| - Jérémy Dupuy,
<i>Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils S.A</i> | Caractéristiques des pompes à chaleur

B1, B2 |

Les interventions prévues de Mme Isabelle Butty et MM. Jean-Luc Juvet et François-David Vuataz lors du séminaire C1 ont été annulées ou revues à la baisse (J.-L. Juvet) en raison du faible nombre d'inscrits (c.f. 7.2.5).

7.2.4 Promotion de la manifestation

La promotion de l'événement a été assurée par invitation personnelle (courriel et courrier) et par publication (feuille officielle, sites web). Dans le détail, la promotion a été réalisée comme suit :

Action	Destinataires	Nombre approximatif de personnes contactées
Promotion par courriel (Fusion de listes d'adresses SCEN, CREGE, BMIC SA, Geosciences, annuaires divers)	<ul style="list-style-type: none"> - Administrations communales pour diffusion à l'interne - Installateurs, géologues, architectes, ingénieurs en thermique du bâtiment, ingénieurs-civils, personnel de l'Etat - Chefs de services cantonaux pour diffusion à l'interne 	500 entreprises et organisations
Promotion par courrier	<ul style="list-style-type: none"> - Installateurs CVS et autres intéressés non joignables par courriel 	100 envois
Publication	<ul style="list-style-type: none"> - Feuille officielle (3x) - www.crege.ch > news - www.ne.ch/ > énergie > rubrique information, formation et conseils 	
Relai par les associations professionnelles	<ul style="list-style-type: none"> - GSP, ASTECH, SUISSETECH (chauffagistes, entreprises de forage) - SSH, SSG (géologues, géothermiciens) - FAS, GAN, SIA (architectes) - SIA, ANIC (ingénieurs-civils) - FNE (entrepreneurs) 	

Le travail de promotion de la manifestation a été essentiellement mené par BMIC SA et un effort considérable a été fait pour contacter un maximum de personnes concernées par la problématique. Au total, il est possible d'affirmer que l'ensemble du public cible neuchâtelois a reçu directement ou indirectement l'information et a eu connaissance de l'événement.

7.2.5 Participants aux séminaires

Le nombre de participants par événement était en moyenne de 13 (Figure 7.1), soit largement en-dessous de la capacité des salles prévues pour chaque séminaire (50 à 200). Le total des participants s'est monté à 81. Le séminaire le plus fréquenté était celui donné à La Chaux-de-Fonds pour les techniciens et ingénieurs en chauffage (B2) en janvier 2010. Pour le Séminaire C1, au Laténium,

L'attente de participation de représentants des communes et du Canton était beaucoup plus importante. Seuls 14 participants ont été reçus.

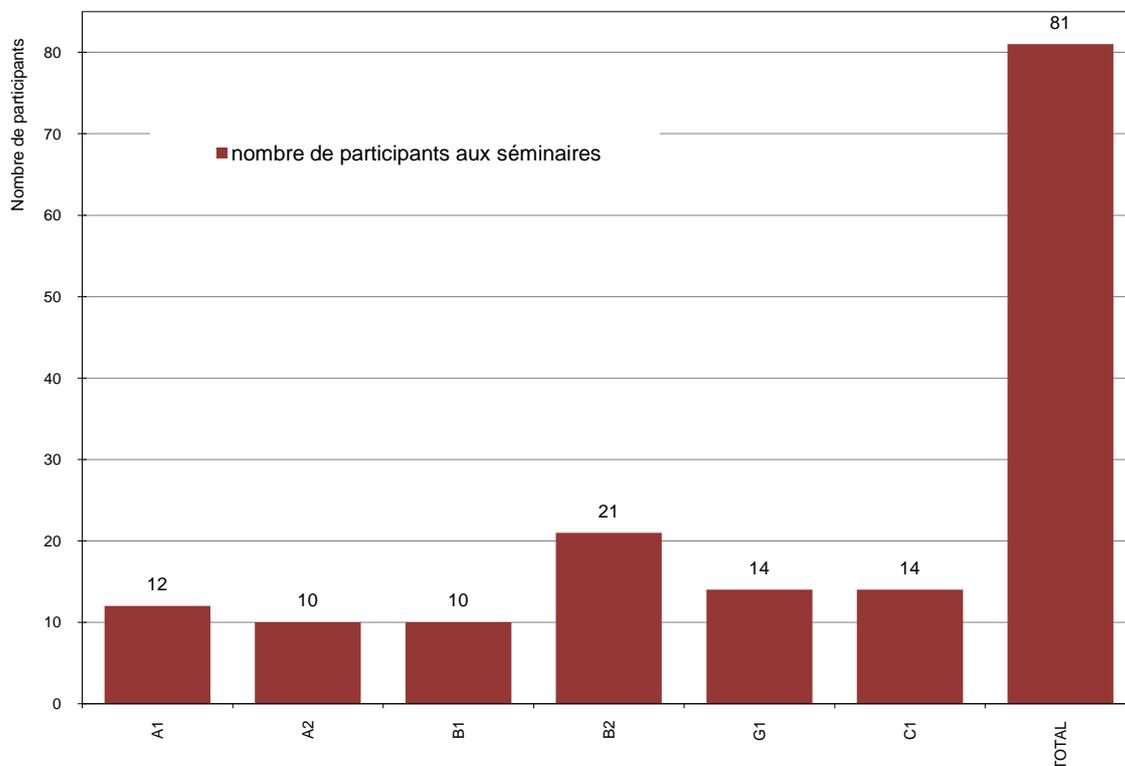


Figure 7.1. Participation aux séminaires d'information aux professionnels.

Le nombre de participants pour les différentes catégories professionnelles est montré sur la Figure 7.2.

En résumé, on peut dire que :

- La participation a été en-deçà de ce qui était prévu.
- Le personnel cantonal, les techniciens en chauffage-ventilation-sanitaire et les géologues ont été les mieux représentés.
- Pour les géologues, la plupart des bureaux privés de la place étaient représentés, ce qui est une satisfaction. Très peu de représentants de l'université se sont montrés intéressés.
- En ce qui concerne les techniciens CVS, le nombre de participants (15) est très éloigné du nombre de professionnels actifs.
- Pour le personnel cantonal et les représentants du canton, de nombreuses personnes clé dans l'environnement et l'aménagement du territoire n'étaient pas présents.
- La faible participation des architectes, ingénieurs-civils et entreprises du bâtiment est décevante. Aucune entreprise de forage de Suisse romande n'était présente.

- Seuls quatre représentants des communes et syndicats communaux ont participé, ce qui est nettement insuffisant au regard de l'importance du rôle des collectivités dans le développement d'installations géothermiques de moyenne à grande puissance.

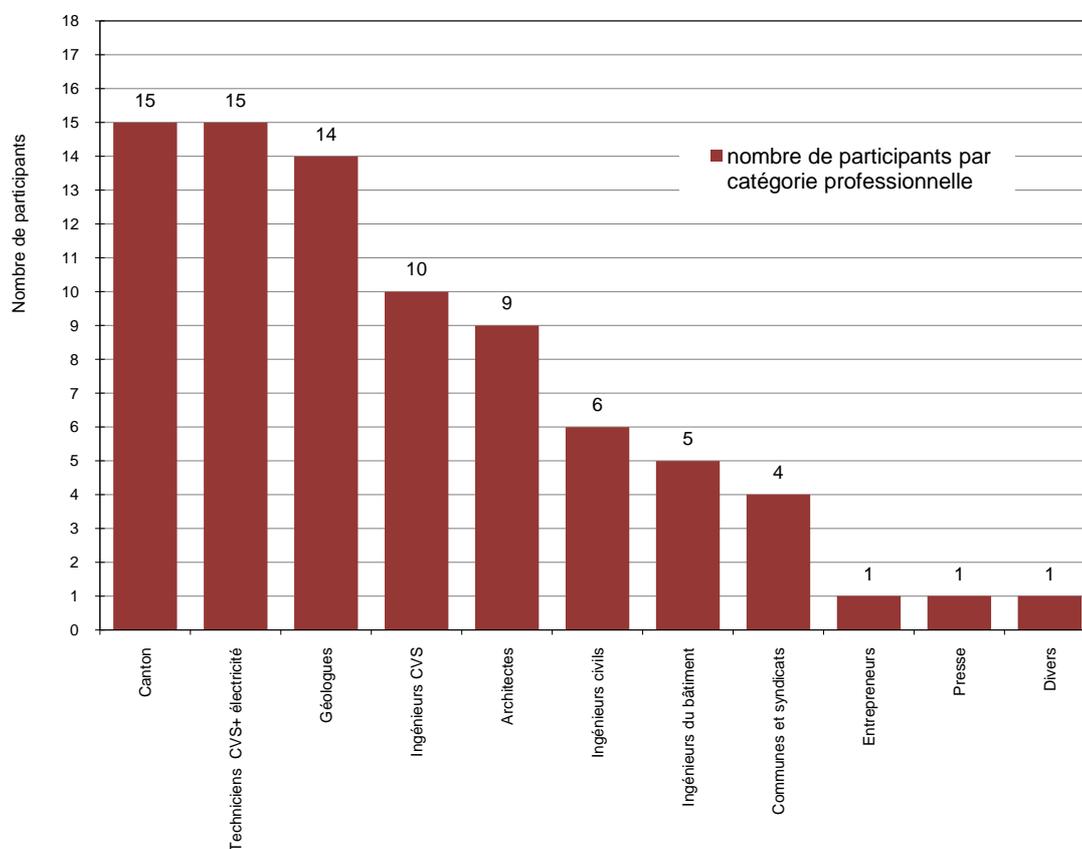


Figure 7.2. Participation aux séminaires d'information aux professionnels : nombre de participants par catégorie professionnelle.

7.2.6 Documentation remise aux participants, programme Web

Les participants aux séminaires se sont vu remettre la documentation suivante :

- Dossier relié avec guides d'aide au dimensionnement des SGV et NAP. Ces documents sont fournis en annexe du présent rapport.
- Liste des participants et documentation sur la visite du bâtiment.
- Diverses brochures sur la géothermie de faible profondeur mises à disposition par l'OFEV et la SSG.
- Possibilités de téléchargement de la version électronique des présentations sur le site web du CREGE.

7.3. Conclusions, recommandations

La réalisation des séminaires pour professionnels a permis de mesurer un certain intérêt pour la géothermie de faible profondeur. Cet intérêt s'est manifesté par la très grande curiosité des participants et du nombre important de questions aux intervenants. Les commentaires reçus de la part des participants laissent penser que la qualité des présentations a été appréciée, que le contenu était adapté à leurs attentes, même si le temps à disposition pour passer en revue l'ensemble de la matière était un peu serré.

En revanche, en dépit de grands efforts de promotion, de la multiplication des sessions et de la couverture géographique aussi large que possible, le nombre de participants a été inférieur aux attentes, pour un total de 81 personnes.

A l'avenir, il y a fort à parier que l'intérêt et les questions relatives à la géothermie de faible profondeur vont s'intensifier. En guise de conclusion, il est possible d'émettre les recommandations suivantes :

- Renouveler ce type de manifestation dans un délai de 2 à 3 ans. La formule actuelle développée s'est révélée efficace et pourra être répétée et actualisée sans grande difficulté.
- En parallèle, faire passer le message en faisant appel à des structures et associations déjà existantes, comme la SIA, les « lunch-débats », etc.
- Insister auprès des communes, qui n'ont été que peu sensibilisées par le présent programme. Il est possible, par exemple, de présenter le potentiel communal de chaque commune ou groupe de communes, du moins pour les communes où il existe un potentiel élevé mis en évidence dans le cadre du programme PDGN (Val-de-Travers, Neuchâtel, Littoral, etc.).
- Enfin, il faudrait mettre à disposition du public sur le site du canton une liste d'installations de référence de bâtiments communaux et cantonaux qui pourront être visités (administration, médias, associations professionnelles, SIA, etc.). Ces bâtiments pourraient être ceux présentés lors des visites techniques des séminaires PDGN. L'action pourrait, par exemple, être entreprise en coordination avec l'action « display » de la ville de Neuchâtel et le guide des excursions géothermiques de la Société Suisse de Géothermie (SSG).

8. Synthèse et recommandations

Pendant la période de décembre 2008 à mars 2010, l'équipe de projet PDGN (Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel) a mené des investigations en vue de quantifier le potentiel géothermique du canton de Neuchâtel pour les domaines suivants :

- Potentiel d'exploitation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales (SGV)
- Potentiel des géostructures énergétiques (GEN)
- Potentiel thermique des nappes phréatiques (NAP)
- Potentiel des sources et des eaux de surface (SES)
- Potentiel des aquifères profonds (APR)
- Séminaires d'information aux professionnels.

Elles ont permis de montrer que chacune de ces cinq technologies géothermiques offre un potentiel d'énergie important dont la valorisation peut commencer immédiatement. Certains domaines nécessitent une amélioration des connaissances du sous-sol, alors que d'autres demandent des actions d'incitation, ainsi que des opérations répétées d'information et de formation.

Le présent chapitre synthétise les principaux résultats et recommandations figurant à la fin de chacun des chapitres consacrés à ces technologies.

8.1 Potentiel d'exploitation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales (SGV)

L'application de méthodes diverses et variées a permis de démontrer que l'énergie exploitable par sondes géothermiques verticales est fortement dépendante du mode d'exploitation et de la gestion du stock de chaleur disponible. L'énergie exploitable sur l'ensemble des zones habitables est de 54 à 616 GWh·an⁻¹ sans recharge thermique saisonnière. Cependant, c'est la valeur de 308 GWh·an⁻¹ qu'il faut retenir comme référence, car elle correspond le mieux au mode d'exploitation qui devrait être pratiqué en cas de densification d'installations de sondes individuelles, sans recharge saisonnière. Ce mode d'exploitation est le plus répandu actuellement et devrait permettre de produire, au moyen de PAC standard, près de 410 GWh·an⁻¹, et de couvrir à terme près de 20 % des besoins en chaleur.

Par des moyens simples, tels que la recharge thermique (freecooling, solaire thermique, etc.), il est possible de s'affranchir de toute interaction, d'éviter le refroidissement du terrain à long terme et de multiplier jusqu'à un facteur 10 l'énergie thermique exploitable par unité de surface. Il est d'autre part possible de valoriser le froid du terrain pour rafraîchir les bâtiments.

Localement, le potentiel exploitable restera limité par l'aménagement du territoire, et notamment par la carte des autorisations de forage. En considérant que l'exploitation par stockage saisonnier puisse répondre au 100 % des besoins dans les secteurs autorisés, on pourra produire 909 GWh·an⁻¹ d'énergie de chauffage soit 43 % des besoins cantonaux.

Recommandations

- L'exploitation de la chaleur du sous-sol par sondes géothermiques verticales a un fort potentiel de développement et leur implantation dans le canton de Neuchâtel doit être encouragée.
- Afin d'augmenter le potentiel des sondes géothermiques verticales, des incitations à la recharge thermique du terrain sont nécessaires. Des mesures sur des grandes installations existantes ou un site test à créer pourraient être envisagés.
- Pour un dimensionnement correct des installations, un guide simple d'aide au

dimensionnement réalisé lors de cette étude est à disposition.

- La nouvelle norme SIA 384/6 établie pour la planification, l'exécution et l'exploitation des sondes géothermiques verticales est maintenant disponible en français et doit être utilisée, tant par les installateurs que par les services cantonaux concernés et les bureaux d'ingénieurs.
- Finalement, un ensemble de cartes numériques ont été produites et pourront être valorisées par les services cantonaux.

8.2 Potentiel des géostructures énergétiques (GEN)

Etant donné que l'étude PGN (2008) avait déjà quantifié le potentiel des géostructures énergétiques au niveau cantonal, le présent programme PDGN a porté principalement sur l'évaluation de deux grands projets, l'ensemble immobilier Le Corbusier à La Chaux-de-Fonds et la liaison ferroviaire TransRUN entre Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds.

Le potentiel géothermique des pieux énergétiques du projet Le Corbusier à La Chaux-de-Fonds concerne une surface de près de 49'000 m² s'étendant au sud de l'avenue Léopold-Robert, sur une longueur de 700 m et une largeur d'environ 70 m, entre la place de la gare et Coop-Entilles. Des constructions implantées dans les 15 à 20 prochaines années abriteront logements et bâtiments divers dont la demande annuelle d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude représente environ 2'200 MWh de l'ensemble des 18 bâtiments. Les pieux énergétiques pourraient produire 750 MWh·an⁻¹, ce qui correspond à une couverture de 34 % en moyenne.

La future liaison ferroviaire TransRUN entre Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds pourrait présenter un intérêt pour la valorisation du potentiel géothermique, soit par l'utilisation des eaux souterraines, soit par des échangeurs de chaleur incorporés dans les géostructures. Les ressources disponibles et le mode d'utilisation dépendent de la nature des ouvrages retenus au terme de l'étude préliminaire en cours. Suivant la variante de tracé retenu, les géostructures de la gare de Cernier pourraient être équipées d'échangeurs thermiques pour approvisionner en chaleur et en froid des locaux internes ou des utilisateurs tiers situés dans le voisinage.

Recommandations

- Dans le cadre du projet Le Corbusier, des tests de réponse thermique du terrain devront être exécutés dans les premiers forages géotechniques réalisés, afin de pouvoir réellement quantifier le potentiel énergétique des pieux.
- Dans le cadre du projet TransRUN, il est recommandé d'inclure dans le programme d'investigations des mesures de température et des observations hydrologiques à effectuer dans les forages. Cela permettra de déterminer le potentiel réel (régime et caractéristiques des eaux souterraines) et d'en tenir compte, le cas échéant, dans le concept des ouvrages.

8.3 Potentiel thermique des nappes phréatiques (NAP)

Au total, 27 communes sont concernées par une future exploitation thermique des nappes phréatiques. Les valeurs données dans le tableau récapitulatif (Tableau 4.40) doivent permettre à chaque commune de prendre conscience du potentiel exploitable sur le territoire communal. Comme les potentiels sont calculés pour la production de chaleur uniquement, et donc ne prennent pas en compte une recharge thermique saisonnière, les valeurs fournies doivent être considérées comme un minimum absolu.

Les communes les mieux dotées en matière de ressources exploitables sont les communes de Val-de-Travers, Neuchâtel, Cortaillod, Boudry, Colombier et Gorgier. Dans toutes ces communes, la ressource peut être entièrement valorisée, puisque la demande potentielle dépasse la capacité de la nappe. Pour les autres communes, le potentiel de la ressource est modeste, de quelques dizaines de

MWh_{th}·an⁻¹ à près de 1 GWh_{th}·an⁻¹ et permet de répondre à la demande quelques pour mille jusqu'à 7.5 % (Vaumarcus) des besoins en énergie de chauffage des communes concernées.

A l'échelle du canton de Neuchâtel, la surface des nappes exploitables est de 14.03 km², soit un peu moins de 2 % de sa surface totale. La production potentielle de chaleur (par pompe à chaleur avec un COP de 5 et 2'000 h·an⁻¹) sans recharge thermique de la nappe en été est estimée à 33 GWh_{th}·an⁻¹. L'exploitation thermique des nappes du canton devrait permettre également de produire du froid par des systèmes freecooling pour un total de 26 GWh_{frig}·an⁻¹.

Recommandations

- Donner la possibilité à l'autorité concédante d'exiger contractuellement la recharge thermique de la nappe, afin d'augmenter l'énergie exploitable et de limiter les phénomènes de modification de la température des nappes à long terme.
- Contrôler l'exploitation de la ressource et en particulier les rejets thermiques de manière à garantir l'exploitation de la ressource de façon optimale et de ne pas limiter le développement d'installations futures.
- A l'échelle cantonale, cela peut se concrétiser par un octroi de concessions soumis à conditions (regroupement des utilisateurs ou des rejets), par la qualité de l'information délivrée aux utilisateurs et par l'encouragement donné au développement de l'exploitation centralisée des nappes.
- A l'échelle communale et privée, il faudrait chercher à exploiter ou à encourager le développement de réseau de distribution d'eau de nappe dans les secteurs les plus favorables.
- Il est important d'insister sur les conditions particulièrement favorables et sur les grandes possibilités de développement de ce type d'exploitation dans les communes de Val-de-Travers (Fleurier, Boveresse, Môtiers), Cortaillod, Boudry, Colombier, Neuchâtel et Hauterive.
- En raison de la complexité du milieu souterrain, la connaissance du sous-sol et des nappes souterraines reste parfois lacunaire. A ce titre, il faut rappeler l'importance du rôle de coordination de l'Etat et de la mise à disposition d'outils performants pour mieux gérer la ressource (bases de données, modèles numériques).

8.4 Potentiel des sources et des eaux de surface (SES)

Dans ce chapitre, la démonstration de la qualité en tant que ressource thermique de nombreux cours d'eau neuchâtelois (la Haute-Areuse, la Noiraigue, la Serrière, etc.), des effluents de STEP et du lac de Neuchâtel a été effectuée. Les premières propositions d'utilisation thermiques des eaux de surface du canton datent des années 1980 déjà, mais leur exploitation est pratiquement inexistante à l'heure actuelle. L'exploitation des cours d'eau doit respecter des critères très stricts en matière de protection de l'environnement, mais le respect de ces exigences, la réalisation d'études préalables et la définition de valeurs limite d'exploitation devraient permettre d'utiliser ces ressources de manière raisonnée.

Recommandations

- Contribuer à l'amélioration de la connaissance des cours d'eau du canton et poursuivre la mise en place de stations cantonales de mesure de débit et de température.
- Mettre en évidence les impacts actuels pour une meilleure définition de l'état naturel des cours d'eau. Actuellement, l'impact de l'urbanisation et des rejets d'eaux usées sur la température des cours d'eau émissaires n'est pas ou peu considéré.
- Le point pourrait être précisé par un état des lieux des cours d'eau neuchâtelois sous l'égide du Service de l'énergie et de la protection de l'environnement et du Bureau de l'économie des

eaux, en collaboration avec les milieux universitaires.

- Considérer la présente étude comme une base servant à définir l'implantation de nouveaux réseaux de mesure de débit/température.

Finalement, de très bonnes possibilités de développement existent dans les secteurs suivants :

- Exploitation de la Haute-Areuse à St-Sulpice pour la production de chaleur.
- Exploitation de la Noiraigue pour la production de chaleur.
- Exploitation de la Serrière pour la production de chaleur et de froid.
- Favoriser l'implantation de conduites de captage d'eau du lac pour des puissances moyennes à élevées. Réalisation d'un réseau d'alimentation en froid au centre ville de Neuchâtel.
- Alimentation en chaleur et en froid des secteurs urbanisés du bord du lac de Neuchâtel.
- Valorisation des rejets de STEP, en particulier : Colombier, Neuchâtel, Marin et Le Landeron.
- Exploitation de la Thielle par des installations de grande puissance avec appoint.

8.5 Potentiel des aquifères profonds (APR)

Un des résultats essentiels a été de quantifier à l'échelle du canton le potentiel géothermique des trois aquifères principaux, à savoir le Malm, le Dogger et le Muschelkalk. Ceux-ci ont été découpés en blocs-aquifères dans lesquels la température et la profondeur ont été évaluées. Ensuite, il a été possible de calculer une puissance théorique pour un doublet géothermique dans ces blocs-aquifères. Finalement, en multipliant cette puissance par le nombre de doublets qu'il est théoriquement possible d'implanter, on a obtenu un potentiel géothermique par bloc-aquifère (Tableau 8.1).

Tableau 8.1. Puissance théorique d'un doublet géothermique et puissance potentielle des APR dans le canton de Neuchâtel.

Aquifères profonds du canton de Neuchâtel	Malm	Dogger	Muschelkalk
Nombre de doublets théoriques	722	440	204
Puissance moyenne d'un doublet (MW _{th})	0.84 – 1.12	0.62 – 0.92	1.25 – 1.88
Puissance potentielle disponible (MW_{th})	595 - 795	260 – 390	255 - 384

La deuxième investigation consistait en une sélection préliminaire de sites de forages pour des opérations de géothermie profonde. Pour une dizaine de communes réparties dans le canton, une série de parcelles de terrain non construites et d'une superficie supérieures ou égales à 4'000 m² ont été sélectionnées à titre d'exemple. Pour chaque commune, la profondeur, la température et la puissance thermique par doublet géothermique ont été calculées pour les trois aquifères potentiels du Malm, du Dogger et du Muschelkalk.

Recommandations

- A partir de la sélection de communes et de sites dont le potentiel géothermique possède le plus de critères favorables, un programme de prospection organisé en phases successives sera conçu et engagé dès que possible (programme GeoNE).
- Une phase initiale du programme GeoNE a déjà permis de sélectionner trois régions favorables à partir desquelles des campagnes de géophysique (gravimétrie et magnéto-tellurique) devront être menées dès 2010, dans le but de préparer un modèle géologique 3D.
- Des études technico-économiques liées aux régions prospectées doivent être rapidement

engagées, pour mettre en adéquation la ressource géothermique et les besoins de consommation de la chaleur.

- Avant de procéder au premier forage d'exploration profond, de nouvelles lignes sismiques devront être réalisées pour compléter celles déjà anciennes de la prospection pétrolière.

8.6 Séminaires d'information aux professionnels

Une série de six séminaires d'information destinés aux professionnels a permis de toucher quelques 80 personnes de divers milieux qui ont montré un certain intérêt pour la géothermie de basse température et faible profondeur. Du matériel d'information a été produit et distribué à cette occasion. En revanche, en dépit des efforts de promotion, de la multiplication des sessions et de la couverture géographique aussi large que possible, le nombre de participants a été nettement inférieur aux attentes et certains milieux professionnels n'ont été que peu représentés.

Recommandations

- Renouveler ce type de séminaire à moyen terme en faisant appel à des structures et des associations pour toucher un public plus large.
- Promouvoir ces séminaires auprès des communes qui n'ont été que peu sensibilisées. Il est possible, par exemple, de présenter le potentiel de chaque commune ou groupe de communes, du moins pour celles où il existe un potentiel élevé.
- Mettre à disposition du public sur le site du canton une liste d'installations de référence de bâtiments communaux et cantonaux qui pourraient être visités.

8.7 Synthèse générale

Au cours de ces différents chapitres, il apparaît que chacune des technologies investiguées, à savoir les sondes géothermiques verticales (SGV), les géostructures énergétiques (GEN), les nappes phréatiques (NAP), les sources et les eaux de surface (SES), ainsi que les aquifères profonds (APR), disposent d'un potentiel énergétique significatif voire important à l'échelle des besoins annuels en chaleur et en froid du canton.

Les résultats de l'étude PDGN montrent clairement que le potentiel de production de chaleur géothermique calculé pour les différentes techniques d'application investiguées peut théoriquement couvrir tout ou en grande partie les besoins en chaleur du canton de Neuchâtel (Tableau 8.2).

Tableau 8.2 Potentiel thermique et production de chaleur disponible dans le canton de Neuchâtel pour les différentes techniques d'application de la géothermie

Technique d'application	Production de chaleur théorique pour l'ensemble du canton (GWh·an ⁻¹) ⁽¹⁾	Production de chaleur en fonction des zones favorables (GWh·an ⁻¹) ⁽¹⁾
Sondes géothermiques verticales - SGV	4'050 sans PAC	410 avec PAC
Géostructures énergétiques – GEN ⁽²⁾	-	180 avec PAC
Projet de développement Le Corbusier	-	0.75 avec PAC
Nappes phréatiques - NAP	-	33 avec PAC
Sources et eaux de surface – SES		
Cours d'eau et STEP	-	78 avec PAC
Lac de Neuchâtel	1'357 avec PAC	-
Aquifères profonds - APR	sans PAC	par doublet, sans PAC
Aquifère du Malm	2'800	2.0
Aquifère du Dogger	1'300	1.5
Aquifère du Muschelkalk	1'280	3.1
Besoins cantonaux annuels	2'123	

(1) Durée de fonctionnement : 2'000 h· an⁻¹

(2) Estimation réalisée par l'étude PGN (2008)

Les connaissances et le savoir-faire de ces types d'utilisation de la géothermie existent en Suisse, mais un certain nombre de barrières empêchent ou retardent la mise en œuvre de ce potentiel, notamment dans le canton de Neuchâtel. Une partie importante de ces limitations provient d'une méconnaissance des techniques de la géothermie par les différents acteurs de l'énergie, surtout dans le cadre des projets de grandes installations, pour lesquelles des décisions concernant le dimensionnement énergétique doivent être prises dès les phases préliminaires de ces projets.

Recommandations

Pour mettre en œuvre les recommandations ci-dessus et développer le potentiel des technologies de la géothermie dans le canton de Neuchâtel, un programme d'actions suivies devrait être mis en place, avec un calendrier fixant des objectifs clairs à court, moyen et long terme. Il apparaît que l'information et la formation doivent figurer au premier plan de ce programme, de même que des incitations fortes et coordonnées provenant des différents services cantonaux.

Pour la géothermie de basse température et de faible profondeur (SGV, GEN, NAP, SES), les techniques sont validées, les coûts pratiqués correspondent à ceux du marché et des documents d'information sont disponibles. Cependant, certaines réglementations et directives cantonales, ainsi que de nouvelles bases de données doivent être préparées rapidement, afin de clarifier et de renforcer l'application optimale de ces types de géothermie.

En ce qui concerne le développement de la géothermie profonde (APR), les connaissances du sous-sol profond sont encore trop lacunaires pour démarrer un projet de doublet géothermique tout de suite. Par contre, depuis mai 2010 a débuté le programme GeoNE, financé principalement par le canton de Neuchâtel, mais également par le Département fédéral de l'économie. Ce programme est sous la responsabilité du Geothermal Investment Center (GIC) qui a mandaté pour sa réalisation le Laboratoire Suisse de Géothermie de l'Université de Neuchâtel (CREGE).

Les buts du programme pluriannuel GeoNE permettront d'une part d'effectuer les premières

phases de prospection des aquifères profonds et d'autre part, d'assurer un transfert de technologie en formant des bureaux d'ingénieurs et de géologues aux techniques et outils de la géothermie profonde, afin qu'ils les reprennent à leur compte et deviennent les maîtres d'œuvre des projets. De plus, une formation continue en géothermie profonde sera mise en place dès 2011, sous la forme d'un certificat d'études avancées (CAS).

Finalement, il est également proposé que des séances d'information ciblées soient organisées pour présenter les principaux résultats de l'étude PDGN aux services cantonaux et communaux concernés, aux bureaux d'études (géologie, énergie), ainsi qu'aux bureaux d'architectes.