



CENTRE DE RECHERCHE EN GEOTHERMIE

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel - PGN

Volume 2 :

Annexes

Elaboré par

Groupe de travail PGN

c/o CREGE – Centre de recherche en géothermie

Novembre 2008

V 3.1

Impressum

Date : novembre 2008

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

No Rapport : CREGE 11-08/02

Réalisation : Groupe de travail PGN

Financement : Fondation Pro Techno, Neuchâtel

Adresse et coordonnées :

CREGE – Centre de recherche en géothermie

c/o CHYN

11 rue E.-Argand, CP 158

CH-2009 Neuchâtel

Tél. +41 (0)32 718 2602 - 2692

contact@crege.ch

www.crege.ch

Citation :

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

TABLES DES ANNEXES

Annexes Chapitre 2 :

Condition d'implantation des sondes géothermiques verticales _____ 5

Annexe 2.1 : Carte des profondeurs autorisée de forages pour le canton de Neuchâtel _____ 6

Annexe 2.2 : Dimensionnement d'une sonde géothermique verticale en milieu karstique ____ 28

Annexes Chapitre 3 :

Géostructures énergétiques _____ 41

Annexe 3.1 : Description géologique des secteurs retenus _____ 42

Annexe 3.2 : Surfaces recensées (en blanc et gras: surfaces potentielles) _____ 46

Annexe 3.3 : Localisation des secteurs potentiels _____ 55

Annexe 3.4 : Plans de situation des surfaces potentielles pour les géostructures énergétiques 58

Annexes chapitre 4 :

Exploitation thermique des nappes phréatique _____ 67

Annexe 4.1 : Carte des possibilités d'exploitation thermique des nappes phréatiques de
faible profondeur dans le canton de Neuchâtel _____ 68

Annexe 4.2 : Résumé des caractéristiques des principaux aquifères (nappe phréatique
de faible profondeur) du canton de Neuchâtel _____ 70

Annexes Chapitre 5 :

Ressources en aquifères profonds _____ 72

Annexe 5.1 : Carte tectonique du canton de Neuchâtel _____ 73

Annexe 5.2 : Modèle numérique de terrain du canton de Neuchâtel _____ 75

Annexe 5.3 : Carte tectonique du canton de Neuchâtel avec mention du tracé des
coupes de l'annexe 5.4. _____ 77

Annexe 5.4 : Coupes géologiques _____ 79

Annexe 5.5 : Coupe géologique et isothermes dans le massif du Hauenstein d'après les
mesures effectuées dans le tunnel ferroviaire (Buxtorf, + 1917) _____ 81

Annexe 5.6 : Coupe géologique N°7 : La Chaux-de-Fonds – Cernier – Neuchâtel,
localisation des aquifères profonds et conditions thermiques _____ 83

Annexe 5.7 : Carte des aquifères profonds du canton de Neuchâtel _____ 85

Annexe 5.8 : Carte des aquifères profonds et des consommateurs potentiels de
chaleur du canton de Neuchâtel _____ 87

ANNEXES CHAPITRE 2 :
CONDITION D'IMPLANTATION DES SONDES
GEOOTHERMIQUES VERTICALES

Annexe 2.1

**Carte des profondeurs autorisée de forages pour le
canton de Neuchâtel**

**Carte fixant les limites d'utilisation de la
chaleur du sol par sondes géothermiques
verticales sur le territoire du Canton de
Neuchâtel**

**NOTICE
EXPLICATIVE**

4 septembre 2008

Carte et notice établies par :

Bernard Matthey
Ingénieurs-Conseils SA
La Gande-Fin 19
2037 Montezillon

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

1. INTRODUCTION.....	3
1.1 PRINCIPES.....	3
1.2 BASES LEGALES.....	3
2. SIGNIFICATION ET OBJECTIFS DE LA CARTE.....	3
3. LEGENDE DE LA CARTE.....	4
4. ETAPES DE REALISATION DE LA CARTE.....	6
5. CRITERES GEOLOGIQUES.....	6
5.1 RISQUE DE PORTER ATTEINTE AUX NAPPES D'EAU SOUTERRAINE ET DE MODIFIER LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS. RISQUE D'ARTESIANISME.....	6
5.2 CARACTERISTIQUES DES TERRAINS TRAVERSES POUVANT SE REVELER TECHNIQUEMENT PROBLEMATIQUES POUR LA REALISATION DE FORAGES.....	9
6. CRITERES LEGAUX ET LIES A L'ENVIRONNEMENT CONSTRUIT.....	10
6.1 ZONES DE PROTECTION DES CAPTAGES D'EAU SOUTERRAINE.....	10
6.2 PRESENCE D'OUVRAGES SOUTERRAINS (GALERIES, TUNNELS) ET DE CAVITES NATURELLES SOUS LE SITE D'IMPLANTATION DES SONDES.....	11
6.3 PRESENCE DE SITES POLLUES A L'APLOMB DES FORAGES PROJETES.....	11
6.4 ZONES DE GLISSEMENT DE TERRAIN.....	11
7. ETAPES A PREVOIR LORS DE LA PROCEDURE D'AUTORISATION.....	12
7.1 PRINCIPE.....	12
7.2 CONSULTATION DE LA CARTE.....	12
7.3 DEROGATION.....	13
7.4 DEMANDE D'AUTORISATION.....	13
7.5 PRELEVEMENTS DE CHALEUR.....	14
7.6 ANNONCE DU FORAGE AUPRES DES AUTORITES.....	14
7.7 TRANSMISSION DES DONNEES GEOLOGIQUES DE FORAGE.....	14
7.8 DIVERS.....	15
8. DOCUMENTS CONSULTES.....	15
8.1 CARTES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES.....	15
6.2 FORAGES REPERTORIES.....	16
6.3 PRINCIPAUX DOCUMENTS GEOLOGIQUES CONSULTES.....	16

1. INTRODUCTION

1.1 PRINCIPES

- L'utilisation de sondes géothermiques verticales pour l'alimentation de pompes à chaleur est en fort développement en Suisse et dans le canton de Neuchâtel. Le soutien à une utilisation de la chaleur du sous-sol s'inscrit dans la politique cantonale énergétique et environnementale.
- L'implantation de sondes géothermiques verticales peut présenter un risque pour les eaux souterraines, en particulier. La carte et la notice sont destinées à fixer les profondeurs d'exploitation autorisées de la chaleur du sol sur tout le territoire cantonal, dans le respect des ressources hydrologiques.

1.2 BASES LEGALES

Les bases légales suivantes sont applicables à l'implantation des sondes géothermiques verticales :

- Loi sur la protection de l'environnement du 7 octobre 1983 (LPE, RS 814.01).
- Loi sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (LEaux, RS 814.20).
- Loi cantonale sur la protection des eaux du 12 octobre 1984 (LCPE, 805.10).

2. SIGNIFICATION ET OBJECTIFS DE LA CARTE

- La carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sol par sondes géothermiques verticales sur le territoire du Canton de Neuchâtel délimite les régions où l'implantation de sondes géothermiques verticales est **interdite ou autorisée**.
- Dans les régions autorisées, elle fixe la **profondeur maximale** autorisée de chaque forage, à partir de critères géologiques et hydrogéologiques.
- La carte est destinée à être consultée par les requérants dans la phase initiale de leur projet. Le document a une fonction de **préavis** du Service de la protection de l'environnement pour l'octroi d'une autorisation de forage. En fonction de la catégorie correspondant précisément au site choisi pour l'implantation des sondes géothermiques verticales, l'utilisateur est immédiatement renseigné sur les possibilités de réaliser son projet.

- La carte ne renseigne pas sur les éventuelles restrictions locales, dues par exemple à la présence de **droits privés existants**. Elle n'a donc pas valeur de référence juridique pour l'octroi ou le refus d'une autorisation de forage par l'autorité au moment du dépôt du permis de construire.
- La carte est **dénuée de foi publique**, ce qui implique que ses auteurs ne pourront en aucun cas être tenus pour responsables d'événements imprévus liés à son utilisation.
- La carte ne donne aucune indication sur les possibilités d'exploiter directement les **eaux souterraines** comme ressource thermique.

3. LEGENDE DE LA CARTE

Le territoire du canton de Neuchâtel a été subdivisé en trois régions :

Région 1: *L'implantation de sondes géothermiques verticales est strictement interdite.*

L'admissibilité de l'installation de sondes géothermiques verticales a été évaluée en fonction des restrictions légales et du risque de porter atteinte aux ressources en eau souterraines et à d'autres biens publics.

L'implantation de sondes géothermiques verticales est **interdite** dans les cas suivants :

- Projet situé en zone de protection des captages d'eau souterraine (zones S1, S2 ou S3).
- Zones sujettes à des glissements de terrain et éboulements.
- Présence d'ouvrages souterrains (galeries, tunnels) sous le site d'implantation des sondes.
- Présence de sites pollués à l'aplomb du site.

Région 2: *L'implantation de sondes géothermiques verticales est interdite. Une dérogation est possible sous certaines conditions.*

Une autorisation exceptionnelle peut être octroyée sur la base d'une coupe géologique prévisionnelle, établie par un géologue, justifiant l'absence de risque hydrogéologique et technique. Cette coupe et le rapport y relatif fixent la profondeur maximale du ou des forage(s). En aucun cas celle-ci ne pourra être supérieure à 60 m.

L'admissibilité de l'installation de sondes géothermiques verticales a été évaluée en fonction du risque de porter atteinte aux ressources en eau souterraines et à d'autres biens publics.

L'implantation de sondes géothermiques verticales est en principe interdite dans les cas suivants :

- Risque de porter atteinte aux nappes d'eau souterraine et de modifier les écoulements souterrains.
- Possibilité de rencontrer en cours de forage de l'eau souterraine sous pression (artésianisme).
- Caractéristiques des terrains traversés pouvant se révéler techniquement problématiques pour la réalisation de forages.

Région 3: *L'implantation de sondes géothermique verticales est autorisée, avec limitation de la profondeur.*

3a : *autorisée jusqu'à une profondeur de 60 mètres*

3b : *autorisée jusqu'à une profondeur de 120 mètres*

3c : *autorisée jusqu'à une profondeur de 180 mètres*

Les régions ont été définies à partir de critères de protection des ressources en eau souterraine. En raison de l'hétérogénéité et la diversité du sous-sol, la carte n'exclut pas des imprévus d'ordre géologique (cavités karstiques, venues d'eaux artésiennes locales, terrains instables).

En cas de dépassement souhaité de la profondeur maximale prescrite, une autorisation exceptionnelle peut être octroyée sur la base d'une coupe géologique prévisionnelle, établie par un géologue, justifiant l'absence de risque hydrogéologique. Cette coupe et le rapport y relatif indiqueront la profondeur maximale souhaitée du ou des forage(s).

4. ETAPES DE REALISATION DE LA CARTE

La carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sol par sondes géothermiques verticales (SGV) sur le territoire du Canton de Neuchâtel a été établie en deux étapes :

Etape 1 Détermination des possibilités d'implantation des SGV sur l'ensemble du territoire neuchâtelois par Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils S.A. sur la base de **critères géologiques uniquement**. Le document a été établi en collaboration avec le Service de la protection de l'environnement, en fonction des conditions géologiques locales et du risque de porter atteinte aux ressources en eaux souterraines. Les secteurs définis correspondent aux Régions 2 et 3 de la carte.

Etape 2 Délimitation par les Services cantonaux des zones où l'implantation des SGV est strictement interdite (Région 1). Les Secteurs ont été définis sur la base de **critères légaux** (zones de protection, sites pollués), **géologiques** (zones de glissements) et en relation avec l'**environnement construit** (tunnels, ouvrages souterrains).

5. CRITERES GEOLOGIQUES

5.1 RISQUE DE PORTER ATTEINTE AUX NAPPES D'EAU SOUTERRAINE ET DE MODIFIER LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS. RISQUE D'ARTESIANISME.

Les ressources exploitables en eau souterraine dans le canton de Neuchâtel sont par endroits limitées et l'on doit faire face à de nombreuses difficultés d'exploitation. Pour cette raison, il importe de ne pas porter atteinte à la ressource lors des forages pour sondes géothermiques verticales. Les principaux réservoirs aquifères du canton sont :

- **Les calcaires du Jurassique et du Crétacé**, constituant la chaîne jurassienne. On les rencontre dans l'ensemble du canton.
- **Les graviers quaternaires**, situés dans l'axe des vallées alluviales et en bordure du lac de Neuchâtel.

5.1.1 Cas des réservoirs aquifères situés dans les calcaires jurassiens

La nature des formations marno-calcaires et leur disposition conditionnent les écoulements souterrains. La **figure 1** (hors texte) illustre le cas du littoral Neuchâtelois, mais également celui de la plupart des vallées synclinales, comme le Val-de-Ruz, le Val-de-Travers, la Vallée des ponts, la Vallée de la Brévine, les Vallées du Locle et de la Chaux-de-Fonds.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

Les réservoirs aquifères du Dogger, du Malm et du Crétacé, principales réserves en eau potable du canton, sont délimités par des formations moins perméables, à savoir :

- L'imperméable de l'"**Argovien**"-**Oxfordien**, constituant une séparation entre le Dogger et le Malm.
- Les marnes du "**Purbeckien**", fonctionnant souvent comme une barrière imperméable entre les calcaires du Malm et les calcaires du Valanginien.
- Les marnes de l'**Hauterivien inférieur**, considérées comme une barrière étanche entre les calcaires du Valanginien et l'Hauterivien supérieur.

Ces horizons ont pour effet de limiter les échanges d'eau verticaux et de mettre sous pression les nappes situées en profondeur. Le principe retenu lors de l'établissement de la carte consiste à **éviter tout percement des couches imperméables**, afin de ne pas mettre en communication les réservoirs aquifères, ce qui est proscrit par la loi, mais aussi d'éviter toute venue d'eau sous pression dans le forage.

Le toit des horizons imperméables est la **surface de référence** permettant de fixer la profondeur maximale des forages. On distingue les cas de figure suivants :

- Le toit de l'imperméable est situé à moins de 60 m de la surface du sol : forage(s) interdit(s) ou de longueur réduite avec autorisation spéciale (Région 2). Ce cas de figure est fréquemment rencontré (**figure 2**), notamment dans les centres urbains comme La Chaux-de-Fonds et la Ville de Neuchâtel.
- Le toit de l'imperméable est situé à plus de 60 m de la surface du sol. La profondeur de forage autorisée est établie en fonction de la profondeur établie ou estimée de l'imperméable.



Figure 2: Cas d'un champ de sondes géothermiques situé en Région 2 (Peseux). Les forages ont été autorisés aux conditions suivantes : détermination précise de la profondeur et du nombre des sondes par un géologue et suivi en cours de forage afin de ne pas percer la limite imperméable de l'Hauterivien inférieur.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

Exceptions :

- Dans la vallée de la Brévine, le percement des marnes du Purbeckien et de l'Hauterivien inférieur a été admis en raison des faibles risques encourus par les eaux souterraines. La profondeur maximale des forages a cependant été fixée à 60 m.
- Dans le Val-de-Ruz, au nord du Village de Dombresson, le percement du Purbeckien a été admis car à cet endroit, cette horizon ne représente pas une limite imperméable.
- Dans quelques cas où le risque hydrogéologique a été jugé inexistant, le percement du toit de l'Argovien sur quelques dizaines de mètres a été admis.

La délimitation précise des zones d'interdiction a été établie sur la base de profils géologiques de référence. Elle a également bénéficié des informations fournies par les nombreux forages existants, notamment sur le littoral, avec la forte densité de forages liés aux travaux de la N5.

5.1.2 Cas des nappes phréatiques du Quaternaire

Les principales nappes alluviales sont présentes dans l'axe des vallées (nappe du Val-de-Travers, nappe des Prés-Royer), mais également sur le littoral, en bordure sud des premiers contreforts du Jura (nappe de Bevaix-Perreux, nappe du delta de l'Areuse, nappe du Seyon, alluvions fluvio-glaciaires du littoral et de la Thielle).

Dans ces secteurs, les restrictions ont été fixées de façon à limiter les atteintes portées à la ressource en eaux souterraines. Les risques suivants ont été considérés :

- Mise en relation d'eaux d'origine différente, par exemple en perforant l'aquiclude en base des nappes en terrain graveleux.
- Rencontre de niveaux artésiens, avec intrusion d'eau aux caractéristiques physico-chimiques différentes, risque d'abaissement local de la pression hydraulique. Au centre du Val-de-Travers par exemple, il existe un risque élevé de rencontrer des niveaux de graviers artésiens intercalés dans les limons lacustres à faible profondeur (**figure 3**).



Figure 3: Venue d'eau souterraine sous pression - ou artésienne - le long d'un forage pour sondes géothermiques verticales, Val-de-Travers 2006.

5.1.3 Cas des bassins sédimentaires à remplissage molassique

La **Molasse d'eau douce inférieure** (Stampien-Aquitainien), peu perméable, constitue le substratum rocheux de la plaine de la Thielle et du plateau de Bevaix, notamment. On rencontre également une épaisseur considérable de molasse aquitainienne au cœur de la Vallée des Ponts et du Val-de-Ruz. L'épaisseur de la molasse est bien souvent méconnue et les rares données proviennent de méthodes géophysiques indirectes et de forages profonds. La profondeur autorisée des forages pour sondes géothermiques verticales a été fixée de façon à ne pas forer dans les calcaires sous-jacents, et d'éviter ainsi d'importantes venues d'eau sous pression. Précisons qu'en raison de la mauvaise documentation du remplissage molassique dans certains secteurs, comme par exemple le plateau de Bevaix, une marge de sécurité verticale de plusieurs dizaines de mètres a été prise en compte pour autoriser les forages à 120 m et 180 m de profondeur.

L'Oehningien (Tortonien –Samartien) de la vallée du Locle, constitué de calcaires et craies lacustres, constitue un réservoir aquifère en eau potable de première importance. Le principe retenu dans la vallée du Locle est d'éviter tout contact entre les forages et la nappe de l'Oehningien, dont le niveau moyen au centre-ville est estimé à 920 m.s.m., avec pour objectif d'éviter de porter atteinte à la ressource en eau potable. Les secteurs où les forages sont autorisés correspondent donc aux endroits où la profondeur de la nappe de l'Oehningien est supérieure ou égale à 60 m. On a également veillé à éviter tout percement de calcaires sous-jacents pouvant contenir de l'eau artésienne (par exemple, Hauterivien supérieur et Valanginien).

5.2 CARACTERISTIQUES DES TERRAINS TRAVERSES POUVANT SE REVELER TECHNIQUEMENT PROBLEMATIQUES POUR LA REALISATION DE FORAGES

Hormis la présence de cavités dans certains niveaux calcaires, la grande majorité des roches que l'on rencontre dans le sous-sol neuchâtelois ne présente pas de problème particulier d'ordre technique pour la réalisation de forages pour sondes géothermiques verticales. Ces roches peuvent être perforées sans grandes difficultés par les machines utilisant les technologies de forage actuelles.



Figure 4: Difficultés d'avancement et limitation technique de la profondeur de forage en raison des caractéristiques des terrains rencontrés (limons très fins saturés en eau).

En revanche, on dénombre quelques sites où le type de roches rencontré peut se révéler techniquement problématiques pour la réalisation de forages (**figure 4**). On citera par exemple des problèmes rencontrés au Val-de-Travers, où des limons lacustres, fluides et peu compacts, limitent la profondeur maximale des forages.

6. CRITERES LEGAUX ET LIES A L'ENVIRONNEMENT CONSTRUIT

6.1 ZONES DE PROTECTION DES CAPTAGES D'EAU SOUTERRAINE

Les zones de protection des eaux souterraines sont délimitées pour tout captage d'eau d'intérêt public. Les activités humaines autorisées à l'intérieur des zones de protection sont régies par un règlement communal. A l'intérieur des zones de protection, il est admis que toute perturbation du sous-sol aura une influence sur le captage d'eau souterraine protégé.

Dans le canton de Neuchâtel, les zones de protection sur les reliefs calcaires sont d'une extension considérable, en raison de la nature karstique des principales ressources en eau du canton et de la grande rapidité des écoulements souterrains. Dans les vallées contenant des aquifères graveleux d'origine alluviale, comme par exemple le Val-de-Ruz (nappe des Prés-Royer) et le Val-de-Travers (nappe des Sugis, Nappe des Cornées et de la Binrée), on trouve également des zones de protection liées à des captages d'eau potable (**figure 5**).

La présence de zones de protection exclut légalement toute possibilité de forage pour la pose de sondes géothermiques verticales.

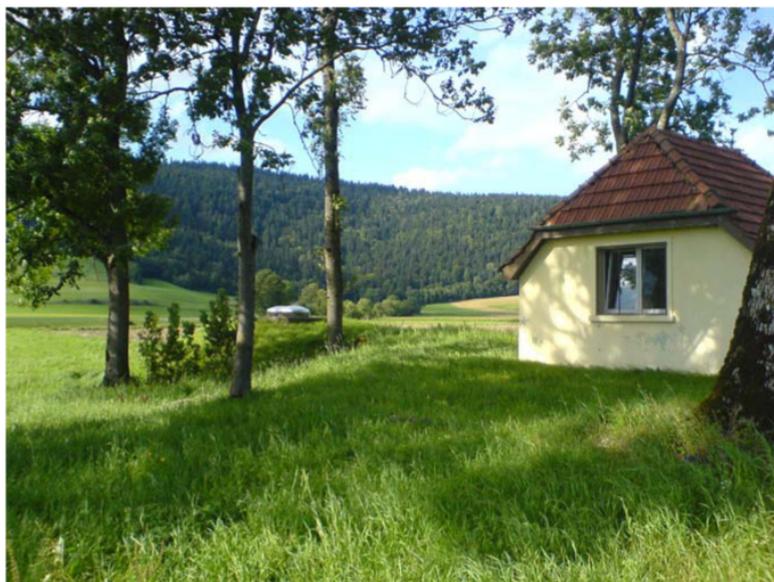


Figure 5: Zones de protection des captages d'eau souterraine, Val-de-Ruz.

6.2 PRESENCE D'OUVRAGES SOUTERRAINS (GALERIES, TUNNELS) ET DE CAVITES NATURELLES SOUS LE SITE D'IMPLANTATION DES SONDES

La rencontre de cavités le long d'un forage peut parfois conduire à l'échec de l'implantation des sondes géothermiques, de par la perte totale ou partielle du ciment de remplissage. La présence de **cavités d'origine naturelle** est un phénomène courant et rarement prévisible dans le sous-sol de l'arc Jurassien. Celles-ci sont liées à la fracturation de la roche et à la dissolution des calcaires par les eaux météoriques (karst). Lors l'établissement de la carte, les forages ont été interdits à proximité immédiate des dolines les plus remarquables, de même qu'aux abords des pertes et sources karstiques de première importance (source de la Serrière, source de l'Areuse, source de la Noiraigue, source de la Raisse, perte du Bied des Ponts, source du Torrent,...). La présence d'**ouvrages souterrains** (Tunnels, aqueducs, oléoducs) a également été prise en compte dans l'établissement de la carte afin d'éviter tout dommage aux ouvrages publics. La localisation de galeries de moindre importance et des conduites souterraines (eau, gaz, chauffage central, électricité, téléphone, eaux usées) reste sous la responsabilité du projeteur.

6.3 PRESENCE DE SITES POLLUES A L'APLOMB DES FORAGES PROJETES

Le percement par forage de sites pollués/contaminés est interdit, notamment pour les risques environnementaux encourus. La localisation des sites pollués/contaminés a été établie sur la base du cadastre neuchâtelois des sites pollués (CANEPO), publié en 2006, regroupant décharges, aires d'exploitations industrielles et artisanales, sites d'accident.

6.4 ZONES DE GLISSEMENT DE TERRAIN

Les zones de glissement de terrain constituent des secteurs peu favorables à l'implantation de sondes géothermiques verticales. Les régions établies selon ce critère feront l'objet d'une actualisation périodique, car les cartes des dangers du canton de Neuchâtel sont en cours de réalisation.

7. ETAPES A PREVOIR LORS DE LA PROCEDURE D'AUTORISATION

provisoire à compléter par SCPE

7.1 PRINCIPE

La réalisation de forages pour l'implantation des sondes géothermiques verticales et l'exploitation de la chaleur du sous-sol par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur sont soumises à autorisation.

Les conditions d'obtention de l'autorisation d'implantation des sondes géothermiques verticales ne sont en rien modifiées par rapport à la situation antérieure. Le requérant remplira en premier lieu le ou les formulaires ad hoc exigés pour l'exploitation de la chaleur du sous-sol.

Les services compétents pour l'octroi d'une autorisation et pour toute demande de renseignement sont :

- Département de la gestion du territoire
Case postale
Le Château
Rue de la Collégiale 12
2000 Neuchâtel
- Service cantonal de la protection de l'environnement
Rue du Tombet 24
2034 Peseux
- Service cantonal de l'énergie
Rue de Tivoli 16
2003 Neuchâtel

7.2 CONSULTATION DE LA CARTE

La carte sur les possibilités d'implantation de sondes géothermiques verticales sur le territoire du Canton de Neuchâtel est destinée à être consultée par le requérant dans la phase initiale du projet.

La réponse obtenue lors de la consultation du document doit être considérée comme un préavis technique de faisabilité. Le préavis n'a pas valeur de référence juridique pour l'octroi ou le refus d'une autorisation de forage lors de la procédure officielle.

Le document est accessible aux adresses suivantes :

- <http://sitn.ne.ch/index.html>
- <http://satac.ne.ch>

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

La consultation peut se faire par l'intermédiaire du Service cantonal de la protection de l'environnement par téléphone, fax ou courriel, en fournissant les informations suivantes :

- n° de l'article cadastral.
- ou - adresse exacte.
- ou - coordonnées géographiques du projet.

7.3 DEROGATION

Région 1 (implantation de sondes géothermiques strictement interdite) : **aucune dérogation ne sera accordée**. Les services compétents se tiennent à disposition du requérant pour suggérer une solution alternative à l'alimentation d'une pompe à chaleur (PAC eau-eau, eaux de surface, collecteurs enterrés horizontaux).

Région 2 (implantation de sondes géothermiques verticales interdite, avec dérogation possible) : le requérant est invité à étudier toute solution alternative. L'autorité compétente pourra octroyer une **autorisation exceptionnelle** sur la base d'une étude complémentaire justifiant l'absence de risque hydrogéologique et fixant la profondeur maximale des forages. En cas d'acceptation du projet, l'autorité exigera dans tous les cas un suivi géologique en cours de construction de l'ouvrage par un géologue diplômé aux compétences reconnues. Le plus souvent, la dérogation conduira à diminuer la profondeur des forages et à en augmenter le nombre (**figure 2**).

Région 3 (implantation de sondes géothermiques verticales autorisée, avec limitation de la profondeur) : un **dépassement de la profondeur prescrite** pourra faire l'objet d'une requête. L'autorité compétente pourra octroyer une autorisation exceptionnelle sur la base d'une étude complémentaire justifiant l'absence de risque hydrogéologique et fixant la profondeur maximale souhaitée des forages. En cas d'acceptation du projet, l'autorité pourra exiger un suivi géologique en cours de forage par un géologue diplômé aux compétences reconnues.

7.4 DEMANDE D'AUTORISATION

La procédure d'autorisation, les documents demandés ainsi que les instructions d'envoi sont détaillés sur le formulaire E60 utilisation de pompe à chaleur (PAC) de la république et canton de Neuchâtel.

Le formulaire est disponible sous :

- www.crde.ch rubrique "Formulaires"
- ou - www.ne.ch/Energie rubrique "Police des constructions"
- ou - <http://satac.ne.ch/> rubrique "Formulaires papiers"

Aucun travail ne pourra débuter avant réception de l'autorisation de forage.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

7.5 PRELEVEMENTS DE CHALEUR

La ressource en chaleur du sous-sol est limitée. Dans tout projet d'implantation de sondes géothermiques verticales, les interactions possibles avec des installations voisines de prélèvement de chaleur/froid doivent être prises en considération, et ceci particulièrement en milieu urbain. Le requérant se renseignera sur la présence d'ouvrages existants aux abords du lieu d'implantation de(s) la sonde(s). En cas d'interaction possible et/ou de prélèvements thermiques supérieurs à la capacité de régénération saisonnière du sous-sol, le requérant proposera toute mesure utile pour compléter, régénérer et sauvegarder la ressource géothermique.

7.6 ANNONCE DU FORAGE AUPRES DES AUTORITES

Annonce au moins 1 semaine avant le début des travaux de :

- la date de réalisation des travaux.
- nom de l'entreprise chargée des forages.
- nom du géologue diplômé mandaté pour effectuer le relevé géologique.

par courriel : SCPE@ne.ch

par Fax : 032 889 62 63

7.7 TRANSMISSION DES DONNEES GEOLOGIQUES DE FORAGE

La transmission des données géologiques de forage est une exigence légale. La carte sur les possibilités d'implantation de sondes géothermiques verticales sur le territoire du Canton de Neuchâtel a été établie en particulier grâce aux résultats des forages déjà réalisés. En communiquant les résultats de ses propres forages, le requérant contribue à développer la connaissance du sous-sol. Le risque géologique encouru par de nouveaux utilisateurs en sera diminué et la prévision géologique pour les forages à venir améliorée.

Un relevé géologique commenté sera obligatoirement transmis aux services compétents. Celui-ci sera établi par un géologue diplômé sur la base des cuttings prélevés tous les 2 m par l'entreprise de forage. Un standard de qualité sera exigé.

En cas d'événement exceptionnel (artésianisme, rencontre d'ouvrage souterrain ou de formation géologique non prévue), le requérant, l'entreprise de forage et le géologue **informeront immédiatement le Service cantonal de la protection de l'environnement** (tel. 032 889 67 30) et proposeront les mesures qu'ils entendent appliquer pour remédier aux dommages et rétablir de façon durable la situation antérieure.

Tout dépassement de la profondeur autorisée, toute information erronée ou incomplète sur la position des sondes, ou non transmission du relevé géologique pourront faire l'objet d'une procédure à l'encontre du requérant et de son mandataire.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

7.8 DIVERS

Même si la carte fixe la profondeur maximale autorisée des forages, le calcul de la longueur de sonde adéquate en fonction de la puissance thermique de la PAC doit être fait par un professionnel selon les règles de l'art et en fonction des conditions géologiques locales.

Le dimensionnement de l'installation est de la compétence du projeteur.

8. DOCUMENTS CONSULTÉS

8.1 CARTES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

Les documents cartographiques de référence suivants ont été utilisés :

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. Swisstopo.

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. ET 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. ET JACCARD, M. (1994): Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1182 Ste-Croix (n°95), avec notice explicative. Swisstopo.

ROLLIER, L., ET 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.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

6.2 FORAGES REPERTORIES

La connaissance des caractéristiques du sous-sol a été complétée par les renseignements obtenus lors de nombreux forages, à savoir :

- a. Forages de reconnaissance liés à la réalisation des routes cantonales (Départements des travaux publics du canton de Neuchâtel, Service des ponts et chaussées) :
 - Construction de la N5 : **579** forages avec descriptif + profils géologiques correspondants
 - Construction de la H10 : **130** forages avec descriptif + profils géologiques correspondants
 - Construction de la H20 : **67** forages avec descriptif + profils géologiques correspondants
- b. Forages Recensées dans la base de donnée SIG du Val-de-Travers (UNINE,2000) :
136 forages avec descriptif
- c. Forages divers répertoriés par le Département de la gestion du territoire, Service de la protection de l'environnement :
223 forages avec descriptif
- d. Forages pour la pose de sondes géothermiques verticales :
138 forages avec descriptif sur un total de 277 forages réalisés (état mai 2007)

6.3 PRINCIPAUX DOCUMENTS GEOLOGIQUES CONSULTES

ARAGNO, P.-O. (1994): Carte des isohypses du toit du Portlandien, région du Pâquier (Neuchâtel). Travail de diplôme géol. Université de neuchâtel.

ATTEIA, O., GOGNIAT, S., KOZEL, R. (1996): Apport de l'hydrogéologie, de la géophysique et des essais de traçage à la connaissance de l'aquifère karstique de la Noiraigue. Bulletin d'Hydrogéologie n°15, 1996.

ATESA (1990): Etude de l'impact sur l'environnement de l'extension de la carrière Juracime à Cornaux. Rapport d'impact, Juracime S.A.

ATESA (1999): Etude de l'impact sur l'environnement de la route principale J20. Evitement de la Chaux-de-Fonds. Rapport d'impact, Service de ponts et chaussées.

BMICSA (1983): Ville du Locle. Surveillance de la nappe souterraine. Rapport sur les sondages et le système d'observation mis en place.

BMICSA (1986): Gisement géothermique du littoral Neuchâtelois. Possibilités d'exploitation à des fins thermales ou géothermiques. Recherche d'un site favorable. Rapport non publié OFEN et département des travaux publics du Canton de neuchâtel.

BMICSA (1993): Détermination des zones de protection des captages de Valangin. Puits du Sorgereux et source des Huitains du haut.

BMICSA (1994): Zones de protection des captages des gorges de l'Areuse. Délimitation du périmètre de protection de l'aquifère de la mine de la Presta.

BMICSA (1995): Détermination des zones de protection des captages des gorges de l'Areuse. Synthèse des études menées de 1988 à 1995.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

- BMICSA (1989): Commune de Saint-Blaise. Délimitation des zones de protection des captages de la commune de Saint-Blaise.
- BURGER, A. (1959): Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. Thèse, Université de Neuchâtel.
- BURGER, A. (1988): Commune du Locle. Zones de protection des captages d'eau potable de la ville. Rapport général.
- BURGER, A. & GORHAN, H.L. (1986): Prospection géothermique le long du pied sud du Jura. Rapport de recherches NEFF, N°165, 1985. Bulletin d'Hydrogéologie n°6, 91-227.
- BURGER, A. & SCHAEER, J.-P. (1996): La vallée du Locle – oasis jurassienne. Cahiers de l'Institut neuchâtelois, nouvelle série.
- BURKHARD M, ET AL. (1998): Tectonique et hydrogéologie dans le Jura Neuchâtelois, *Eclogae geol. Helv.* 91, p. 177-183.
- UNINE, BOUZELBOUDJEN, M. ET BÜNZLI, M.-A. (2000): Carte SIG du Val-de-Travers avec base de données. Non publié.
- BURGER, A., STETTLER, R. ET ROUSSY, A. (1986): Les gorges de l'Areuse. Baconnière, Neuchâtel, publié à l'occasion du 100ème anniversaire de la Société des Gorges de l'Areuse.
- CHYN (1989): Zones de protection des captages des Brenets. Rapport d'expertise, janvier 1989.
- FREI, E. (1925): Zur Geologie des südöstlichen Neuenburger Jura, insbesondere des Gebietes zwischen Gorges de l'Areuse und Gorges du Seyon. Thèse, Université de Neuchâtel. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, NF Lfg. 55.III. Avec carte géologique au 1:25'000.
- GEOREPONSES (1994): Projet d'exploitation géothermique de Marin. Etude préliminaire. Rapport non publié.
- GIA, NEUCHATEL (1990): Etude de l'impact sur l'environnement de la route nationale 5, tronçon Treytel-Areuse. Rapport de synthèse, 2^e étape.
- KIRALY, L. (1966): Remarques sur la tectonique de la région de Saint-Blaise (Neuchâtel). *Bull. soc. neuch. sci. nat.* Tome 89.
- LLOYD, A. (1963): Cover folding in the Sonmartel Chain. Sonderdruck aus der Geologischen Rundschau Band 53, 1963.
- MATHEY, B. (1976): Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon. Thèse, université de Neuchâtel.
- MEIA, J. (1965): Géologie de la montagne de Boudry. *Bull. soc. neuch. sci. nat.* Tome LIII.
- MEIA, J. (1969): Géologie du Mont Aubert et de l'anticlinal Soliat - Montagne de Boudry au nord du lac de neuchâtel. Thèse, Université de neuchâtel.
- MOREL, G. (1976): Etude hydrogéologique du bassin de la source de la Noiraigue. Rapport CHYN.
- MORNOD, L. (1969): Commune de Bevaix, Etude hydrogéologique de la région de Bevaix en vue d'une reconnaissance des eaux souterraines par forages. Avec 3 annexes. Centre d'hydrologie souterraine, Bulle.
- SCHARDT, H., ET DUBOIS, A. (1903): Description géologique des gorges de l'Areuse. *Bull. soc. neuch. sci. nat.*, Tome XXX.
- VON MOOS (1989): Erweiterung des Streinbruchs Bois Jacques, Cornaux. Geologische Untersuchungen 1988/1989.
- SIMEONI, G.-P. (1969): Etude hydrogéologique du bassin de la Noiraigue. Vallée de la Sagne, région de Martel-Dernier. Implantation d'un forage. Rapport CHYN.

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

République et canton de Neuchâtel

SOMMARUGA, A. (1997): Geology of the central Jura and the molasse basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. *Mém. soc. neuch. sci. nat.* Tome XII.

THIEBAUD, CH.-E. (1937): Etude géologique de la région Travers, creux du Van, Saint-Aubin. Thèse, Université de Neuchâtel.

THIERRIN, J. (1987): Zones de protection du puits de captage de la Brévine. Rapport du CHYN.

TRIPET, J.-P. (1966): Vallée de la Sagne. Etude géoélectrique. Rapport S.I. la Chaux-de-Fonds.

TRIPET, J.-P. (1972): Etude hydrogéologique du bassin de l'Areuse. Thèse, Université de Neuchâtel.

VALEY, B., BURKHARD, M., ET SCHNEGG, P.-A. (2004): Dépliage 3-D des anticlinaux bordant le synclinal fermé de la vallée des Ponts, Jura central, Suisse. *Eclogae geol. Helv.* 97/2, 279-291.

***Carte fixant les limites d'utilisation de la
chaleur du sol par sondes géothermiques
verticales sur le territoire du Canton de
Neuchâtel***

Annexes

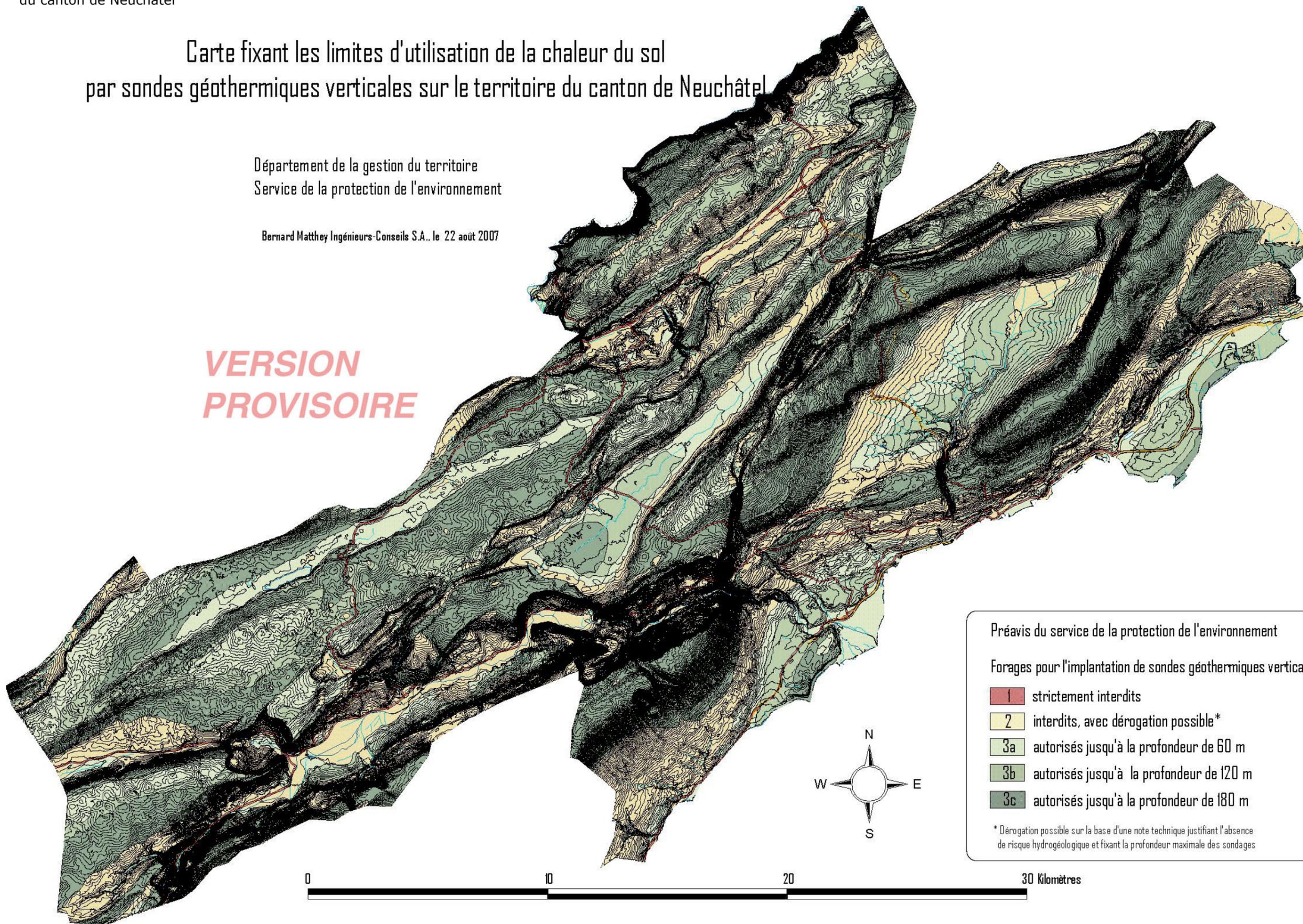
- Carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sol par sondes géothermiques verticales sur le territoire du Canton de Neuchâtel
- Figure 1, schéma illustrant les critères géologiques considérés pour fixer la profondeur maximale des forages pour l'implantation de sondes géothermiques verticales

Carte fixant les limites d'utilisation de la chaleur du sol par sondes géothermiques verticales sur le territoire du canton de Neuchâtel

Département de la gestion du territoire
Service de la protection de l'environnement

Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils S.A. le 22 août 2007

**VERSION
PROVISOIRE**



Préavis du service de la protection de l'environnement

Forages pour l'implantation de sondes géothermiques verticales :

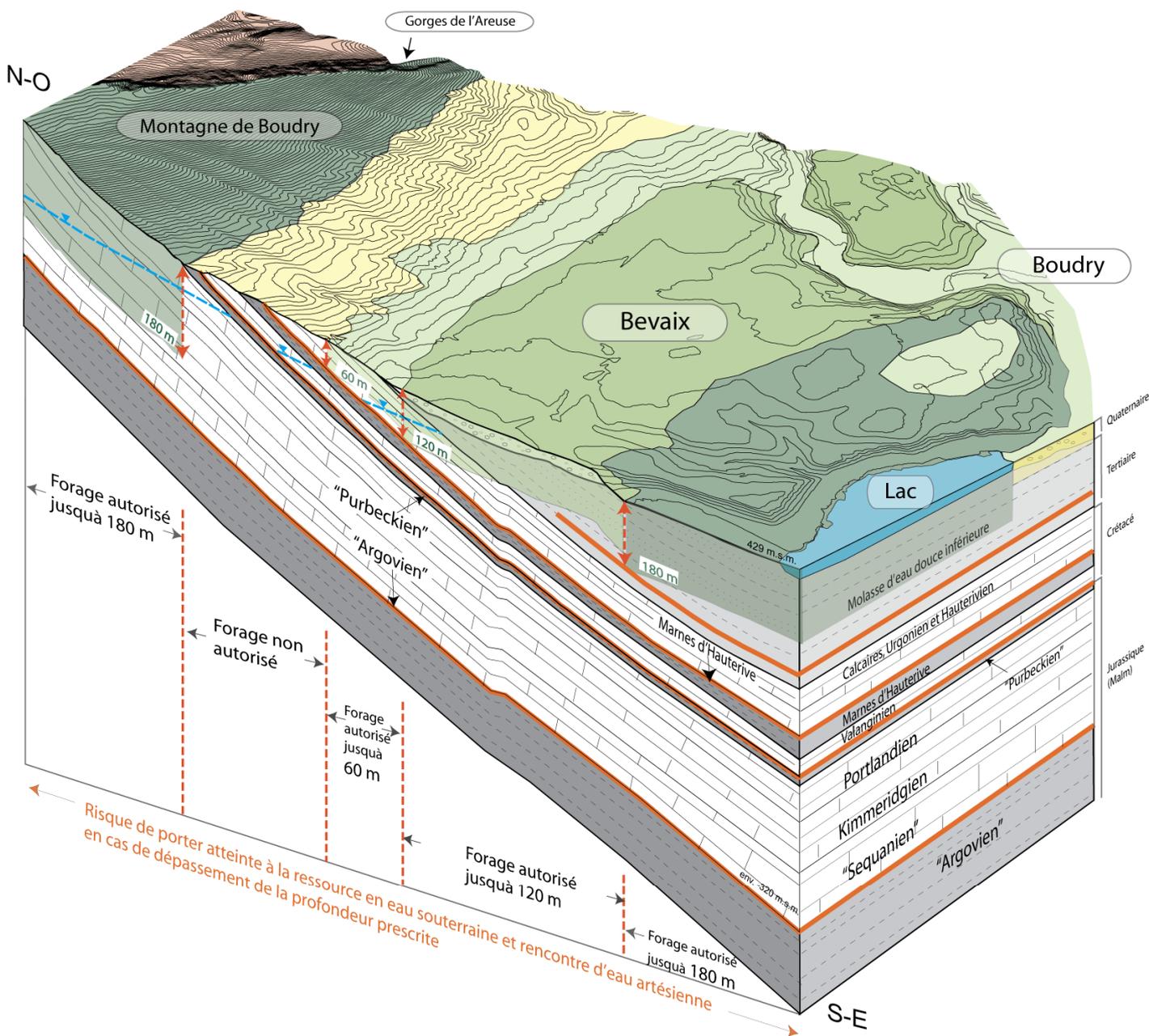
- 1** strictement interdits
- 2** interdits, avec dérogation possible*
- 3a** autorisés jusqu'à la profondeur de 60 m
- 3b** autorisés jusqu'à la profondeur de 120 m
- 3c** autorisés jusqu'à la profondeur de 180 m

* Dérogation possible sur la base d'une note technique justifiant l'absence de risque hydrogéologique et fixant la profondeur maximale des sondages

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

FIGURE 1

Schéma illustrant les critères géologiques considérés pour fixer la profondeur maximale des forages pour l'implantation de sondes géothermiques verticales. Exemple du Littoral Neuchâtelois.



Légende

- | | | | | | | | |
|---|---|---|--|---|--|---|---|
|  | Forage strictement interdit |  | Forage non autorisé, dérogation possible |  | Forage autorisé jusqu'à la profondeur de 120 m |  | Niveau géologique de référence utilisée comme critère principal pour fixer la profondeur maximale du forage |
|  | Forage autorisé jusqu'à la profondeur de 60 m |  | Forage autorisé jusqu'à la profondeur de 180 m |  | Niveau de l'eau souterraine dans les calcaires | | |

Annexe 2.2

**Dimensionnement d'une sonde géothermique
verticale en milieu karstique**



Formation spécialisée en hydrogéologie
Master en hydrogéologie
Diplôme postgrade d'hydrogéologue

SEMINAIRES LONGS 2007

DIMENSIONNEMENT D'UNE SONDE GEOtherMIQUE VERTICALE EN MILIEU KARSTIQUE

Esther Peguiron

12 Mars 2007

Table des matières

1. INTRODUCTION	3
2. CARACTERISTIQUES GEOTHERMIQUES DU MILIEU KARSTIQUE.....	3
2.1 TRANSPORT DE CHALEUR ADVECTIF DANS LES CONDUITS KARSTIQUES	3
2.2 GRADIENT THERMIQUE DANS LA ZONE NON SATUREE DU KARST	5
2.3 TEMPERATURE DU SOL	7
3. CONSÉQUENCES POUR LE DIMENSIONNEMENT DE SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES	8
3.1 DIMENSIONNEMENT D'UNE SGV.....	8
3.2 INFLUENCE DU MILIEU KARSTIQUE SUR LE DIMENSIONNEMENT D'UNE SGV	9
3.3 DONNÉES MANQUANTES POUR LA RÉALISATION D'UNE CARTE DES ZONES EXPLOITABLES POUR LA GÉOTHERMIE	9
4. CONCLUSION	10
5. BIBLIOGRAPHIE	11
5.1 REFERENCES UTILISEES	11
5.2 REFERENCES NON UTILISEES	11

1. INTRODUCTION

L'utilisation d'une sonde géothermique verticale (ci-après abrégée SGV) couplée à une pompe à chaleur pour le chauffage de petites maisons familiales est de plus en plus fréquente en Suisse. On dénombre actuellement plus de 45'000 bâtiments utilisant cette technologie (Signorelli, 2004). Les installations existantes sont implantées en majorité dans la molasse ou dans les aquifères poreux du plateau suisse. Les implantations sont nettement moins nombreuses dans les calcaires karstiques du Jura, dont la capacité à fournir de la chaleur est par conséquent moins bien connue. De plus, à cause des particularités hydrogéologiques du karst, un certain nombre des SGV implantées y sont sous dimensionnées. Bien qu'à l'heure actuelle, aucun cas connu de panne d'une SGV soit directement dû à l'environnement calcaire (Bassetti et al. 2006), une étude approfondie de l'implantation de SGV en milieu karstique est nécessaire afin de mettre en confiance les utilisateurs et les autorités, dans le but de les encourager à utiliser cette énergie renouvelable et sans dégagement de CO₂.

Le but de ce séminaire est de mettre en évidence les problèmes de dimensionnement des sondes liés au karst. Ce travail devrait servir de base à la réalisation future d'une cartographie des régions karstiques suisses favorables à l'implantation de SGV, ainsi qu'à la mise au point d'un modèle de dimensionnement des SGV tenant compte des particularités du karst, utilisable par les ingénieurs chargés de l'implantation.

Le chapitre 2 présente en détail les caractéristiques géothermiques du milieu karstique suisse à partir de la synthèse de plusieurs articles. Dans le chapitre 3, l'influence de ces particularités sur l'implantation de SGV est mise en évidence, sur la base des normes suisses et allemandes utilisées pour le dimensionnement de petites SGV. Les données nécessaires à la réalisation de la cartographie géothermique en sont finalement déduites.

2. CARACTERISTIQUES GEOTHERMIQUES DU MILIEU KARSTIQUE

2.1 TRANSPORT DE CHALEUR ADVECTIF DANS LES CONDUITS KARSTIQUES

Le système karstique se distingue par sa dualité : localement très imperméable (calcaire massif), il est traversé par des conduits de grand diamètre qui le rendent globalement perméable. Au contraire d'un aquifère poreux où l'eau souterraine est répartie de manière relativement homogène, dans un aquifère karstique, les écoulements sont concentrés dans les conduits. Pour cette raison, le gradient hydraulique dans un aquifère karstique est difficile à déterminer ; le niveau saturé se trouve en général proche de l'altitude de la source, en période de basses et moyennes eaux. Dans un système karstique mature, ceci conduit à la formation d'une zone non saturée très profonde, de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, atteignant parfois 2 km (Luetscher & Jeannin 2004). A l'inverse, la zone saturée est souvent très peu épaisse ; toutes les eaux drainées dans le bassin versant transitent par conséquent dans un volume de roche restreint, causant ainsi les débits spécifiques importants observés pour les sources karstiques en région tempérée (10 à 50 l/s*km² ; Jeannin et al. 1997, Luetscher & Jeannin 2004).

La dualité du karst a également un effet important sur les transferts de chaleur : ceux-ci sont dominés par des flux advectifs entraînés par l'air et l'eau à l'intérieur des conduits ; les transferts conductifs à l'intérieur de la roche ou entre la roche et l'eau ou l'air sont très lents en comparaison des transferts advectifs. La bonne conductivité

thermique de la roche (1.7 à 3.3 W/mK) en comparaison de celle de l'eau (0.585 W/mK) ou de l'air ($2.5 \cdot 10^{-3}$ W/mK) est donc compensée par les volumes d'eau et d'air en mouvement.

Sur la base de mesures régulières de température de l'air et de l'eau dans des réseaux karstiques, Jeannin et co-auteurs (1997) mettent en évidence que les débits d'eau dans la zone saturée du karst en moyennes et hautes eaux sont suffisamment élevés pour absorber la totalité du flux géothermique venant des couches plus profondes, sans pour autant faire augmenter de façon notable la température de l'eau souterraine : un débit spécifique d'eau de 10 à 50 l/s*km² correspond à $3.15 \cdot 10^5$ à $1.58 \cdot 10^6$ m³/km²*an. Le flux géothermique continental moyen est de 87 mW/m², ce qui correspond à une énergie de $1.9 \cdot 10^{12}$ J/km²*an. Sachant que $4.18 \cdot 10^6$ J sont nécessaires pour chauffer 1 m³ d'eau de 1°C, l'énergie géothermique permet de chauffer de 0.3 à 1.5°C le volume d'eau qui transite en moyenne sur une année. En période de basses eaux en revanche, les débits spécifiques sont beaucoup plus faibles et le flux géothermique, bien que toujours absorbé en grande partie par le flux d'eau, permet de la chauffer de quelques degrés. Ce calcul est confirmé par Benderitter (1993) qui, en étudiant la transmission des pics de température dans le karst, observe que les crues causées par des précipitations hivernales froides après une période d'étiage provoquent des pics positifs de température à la source. Matthey (1974) a également estimé l'élévation de température à la source karstique de l'Areuse (NE), causée par l'absorption du flux géothermique ; il obtient une valeur moyenne de 0.55°C, et des valeurs extrêmes de 0.05°C en hautes eaux et 9.6°C en basses eaux, si l'a totalité du flux géothermique est absorbé.

Badino (2005) approfondit le sujet en étudiant plus en détail l'effet des écoulements d'eau dans les conduits ; en absorbant une partie du flux géothermique, le conduit induit une déformation des lignes du gradient de température et concentre le flux géothermique sur lui-même, créant ainsi une "zone d'ombre" dans la partie supérieure de l'aquifère, dans laquelle il n'y aura plus du tout de gradient géothermique (Figure 1).

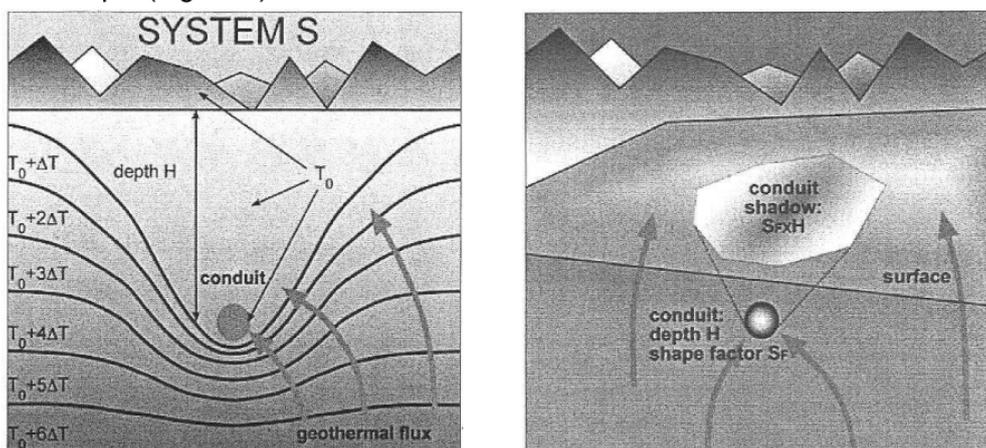


Figure 1 : Flux géothermique autour du conduit et zone d'ombre induite par le conduit (Badino 2005)

Le volume de cette zone d'ombre dépend de la taille et de la profondeur du conduit, ainsi que du débit d'eau qui le traverse.

Cependant, plus l'eau absorbe de flux géothermique, plus sa température augmente et plus elle perd sa capacité à absorber de la chaleur. Badino (2005) montre qu'il existe un débit critique Q_c [kg/s] en dessous duquel le conduit est totalement transparent au flux géothermique (pas de changement de gradient géothermique) ; pour l'eau, il estime ce débit à $5.5 \cdot 10^{-4} \cdot S_F$, S_F étant le facteur de forme du conduit, difficile à calculer, mais environ proportionnel à la longueur du conduit. Les longueurs moyennes des conduits karstiques matures étant de $1 \cdot 10^3$ à $1 \cdot 10^4$ m, les débits observés aux sources karstiques sont beaucoup plus importants que le débit critique. Ceci implique que l'écoulement d'eau dans les conduits karstiques saturés suffit à absorber toute la chaleur amenée par le flux géothermique et ainsi à former une barrière complète pour la partie non saturée de l'aquifère karstique. Par conséquent, la base d'un aquifère karstique peut être considérée comme une limite à flux de chaleur nul (Jeannin et al. 1997, Luetscher et Jeannin, 2004). Ceci est confirmé par les températures mesurées dans des tunnels qui traversent des massifs montagneux : à l'intérieur de massifs karstiques, la température n'augmente pratiquement pas en comparaison des massifs cristallins (Figure 2).

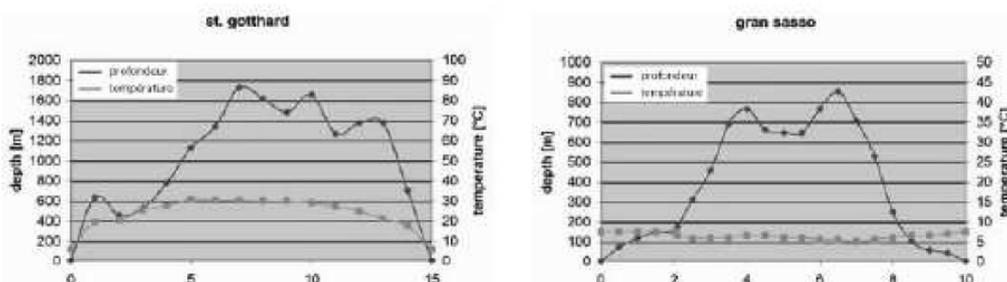


Figure 2 : Température observée en fonction de la profondeur dans deux tunnels traversant un massif rocheux cristallin (à gauche) et karstique (à droite) (Badino 2005)

On observe tout de même un léger gradient thermique dans la zone saturée du karst, causé par la transformation de l'énergie potentielle de l'eau en chaleur lorsqu'elle perd de l'altitude. Toutefois, ce gradient est très faible (de $0.2^\circ\text{C}/100\text{m}$) en comparaison du gradient géothermique continental moyen (de $3^\circ\text{C}/100\text{m}$).

2.2 GRADIENT THERMIQUE DANS LA ZONE NON SATURÉE DU KARST

Il a été montré plus haut (§ 2.1) que la zone saturée de l'aquifère forme une barrière au flux géothermique ; par conséquent, il n'y a pas de gradient géothermique dans la zone non saturée de l'aquifère. De nombreuses mesures de la température de l'eau et de l'air dans la zone non saturée du karst ont été réalisées, notamment par Jeannin (1990, 1997) et Luetscher (2004). Ces mesures ont permis de mettre en évidence les trois particularités suivantes :

1. En dessous d'environ 50 m de profondeur, les variations de températures saisonnières n'ont plus d'influence sur les températures du milieu. Cette zone superficielle où la température est variable est appelée "zone hétérothermique". En dessous, il s'agit de la "zone homothermique".
2. Les trois phases en présence (roche, eau et air) sont pratiquement en équilibre thermique. L'eau est en général plus froide que l'air et la roche de 0.15°C .
3. Le gradient thermique vertical observé varie entre 0.4 et $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$.

Le gradient thermique de l'air, dû à la perte d'énergie potentielle avec l'altitude, transformée en chaleur, varie entre 0.5 et 1°C/100m ; cet écart est dû au taux d'humidité de l'air, l'air humide contenant plus de chaleur latente que l'air sec. Le gradient thermique de l'eau (perte d'énergie potentielle avec l'altitude uniquement) est de 0.234°C/100m, soit environ 2 fois plus faible que celui de l'air.

Le gradient thermique observé semble donc être plus influencé par les circulations d'air que d'eau. Etant donné que l'air a une chaleur massique très faible par rapport à celle de l'eau, il faut des volumes d'air en mouvement beaucoup plus importants que ceux d'eau pour que le gradient de température de l'air domine. Luetscher (2004) a démontré que dans les systèmes karstiques matures, le transfert de masses d'air induit par les différences de pression atmosphérique entre l'entrée et la sortie est beaucoup plus important que le transfert d'eau induit par gravité et par conséquent suffisant pour équilibrer les températures dans la zone non saturée.

Dans certains systèmes karstiques épais, le gradient thermique observé diminue avec la profondeur pour atteindre des valeurs proches de 0.3°C/100 m ; effectivement, en profondeur, l'air circule moins bien, principalement par manque de connections avec la surface. Ainsi, les volumes d'eau sont proportionnellement plus grands et le gradient thermique de l'eau domine. Un phénomène semblable s'observe en région tropicale humide où les flux d'eau sont beaucoup plus importants et le gradient thermique par conséquent plus proche de celui de l'eau que de celui de l'air (Figure 3).

A cause de sa grande capacité calorifique, l'eau a plus d'inertie thermique et met plus de temps à s'équilibrer ; c'est pour cette raison qu'elle est en moyenne 0.15°C plus froide que l'air, cette différence de température correspondant à une distance verticale de 30 m.

Ainsi, le gradient thermique observé dans le karst n'est pas lié à la chaleur géothermique, mais au réchauffement de l'eau et de l'air dans les conduits lors de leur perte d'énergie potentielle avec l'altitude. Ce gradient ne dépasse pas 1°C/100 m et se situe souvent entre 0.4 et 0.6°C/100 m, soit environ trois à six fois moins que le gradient géothermique continental normal.

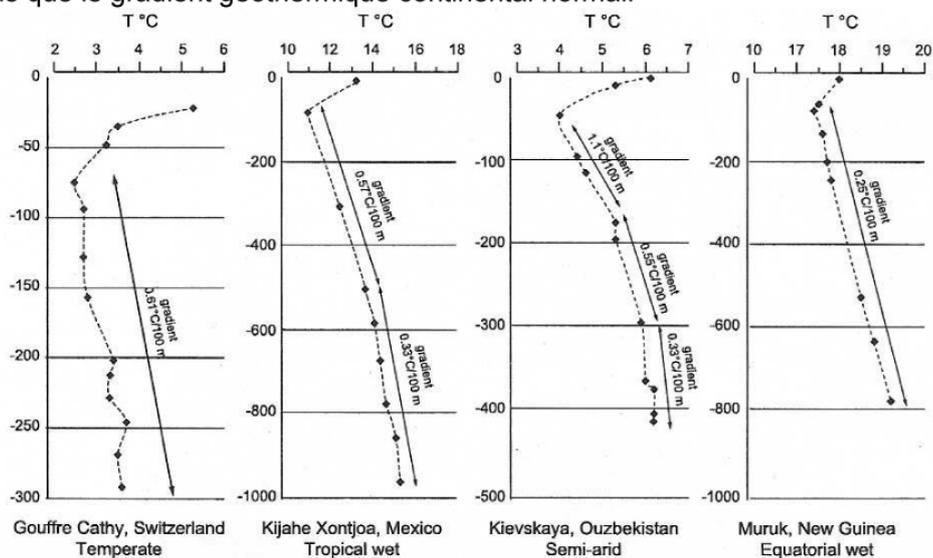


Figure 3 : Gradients thermiques observés dans des aquifères karstiques sous différents climats (Luetscher 2004)

2.3 TEMPERATURE DU SOL

La valeur du gradient géothermique n'évolue pratiquement pas avec la profondeur ; en revanche, la température atteinte à 100 m de profondeur dépend de la "température de départ", c'est-à-dire la température du sol à proximité de la surface. Par conséquent, une SGV implantée dans un même type de terrain, mais à une altitude plus élevée devra être plus longue pour fournir une puissance de chauffage équivalente. Ainsi, la connaissance de la température du sol à l'échelle régionale est très importante pour un bon dimensionnement des SGV. L'effet de la température du sol n'est pas une caractéristique du milieu karstique ; en revanche, en Suisse, les roches calcaires affleurantes se trouvent principalement dans le massif du Jura, soit globalement entre 500 et 1200 m d'altitude pour les zones habitées. De plus, l'effet de la température de départ est proportionnellement beaucoup plus important si le gradient géothermique est plus faible.

La température du sol est mesurée à 5 m de profondeur ; elle est assez bien corrélée à la température de l'air à la surface du sol, mesurée à 2 m en dessus du sol. Contrairement à la température de l'air qui descend en dessous de 0°C en hiver à partir de 1'000 m d'altitude environ, la température du sol ne descend que rarement en dessous de 0°C ; ceci est dû à la présence d'une couche de neige protectrice qui induit un taux d'humidité dans le sol plus élevé ; ces deux effets combinés maintiennent la température proche, mais supérieure à 0°C dans le sol. Par conséquent, la température du sol est bien corrélée à celle de l'air en dessous de 1000 m d'altitude ; entre 1000 et 1500 m une divergence est déjà observée et en dessus de 1500 m, la corrélation diminue de manière drastique.

A partir de mesures régulières sur 28 stations situées dans toute la Suisse, Signorelli et Kohl (2002) ont établi une relation polynomiale entre la température du sol et l'altitude, en minimisant les écarts entre les mesures et la courbe théorique :

$$\text{température du sol} = a_0 + a_1Z + a_2Z^2 + a_3Z^3$$

avec $a_0 = 15.23$, $a_1 = -1.08 \cdot 10^{-2}$; $a_2 = 5.61 \cdot 10^{-6}$ et $a_3 = -1.5 \cdot 10^{-9}$ et Z étant l'altitude. Cette étude très complète a permis de montrer que la température du sol dépend, en plus de l'altitude, des facteurs suivants :

- Exposition de la pente : une pente orientée au sud reçoit plus de flux solaire et a globalement une température du sol plus élevée.
- Cet effet peut-être compensé par une forte nébulosité ; ainsi, une pente bien orientée mais rarement ensoleillée aura une température du sol plus basse qu'une pente orientée nord, très ensoleillée.
- Un effet moindre est dû au type et à la hauteur de végétation : les arbres constituent une meilleure barrière au rayonnement solaire que le gazon
- La rugosité de la surface du sol : mélange de l'air, conduisant à un meilleur équilibre entre la température de surface et la température du sol.

Sur la base de ces observations, Signorelli et Kohl (2002) a établi une carte de la température moyenne du sol pour la Suisse, à partir de la carte existante des températures moyennes de surface. Selon leurs conclusions, cette carte des températures du sol donne un bon ordre de grandeur, mais devrait être affinée pour des études locales.

3. CONSÉQUENCES POUR LE DIMENSIONNEMENT DE SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES

3.1 DIMENSIONNEMENT D'UNE SGV

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

1. Petite installation avec une seule sonde, d'une puissance maximale de 30 kW, utilisée en mode chauffage uniquement et pour une durée d'utilisation de 2400 h/an au maximum. Dans ce cas, le calcul est rapidement effectué en divisant la puissance de chauffage (W) par la puissance d'extraction spécifique (W/m) de la roche (donnée dans les tables des normes).
2. Installation moyenne, comprenant une ou deux sondes, d'une puissance maximale de 30 kW, mais prévue pour une durée d'utilisation supérieure à 2400 h/an. Il existe un diagramme, basé sur les paramètres techniques de l'installation : besoin en chaleur (Q_H , MWh/an), puissance de chauffage (kW), coefficient α dépendant de Q_H , du facteur de performance annuel et de l'énergie nécessaire pour les consommations auxiliaires. Ainsi que sur les paramètres du milieu : altitude de la sonde et conductivité thermique (λ) de la roche (Figure 4). La longueur ainsi calculée doit être rajoutée après 40 mètres de profondeur, pour limiter l'influence des variations de température de surface.

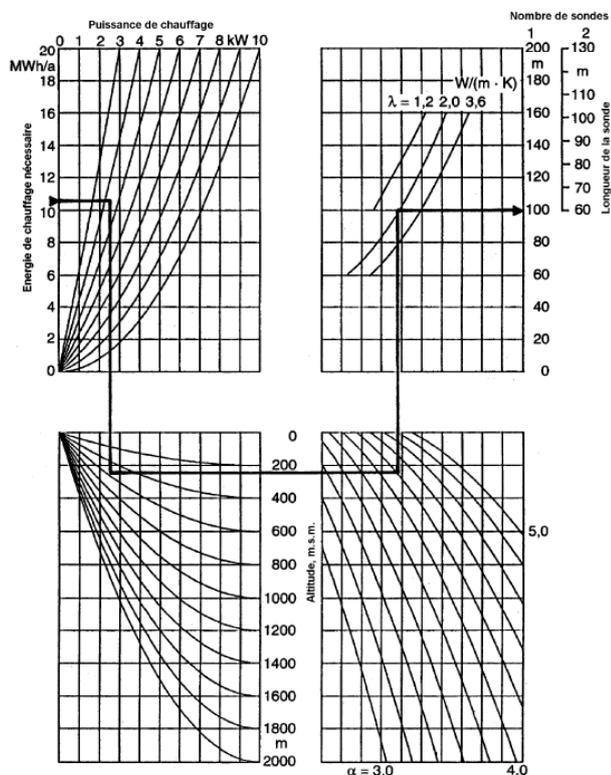


Figure 4 : nomogramme pour le dimensionnement de sondes géothermiques verticales (VDI, 2001)

3. Pour toutes les installations plus grandes (puissance maximale supérieure à 30 kW) ou pour des champs de sondes, une étude et un calcul spécifique doivent être réalisés.

On remarque que dans les deux premiers cas, le dimensionnement se base sur la puissance d'extraction ou sur la conductivité thermique de la roche ; le dimensionnement prend implicitement en compte un flux géothermique de 87 mW/m², basé sur un gradient géothermique de 3°C/100m, donc largement surestimé par rapport à celui de 0.6°C/100m maximum observé en zone karstique non saturée. Ainsi, la longueur estimée de la sonde géothermique sera largement sous-estimée pour la puissance de chauffage nécessaire et l'installation risque de ne pas produire suffisamment de chaleur, voire de geler ou de tomber en panne pendant les premières années d'utilisation.

3.2 INFLUENCE DU MILIEU KARSTIQUE SUR LE DIMENSIONNEMENT D'UNE SGV

Selon ce qui a été décrit dans les chapitres précédents, trois cas peuvent se distinguer dans le milieu karstique :

1. Cas très défavorable : à proximité d'une zone d'infiltration d'eau ou de drainage. Dans ce cas, toute la chaleur est absorbée par le flux d'eau ; le gradient thermique observé est presque nul voire parfois inversé (Šafanda et al. 2005). Cependant, ces zones sont facilement reconnaissables géomorphologiquement par la présence de dolines ou d'une vallée sèche.
2. Cas moyen : au centre du bassin versant dans le massif rocheux sain. Cependant, il est important que le massif ne soit pas traversé par un conduit qui emporterait la chaleur, car on se retrouverait alors dans le cas n°1. Dans ce deuxième cas, l'implantation d'une SGV est possible en tenant compte du faible gradient thermique. La sonde devra être prévue plus longue que si elle était implantée dans un autre type d'environnement.
3. Cas favorable : en amont d'une source karstique ; l'eau draine toute la chaleur du bassin versant pour l'amener à l'exutoire et emporte rapidement le froid produit par l'installation. En période de basses eaux (donc principalement en hiver où les besoins de chauffage sont les plus importants), les débits de la source peuvent être trop faibles pour absorber l'entier du flux géothermique et créer une barrière complète. Dans ce cas, le flux thermique et la chaleur extraite par la sonde peuvent être plus importants.

Des installations plus importantes avec puissance de chauffage plus élevée peuvent être également implantées dans cette zone favorable, sous réserve d'une étude locale approfondie. Badino (2005) a démontré qu'il existe un débit idéal pour lequel le flux géothermique parvient à chauffer l'eau sans être dilué

dans un trop grand volume : $Q_{id} = \sqrt{\frac{T''}{T_0}} * Q_c$ [kg/s]

où T'' serait la température normale dans un massif rocheux sans conduit, T₀ la température moyenne à la surface et Q_c le débit critique décrit au § 2.1.

3.3 DONNÉES MANQUANTES POUR LA RÉALISATION D'UNE CARTE DES ZONES D'IMPLANTATION DES SGV

Les particularités discutées dans les chapitres précédents permettent de déterminer les données nécessaires à l'établissement d'une cartographie pour l'implantation de SGV en milieu karstique. L'étude devra se baser sur :

- une synthèse des données spéléologiques de la région : cartographie des conduits non saturés et des conduits saturés, situation des exutoires, mesures des débits spécifiques, délimitation des zones de recharge ;
- une synthèse des données techniques existantes pour des SGV déjà implantées : lithologies traversées, éventuellement conduits rencontrés, valeur de conductivité thermique moyenne de la roche, puissance de chauffage obtenue en fonction de la longueur de la SGV implantée ;
- une estimation de la température du sol au niveau régional, soit de façon plus précise que la carte des températures du sol de la Suisse.

Un modèle de dimensionnement des SGV tenant compte du gradient géothermique du karst, en plus des autres paramètres habituels (données techniques de l'installation, conductivité thermique de la roche, altitude) devra être mis au point ; un nomogramme semblable à celui des directives VDI, mais spécifique au milieu karstique devra également être réalisé à l'intention des installateurs qui dimensionnent les SGV.

En plus de ces informations géothermiques, il sera indispensable de tenir compte d'autres aspects de la législation en vigueur, notamment concernant la présence de zones de protection des eaux souterraines, parfois très étendues en milieu karstique (interdiction d'installation en zone de protection S1 et S2, restriction de profondeur en zone de protection S3 et en secteur A_U) ou la présence de glissement de terrain ou de sites contaminés (interdiction d'installation).

Le zone cartographiée pourra par conséquent être séparée en au moins quatre zones : 1) favorable pour l'implantation de grandes installations (sous réserve d'une étude locale plus précise) ; 2) normale, où l'implantation de SGV de petite taille est réalisable en tenant compte d'un dimensionnement correct pour un environnement karstique ; 3) non recommandée ; 4) interdite.

4. CONCLUSION

Il a été montré plus haut que le gradient géothermique en milieu karstique est au minimum six fois plus faible que le gradient géothermique normal moyen en Suisse (3°C/100m). Ceci est dû à l'advection de chaleur liée à la circulation d'eau dans la zone saturée du karst, les débits d'eau étant suffisamment grands pour absorber la totalité du flux géothermique. Ce phénomène conduit à un sous dimensionnement des SGV, impliquant une diminution d'efficacité voire une panne des systèmes de chauffage implantés en milieu calcaire. D'un autre côté, toute la chaleur prélevée par l'eau sur la totalité du bassin versant est acheminée jusqu'à la source, qui constitue par conséquent un réservoir de chaleur presque inépuisable et renouvelé en continu. Le milieu karstique a donc un potentiel géothermique important, mais qui peut être difficile à exploiter en raison de la localisation de certaines grandes sources.

Ainsi, une étude locale tenant compte des particularités géothermiques du karst, mais également d'autres aspects légaux (protection des eaux souterraines et glissement de terrain notamment) permettra de dimensionner les SGV de manière sûre, encourageant ainsi les propriétaires à utiliser ce système de chauffage propre, mais permettra également de délimiter les zones favorables pour l'implantation de systèmes géothermiques de plus grande puissance. Cette étude approfondie est nécessaire afin d'exploiter de manière efficace et durable les ressources géothermiques en milieu karstique.

5. BIBLIOGRAPHIE

5.1 REFERENCES UTILISEES

BADINO, G. 2005. Underground drainage systems and geothermal flux. *Acta Carsologica*, 34, 2 : 277-316.

BENDERITTER Y. & ROY B. 1993. Flow characterization through heat transfer evidence in a carbonate fractured medium : first approach. *Water resources research*, 29, 11 : 3741-3747.

JEANNIN P.-Y. 1990. Températures dans la zone vadose du karst. *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*, 9 : 89-102.

JEANNIN P.-Y., LIEDL R. & SAUTER M. 1997. Some concepts about heat transfer in karstic systems. *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, 1997, Switzerland*, 1 : 195-198.

LUETSCHER M. & JEANNIN P.-Y. 2004. Temperature distribution in karst systems : the role of air and water fluxes. *Terra Nova*, 16 : 344-350.

MATHEY B. 1974. Gradient géothermique et hydraulique souterraine dans un aquifère karstique (Bassin de la source de l'Areuse/NE). *Bulletin de la société neuchâteloise des sciences naturelles*, 97 : 301-314.

ŠAFANDA J., HEIDINGER P., WILHELM H. & ERMAK V. 2005. Fluid convection observed from temperature logs in the karst formation of the Yucatán Peninsula, Mexico. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2 : 326-331.

SIA, Dokumentation D0136, 1996. Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. SIA, Zürich. 142 pp.

SIGNORELLI S. & KOHL, T. 2002. Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Global and Planetary Change*, 40 : 267-284.

SIGNORELLI, S. 2004 : Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems. Thèse de doctorat, EPFZ, 159 pp.

VDI Guideline 4640 Part 2, 2001. Thermal Use of the underground – Ground source heat pump systems. Beuth Verlag GmbH, Berlin. 43 pp.

5.2 REFERENCES NON UTILISEES

BASSETTI S., ROHNER E., SIGNORELLI S., MATHEY B. 2006 : Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden, 65 pp.

REUSS M. & SANNER B. 2001. Planung und Auslegung von Erdwärmesondenanlagen : Basis einer nachhaltigen Erdwärmenutzung, VDI-Richtlinie 4640 und Berechnungsverfahren. In : *Erdwärme zum Heizen und Kühlen*.

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Potentiale, Möglichkeiten und Techniken der Oberflächennahen Geothermie. Kleines Handbuch der Geothermie, Band 1 : 33-50.

RIEBEN C. & ADATTE P. 1996 : Prospection et catalogue des sites pour sondes géothermiques dans le canton du Jura, 40 pp.

VDI Guideline 4640 Part 1, 2001. Thermal Use of the underground – Fundamentals, approvals, environmental aspects. Beuth Verlag GmbH, Berlin. 31 pp.

ANNEXES CHAPITRE 3 :
GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES

Annexe 3.1

Description géologique des secteurs retenus

Vallée du Locle - La Chaux-de-Fonds 181 ha

Sources des renseignements

Jules Favre, 1911, description géologique des environs du Locle et de La Chaux-de-Fonds ;

Atlas géologique de la Suisse, 1 : 25'000, feuille 1144, Val-de-Ruz ;

Archives du bureau Y.-A. Brechbühler

Description

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

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

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

Les Ponts-de-Martel 3.4 ha

Sources

Bernard Matthey, com. orale

Description

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

Val-de-Travers 35 ha

Sources

Archives du bureau Y.-A. Brechbühler

Communication du bureau GVH La Chaux-de-Fonds SA, usine Etel SA, Môtiers

Description

Le Val-de-Travers a été occupé par un lac périglaciaire formé derrière un barrage situé près de Noiraigue. Le fond du Val de Travers est comblé sur plusieurs mètres voire dizaines de mètres d'alluvions et de dépôts quaternaires lacustres. La granulométrie des dépôts diminue de l'amont de

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel

la vallée (région de Fleurier riches en graviers) en direction de Noiraigue. Dès Môtiers, les niveaux fins, limoneux et argileux prédominent. La profondeur des dépôts peut localement excéder 50 m.

Val-de-Ruz 11 ha

Sources

Carte géologique Atlas de la Suisse, 1 : 25'000, feuille 1144, Val-de-Ruz

Archives du bureau Y.-A. Brechbühler

Description

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

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

Rives du Lac de Neuchâtel 49 ha

Sources

Carte géologique Atlas de la Suisse, 1 : 25'000, feuille 1144, Val-de-Ruz

Carte géologique Atlas de la Suisse, 1 : 25'000, feuille 1164, Neuchâtel

Diverses connaissances de communications orales

Description

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

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

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

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

Plaine de la Thielle 173 ha

Sources

Carte géologique Atlas de la Suisse, 1 : 25'000, feuille 1144, Val-de-Ruz

Carte géologique Atlas de la Suisse, 1 : 25'000, feuille 1, Bienne

Archives du bureau Y.-A. Brechbühler

Description

Entre Thielle et Le Landeron, les dépôts lacustres et palustres peuvent atteindre plus de 10 m d'épaisseur. Ils sont composés de niveaux de tourbes superficiels de plusieurs mètres reposant sur des limons lacustres. Les niveaux piézométriques sont souvent définis par les systèmes de drainage mis en place, notamment lors des 2 corrections des eaux du Jura.

Annexe 3.2

**Surfaces recensées (en blanc et gras: surfaces
potentielles)**

Région A – La Chaux-de-Fonds – Le Locle

zone LCF-Ouest (Plan 2)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_2_1	154909	ZDF
1_2_2	143348	ZDF
1_2_3	277997	ZDF
1_2_4	33336	ZDF
1_2_5	82735	ZDF
1_2_6	10750	ZI
1_2_7	5407	ZAE
1_2_8	23502	ZMD
1_2_9	13140	ZMD
1_2_10	17714	ZMD
1_2_11	23518	ZMD
1_2_12	148486	ZMD
1_2_13	78005	ZMD
1_2_14	82126	ZUP
1_2_15	20098	ZUP
1_2_16	13570	ZUP
1_2_17	25755	ZUP
1_2_18	40298	ZUP
1_2_19	4305	ZUP
1_2_20	56609	ZUP
1_2_21	19535	ZUP
1_2_22	6636	ZUP
1_2_23	6986	ZUP
1_2_24	15968	ZUP
1_2_25	2730	ZUP
1_2_26	15495	ZUP
1_2_27	7322	ZDF
1_2_28	281257	ZM
Total:	1611538	

zone LCF-Sud (Plan 4)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_4_1	65918	ZMD
1_4_2	3481	ZMD
1_4_3	95482	ZI
Total:	164881	

zone LCF-Est (Plan 3)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_3_1	260668	ZDF
1_3_2	15148	ZDF
1_3_3	140801	ZDF
1_3_4	130145	ZMD
1_3_5	285706	ZMD
1_3_6	9478	ZUP
1_3_7	3053	ZDF
1_3_8	27233	ZUP
1_3_9	2837	ZUP
1_3_10	1934	ZUP
1_3_11	9056	ZUP
1_3_12	26457	ZUP
1_3_13	21431	ZMD
1_3_14	16979	ZMD
1_3_15	48109	ZMD
1_3_16	31640	ZMD
1_3_17	228900	ZUP
1_3_18	17239	ZUP
1_3_19	55059	ZUP
1_3_20	119935	ZUP
1_3_21	32607	ZUP
1_3_22	11860	ZAE
1_3_23	114872	ZI
1_3_24	3430	ZUP
1_3_25	3105	ZUP
1_3_26	6038	ZUP
1_3_27	2457	ZUP
1_3_28	2650	ZUP
1_3_29	3658	ZUP
1_3_30	1099	ZUP
1_3_31	1701	ZUP
1_3_32	1085	ZUP
1_3_33	2247	ZMD
1_3_34	1638	ZUP
Total:	1640256	

zone LCF-Sud (Plan 6)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_6_1	16227	ZAE
Total:	16227	

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

zone Le Locle (Plan 5)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_5_1	90915	ZI
1_5_2	44363	ZDF
1_5_3	5670	ZDF
1_5_4	2630	ZUP
1_5_5	5628	ZI
1_5_6	30336	ZMD
1_5_7	75076	ZMD
1_5_8	27624	ZMD
1_5_9	17130	ZMD
1_5_10	10382	ZMD
1_5_11	10977	ZMD
1_5_12	17823	ZDF
1_5_13	33333	ZDF
1_5_14	4375	ZDF
1_5_15	69826	ZAE
1_5_16	100376	ZDF
1_5_17	36675	ZMD
1_5_18	107275	ZAE
1_5_19	67498	ZI
1_5_20	2086	ZDF
1_5_21	20105	ZMD
1_5_22	3500	ZMD
1_5_23	8922	ZMD
1_5_24	5082	ZMD
1_5_25	27725	ZMD
1_5_26	73014	ZUP
1_5_27	9066	ZUP
1_5_28	22555	ZUP
1_5_29	4578	ZUP
1_5_30	6825	ZUP
1_5_31	12664	ZUP
1_5_32	10305	ZUP
1_5_33	5215	ZUP
Total:	969555	

zone Les Planchettes (Plan 8)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_8_1	17764	ZMD
1_8_2	5691	ZUP
1_8_3	4183	ZUP
Total:	27638	

zone Les Brenets (Plan 7)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_7_1	21369	ZI
1_7_2	8803	ZI
1_7_3	29083	ZI
1_7_4	2639	ZI
1_7_5	18380	ZMD
1_7_6	1876	ZMD
1_7_7	3157	ZMD
1_7_8	3115	ZMD
1_7_9	2804	ZMD
1_7_10	19542	ZDF
1_7_11	20728	ZDF
1_7_12	11617	ZDF
1_7_13	5495	ZDF
1_7_14	468	ZMD
1_7_15	16020	ZUP
1_7_16	1061	ZUP
1_7_17	931	ZUP
1_7_17	1106	ZUP
Total:	168195	

zone Eplatures Crêt du Locle (Plan 1)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
1_1_1	340544	ZI
1_1_2	68558	ZI
1_1_3	162325	ZI
1_1_4	204272	ZI
1_1_5	129573	ZI
1_1_6	54465	ZDF
1_1_7	1095	ZDF
1_1_9	4414	ZMD
1_1_11	253047	ZUP
1_1_12	18334	ZUP
1_1_13	16269	ZUP
Total:	1252896	

Région B – Littoral – Le Landeron

zone Fresens-Sauge-St Aubin (Plan 1)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_1_1	9650	ZMD
2_1_2	11533	ZMD
2_1_3	7469	ZMD
2_1_4	43123	ZMD
2_1_5	23143	ZMD
2_1_6	6955	ZMD
2_1_7	2156	ZMD
2_1_8	9444	ZMD
2_1_9	2972	ZMD
2_1_10	5681	ZDF
2_1_11	8807	ZDF
2_1_12	49668	ZDF
2_1_13	18061	ZUP
2_1_14	28821	ZUP
2_1_15	5695	ZUP
2_1_16	13892	ZUP
2_1_17	8950	ZUP
2_1_18	15373	ZUP
2_1_19	3091	ZI
2_1_20	17186	ZUP
2_1_21	8233	ZUP
2_1_22	54967	ZM
2_1_23	7662	ZM
2_1_24	5303	ZM
2_1_25	4553.7774	ZMD
2_1_26	7133	ZAE
Total:	379521	

zone Gorgier-Chez le Bart (Plan 2)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_2_1	6752	ZM
2_2_2	30532	ZI
2_2_3	8800	ZMD
2_2_4	16668	ZI
2_2_5	17613	ZI
2_2_6	6129	ZMD
2_2_7	8600	ZDF
2_2_8	14004	ZMD
2_2_9	4543	ZI
2_2_10	5408	ZMD
2_2_11	18842	ZDF
2_2_12	31561	ZMD
2_2_13	6143	ZMD
2_2_14	10116	ZUP
Total:	185711	

zone Bevaix (Plan 3)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_3_1	30847	ZM
2_3_2	5611	ZMD
2_3_3	62300	ZI
2_3_4	47956	ZMD
2_3_5	15086	ZMD
2_3_6	2898	ZAE
2_3_7	17337	ZUP
2_3_8	38807	ZMD
2_3_9	7224	ZAE
2_3_10	25699	ZMD
2_3_11	53592	ZDF
2_3_12	5359	ZMD
2_3_13	16588	ZI
2_3_14	5719	ZAE
2_3_15	5275	ZUP
2_3_16	5460	ZUP
Total:	345758	

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

zone Boudry-Cortailod (Plan 4)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_4_1	11918	ZI
2_4_2	59959	ZI
2_4_3	10536	ZI
2_4_4	54411	ZMD
2_4_5	21586	ZI
2_4_6	30679	ZI
2_4_7	39174	ZI
2_4_8	6990	ZUP
2_4_9	5219	ZMD
2_4_10	91667	ZDF
2_4_11	13794	ZMD
2_4_12	2125	ZUP
2_4_13	6766	ZUP
2_4_14	5635	ZC
2_4_15	9024	ZMD
2_4_16	6244	ZMD
2_4_17	10847	ZMD
2_4_18	149970	ZI
2_4_19	35478	ZMD
2_4_20	12254	ZDF
2_4_21	9577	ZDF
2_4_22	11057	ZI
2_4_23	17564	ZMD
2_4_24	16511	ZDF
2_4_25	7742	ZMD
2_4_26	6766	ZDF
2_4_27	28285	ZI
2_4_28	7434	ZMD
2_4_29	7798	ZUP
2_4_30	3455	ZUP
2_4_31	10560	ZDF
2_4_32	9363	ZMD
2_4_33	11246	ZDF
2_4_34	67817	ZDF
2_4_35	17526	ZDF
2_4_36	20242	ZMD
2_4_37	80785	ZI
2_4_38	26122	ZMD
2_4_39	14270	ZI
2_4_40	2958	ZUP
2_4_41	21407.3041	ZM
2_4_42	15253.9293	ZM
2_4_43	10980.1689	ZM
2_4_44	8327.0073	ZM
Total:	1017323	

zone Boudry-Bôle (Plan 5)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_5_1	4753	ZDF
2_5_2	15688	ZDF
2_5_3	18103	ZDF
2_5_4	10287	ZUP
2_5_5	4627	ZDF
2_5_6	43637	ZDF
2_5_7	17799	ZDF
2_5_8	7634	ZUP
2_5_9	2678	ZUP
2_5_10	165826	ZMD
2_5_11	15215	ZMD
2_5_12	1663	ZDF
2_5_13	25965	ZMD
2_5_14	6738	ZMD
2_5_15	1943	ZUP
2_5_16	1848	ZUP
2_5_17	6283	ZUP
2_5_18	26430	ZMD
Total:	377116	

zone Rochefort (Plan 6)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_6_1	4603	
2_6_2	1792	
2_6_3	898	
2_6_4	2594	
2_6_5	4052	
2_6_6	9934	
2_6_7	1707	
2_6_8	6704	
2_6_9	880	
Total:	33163	

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

zone Colombier (Plan 7)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_7_1	82920	ZI
2_7_2	37984	ZUP
2_7_3	2030	ZMD
2_7_4	19202	ZUP
2_7_5	85227	ZC
2_7_6	8782	ZMD
2_7_7	1866	ZMD
2_7_8	34771	ZUP
2_7_9	2443	ZMD
2_7_10	5114	ZDF
2_7_11	4984	ZDF
2_7_12	12125	ZAE
2_7_13	25667	ZI
2_7_14	7350	ZI
Total:	330466	

zone Auvernier (Plan 8)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_8_1	14330	ZMD
2_8_2	9871	ZMD
2_8_3	6381	ZMD
2_8_4	13633	ZMD
2_8_5	1106	ZUP
2_8_6	1649	ZUP
2_8_7	26367	ZUP
2_8_8	7004	ZUP
2_8_9	648	ZMD
Total:	80988	

zone Corcelle-Cormond (Plan 9)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_9_1	100152	ZI
2_9_2	49945	ZDF
2_9_3	18100	ZMD
2_9_4	6153	ZMD
2_9_5	11526	ZMD
2_9_6	32832	ZMD
2_9_7	15163	ZMD
2_9_8	45786	ZMD
2_9_9	106736	ZM
2_9_10	4043	ZUP
2_9_11	25580	ZUP
2_9_12	13511	ZUP

zone Peseux (Plan 10)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_10_1	43301	ZMD
2_10_2	79976	ZMD
2_10_3	4186	ZMD
2_10_4	1803	ZMD
2_10_5	1908	ZMD
2_10_6	2636	ZMD
2_10_7	20200	ZMD
2_10_8	4816	ZMD
2_10_9	236114	ZMD
2_10_10	9584	ZMD
2_10_11	19850	ZMD
2_10_12	10627	ZMD
2_10_13	5922	ZMD
2_10_14	63819	ZMD
2_10_15	43844	ZMD
2_10_16	21152	ZDF
2_10_17	75472	ZDF
2_10_18	13364	ZDF
2_10_19	10077	ZDF
2_10_20	6363	ZDF
2_10_21	34428	ZDF
2_10_22	36045	ZDF
2_10_23	37351	ZDF
2_10_24	6706	ZDF
2_10_25	25643	ZDF
2_10_26	25223	ZDF
2_10_27	7966	ZI
2_10_28	19710	ZI
2_10_29	24557	ZC
2_10_30	1901	ZAE
2_10_31	51208	ZAE
2_10_32	9293	ZAE
2_10_33	18730	ZAE
2_10_34	1334	ZUP
2_10_35	8271	ZUP
2_10_36	3556	ZUP
2_10_37	3667	ZUP
2_10_38	11698	ZUP
2_10_39	4994	ZUP
2_10_40	12452	ZUP
2_10_41	16449	ZM
2_10_42	15609	ZM
2_10_43	108413	ZM
2_10_44	15648	ZM
2_10_45	11488	ZM

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

			2_10_46	70886	ZM
Total:	429525		2_10_47	29035	ZUP
			2_10_48	20149	ZUP
			2_10_49	13465	ZUP
			Total:	1320888	

zone Serrières/Neuchâtel (Plan 11)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_11_1	45095	ZAE
2_11_2	5978	ZAE
2_11_3	133240	ZMD
2_11_4	2428	ZUP
2_11_5	4745	ZM
2_11_6	57991	ZMD
2_11_7	9728	ZM
2_11_8	45887	ZMD
2_11_9	52216	ZM
2_11_10	6778	ZDF
2_11_11	5423	ZM
2_11_12	2358	ZM
2_11_13	4507	ZUP
2_11_14	23906	ZDF
2_11_15	2683	ZDF
2_11_16	4200	ZUP
2_11_17	29429	ZM
2_11_18	12003	ZUP
2_11_19	17708	ZUP
2_11_20	11538	ZM
2_11_21	14224	ZM
2_11_22	2456	ZUP
2_11_23	59721	ZM
2_11_24	58992	ZM
2_11_25	25470	ZUP
2_11_26	11794	ZUP
2_11_27	10177	ZAE
2_11_28	3410	ZDM
2_11_29	66961	ZUP
2_11_30	2363	ZUP
2_11_31	12051	ZUP
2_11_32	7297	ZUP
2_11_33	8397	ZDM
2_11_34	1368	ZDF
2_11_35	10112	ZAE
2_11_36	8316	ZM

zone Monruz/Coudre (Plan 13)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_13_1	165926	ZUP
2_13_2	128458	ZM
2_13_3	90559	ZUP
2_13_4	36186	ZI
2_13_5	27521	ZUP
2_13_6	19217	ZMD
Total:	467867	

zone St-Blaise Marin (Plan 14)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_14_1	20474	ZUP
2_14_2	6087	ZUP
2_14_3	4876	ZUP
2_14_4	9845	ZUP
2_14_5	18072	ZMD
2_14_6	32632	ZI
2_14_7	12260	ZDF
2_14_8	25367	ZI
2_14_9	10677	ZI
2_14_10	13849	ZDF
2_14_11	16591	ZAE
2_14_12	9328	ZDF
2_14_13	1848	ZAE
2_14_14	22686	ZAE
2_14_15	38402	ZI
2_14_16	17603	ZMD
2_14_17	10347	ZMD
2_14_18	9741	ZAE
2_14_19	28317	ZDF
2_14_20	5570	ZDM
2_14_21	23581	ZDM
2_14_22	26716	ZDM
2_14_23	7162	ZDM
2_14_24	47451	ZDF
2_14_25	147634	ZAE

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

2_11_37	30243	ZMD			
Total:	811192		Total:	567115	
108725					

zone Cornaux-Wavre (Plan 16)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_16_1	53364	ZDF
2_16_2	22072	ZAE
2_16_3	33445	ZAE
2_16_4	25828	ZMD
2_16_5	34421	ZMD
2_16_6	68772	ZUP
2_16_7	11509	ZAE
2_16_8	83291	ZAE
2_16_9	1236781	ZI
2_16_10	8506	ZUP
Total:	1577989	

zone Cressier (Plan 17)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_17_1	23959	ZDF
2_17_2	9657	ZMD
2_17_3	39825	ZMD
2_17_4	248323	ZI
2_17_5	14834	ZUP
Total:	336598	

zone Landeron-Cressier (Plan 18)		
Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
2_18_1	8201	ZUP
2_18_2	17981	ZUP
2_18_3	3273	ZUP
2_18_4	13647	ZMD
2_18_5	4676	ZI
2_18_6	55293	ZI
2_18_7	14942	ZMD
2_18_8	5555	ZUP
2_18_9	79798	ZAE
2_18_10	67467	ZUP
2_18_11	26080	ZDF
2_18_12	85048	ZDF
2_18_13	9017	ZUP
2_18_14	15394	ZMD

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

2_18_15	16265	ZI
2_18_16	5418	ZDF
2_18_17	8502	ZUP
2_18_18	62073	ZMD
2_18_19	73466	ZMD
2_18_20	2951	ZUP
2_18_21	55667	ZM
2_18_22	3371	ZUP
Total:	634085	

Région C – Val-de-Ruz

Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
FO01	32675	ZAE
SV01	31036	ZSDIa
Total:	63712	

Fontaines
Savagnier

Région D – Val-de-Travers

Polygone n°:	Superficie [m2]	Désignation
CV01	153880	ZI
CV02	33049	ZM
MO01	64985	ZI+ZUP+ZMD
BO01	3119	ZI
BO02	32622	ZMD
NO01	46549	ZAE+ZM+ZUP
TR01	14953	ZI

Couvet
Couvet
Môtiers
Boveresse
Boveresse
Noiraigue
Travers

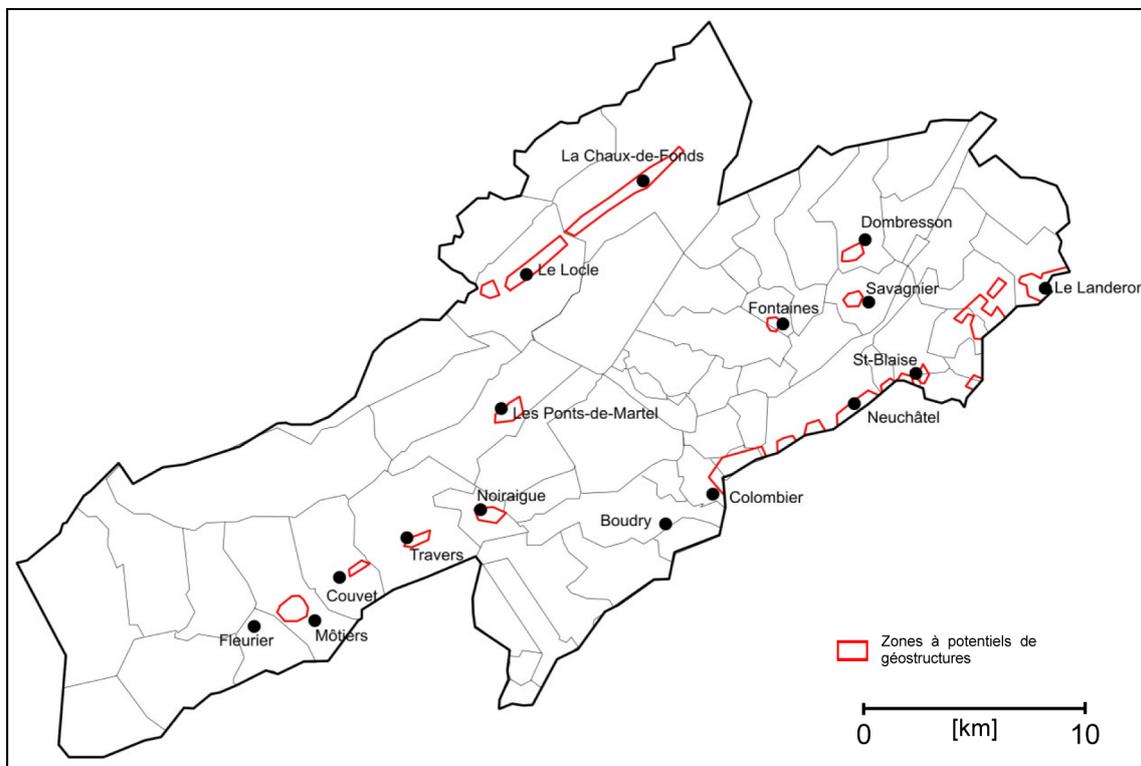
Région E – Val-des-Ponts

PM01	33921	ZART+ZUP+ZMD	Les Ponts-de-Martel
------	-------	--------------	---------------------

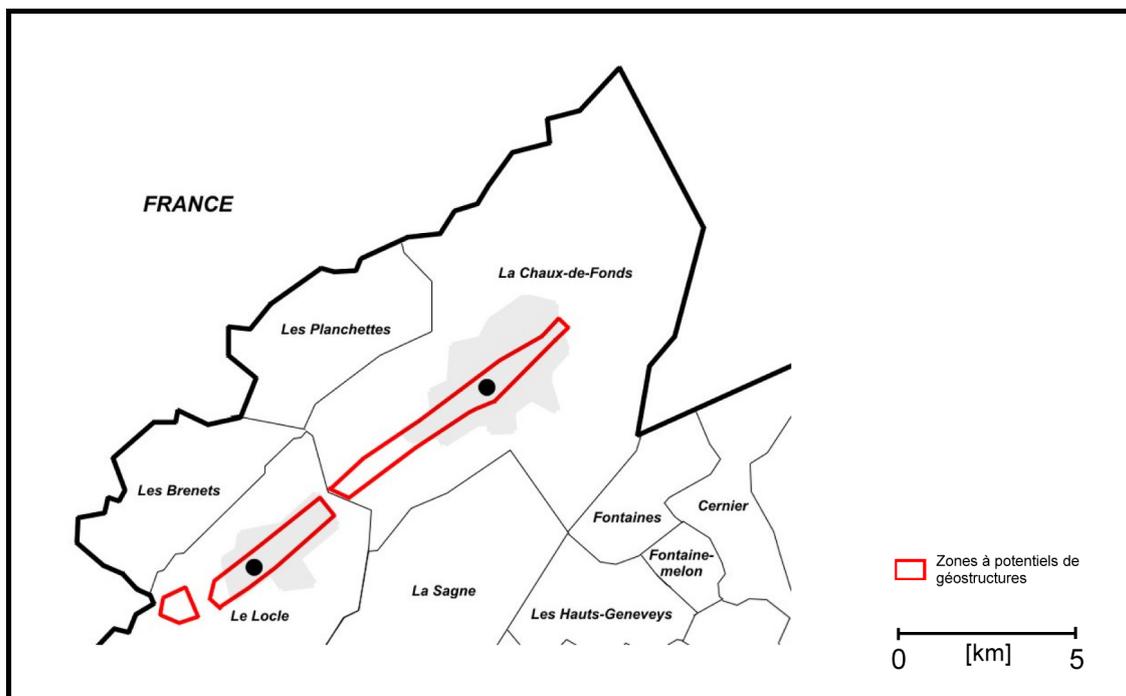
Annexe 3.3

Localisation des secteurs potentiels

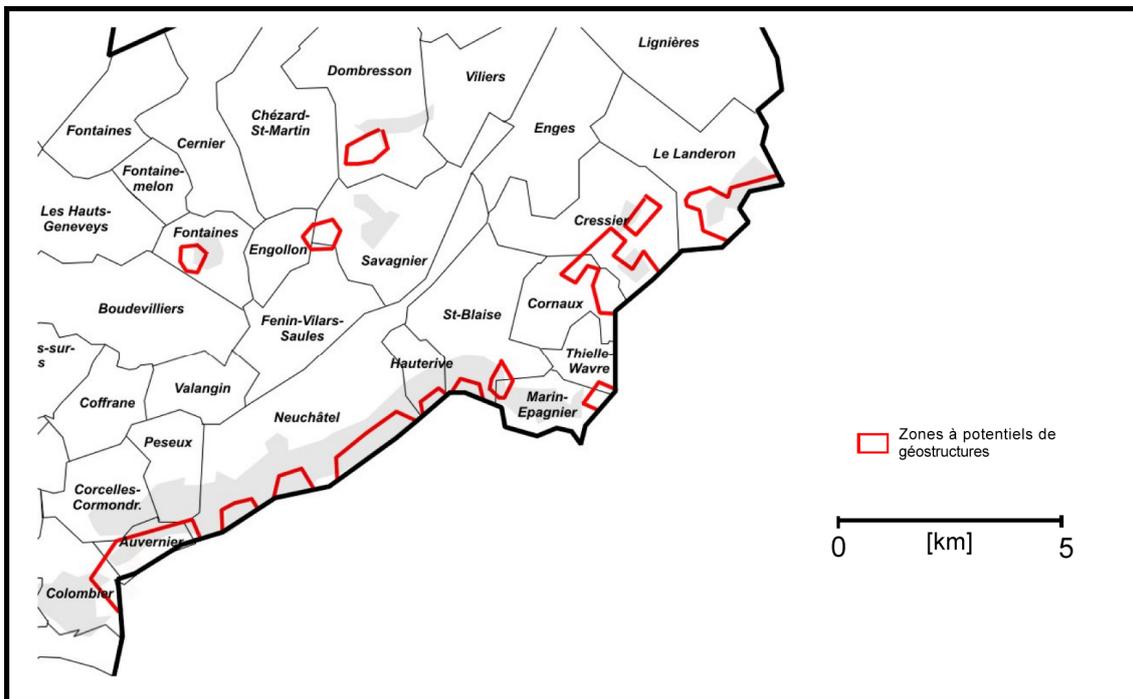
Répartition cantonale



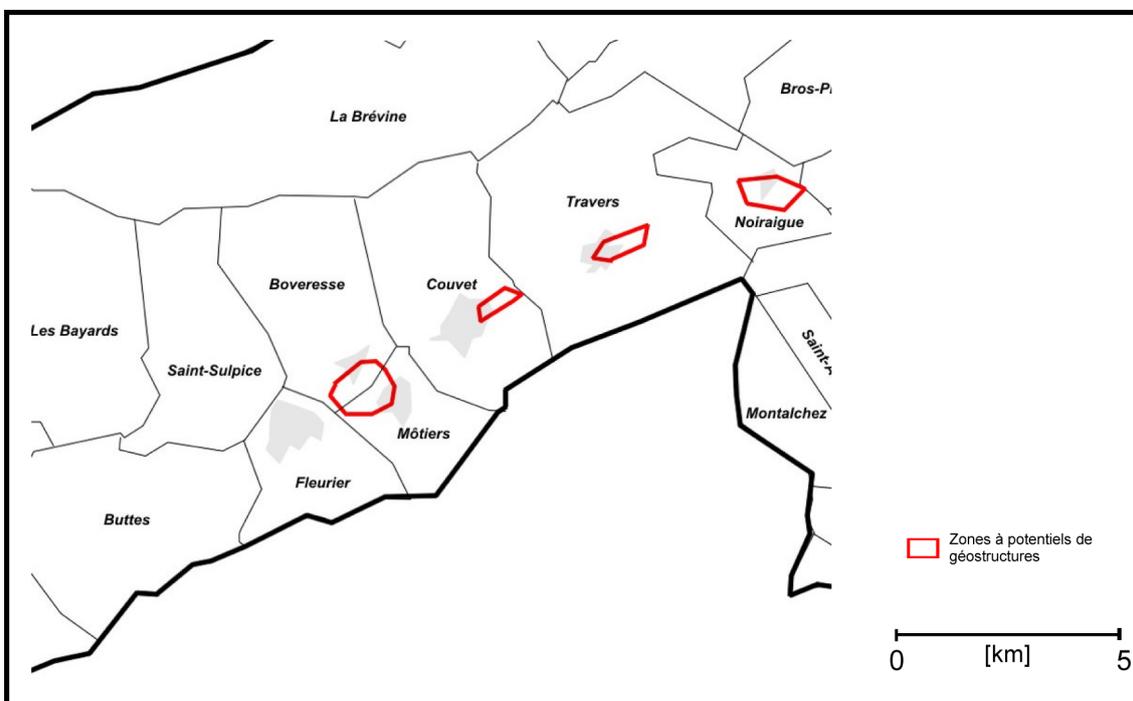
Répartition dans la région LCF-LL



Répartition dans la région NE-Val de Ruz-Landeron



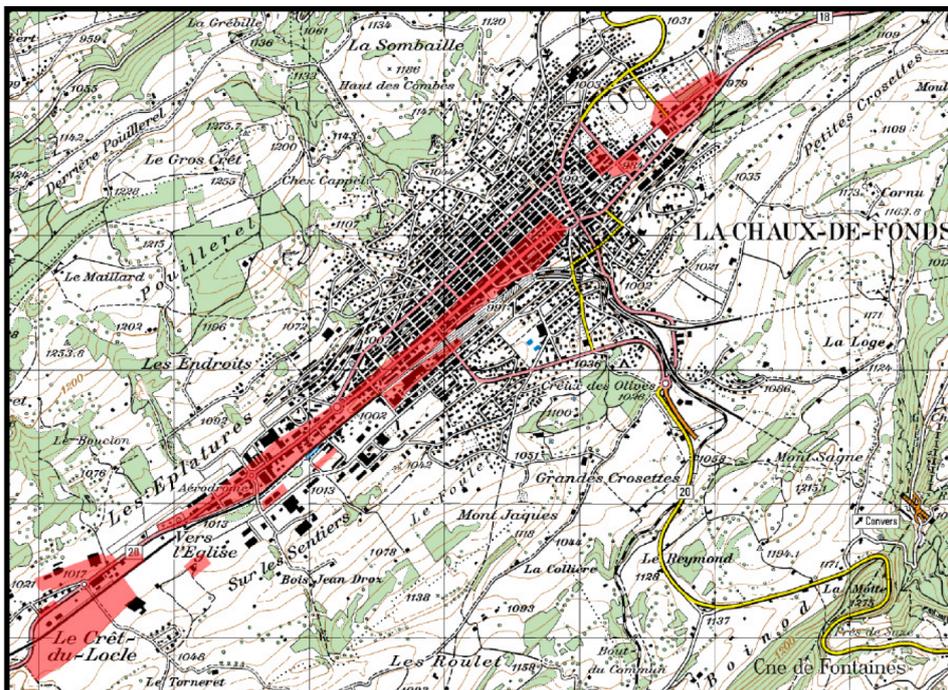
Répartition dans la région Val-de-Travers



Annexe 3.4

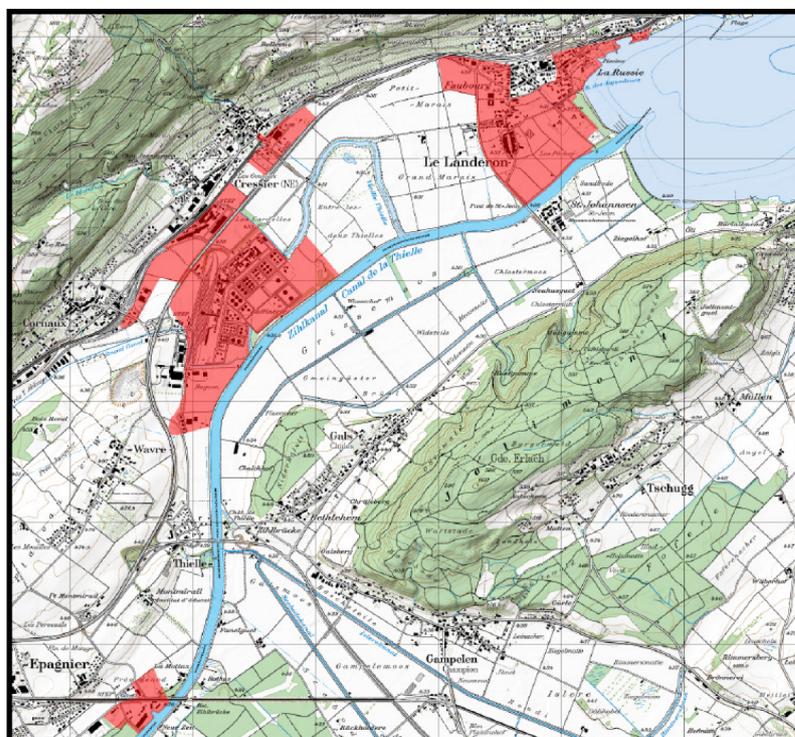
**Plans de situation des surfaces potentielles pour les
géostrucures énergétiques**

La Chaux-de-Fonds



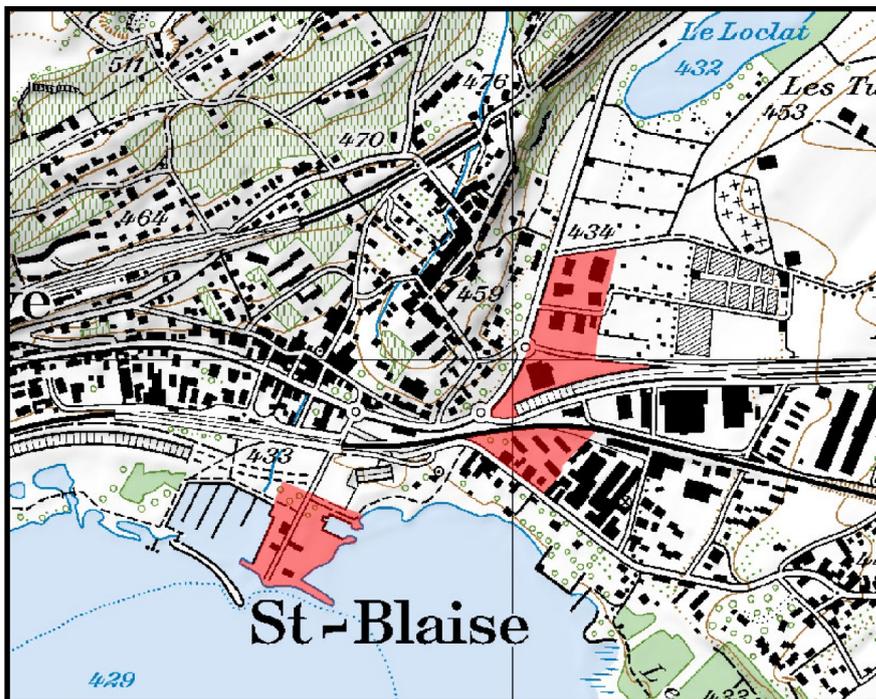
0 1000m

Le Landeron – Cornaux – Wavre



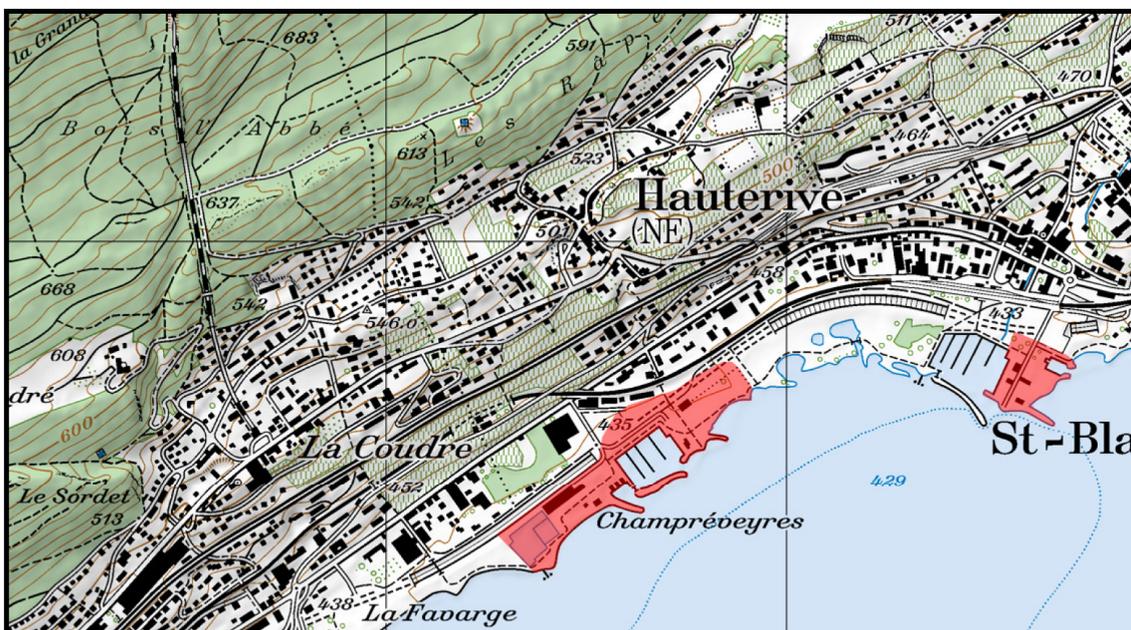
0 500m

Saint-Blaise



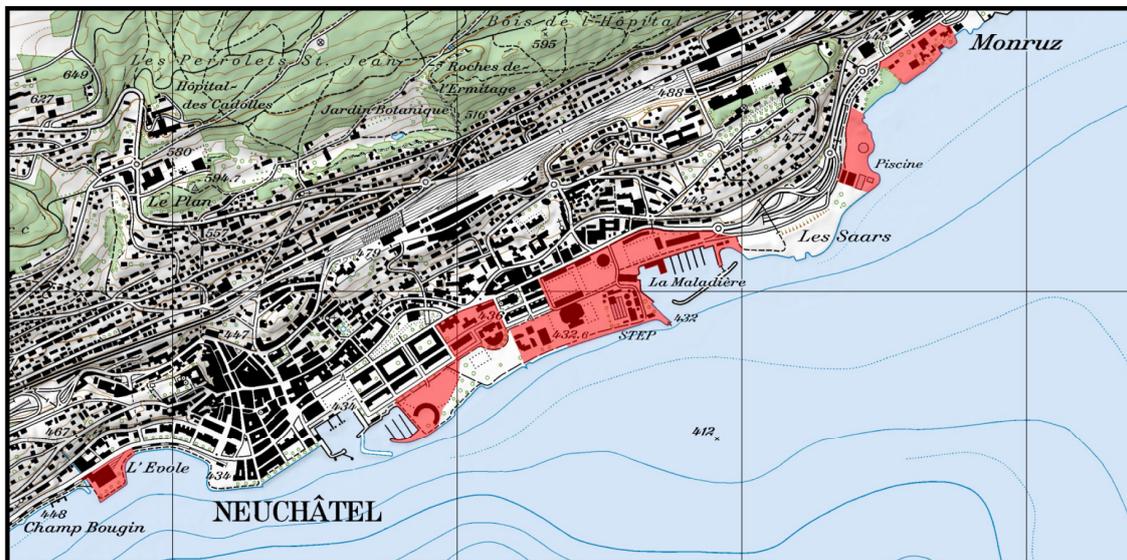
0 500m

Hauterive – La Coudre



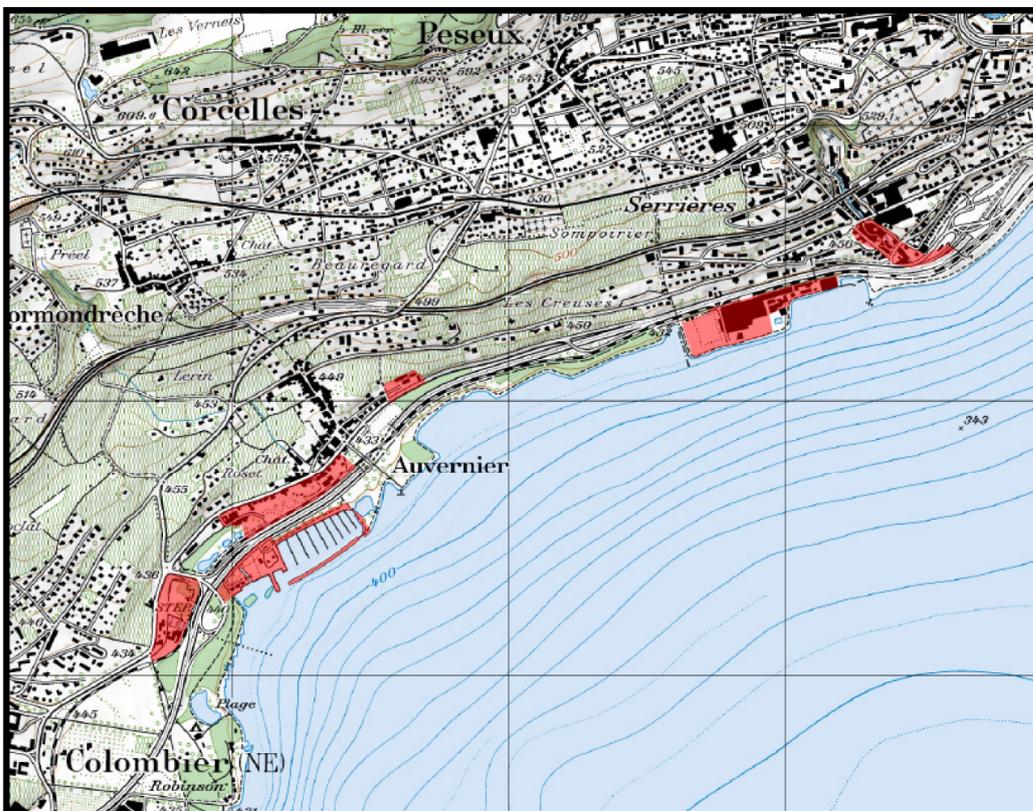
0 500m

Neuchâtel – Monruz



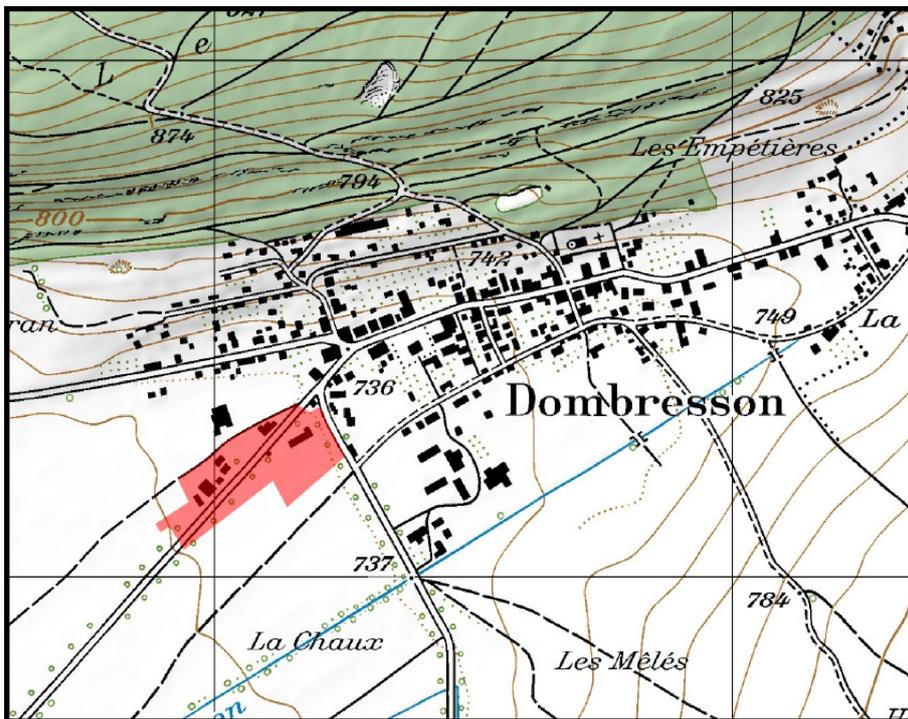
0 500m

Colombier – Auvernier – Serrière

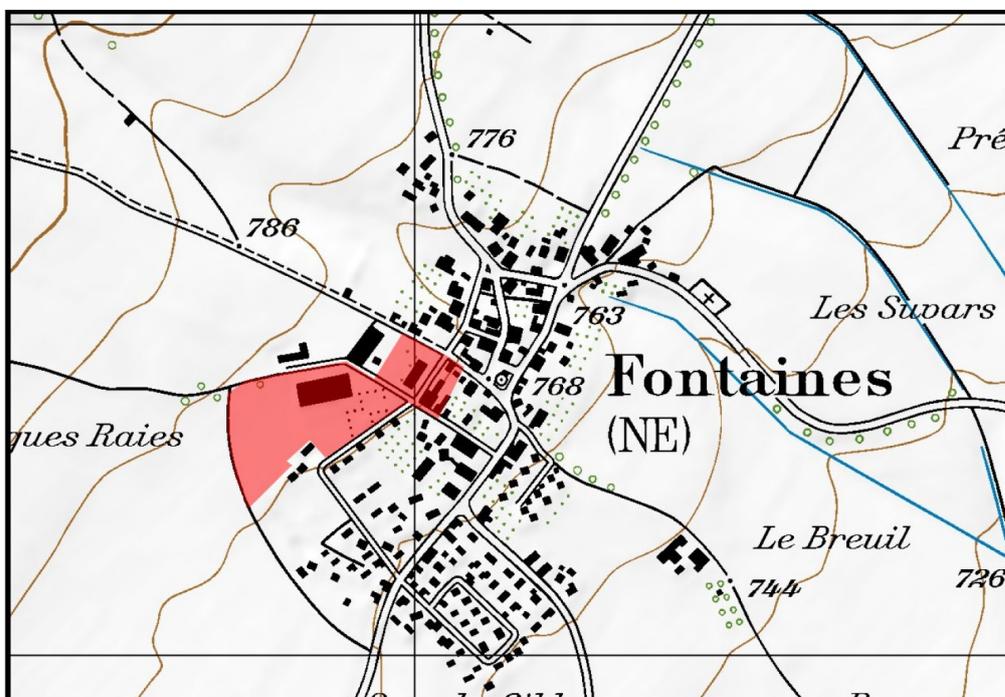


0 500m

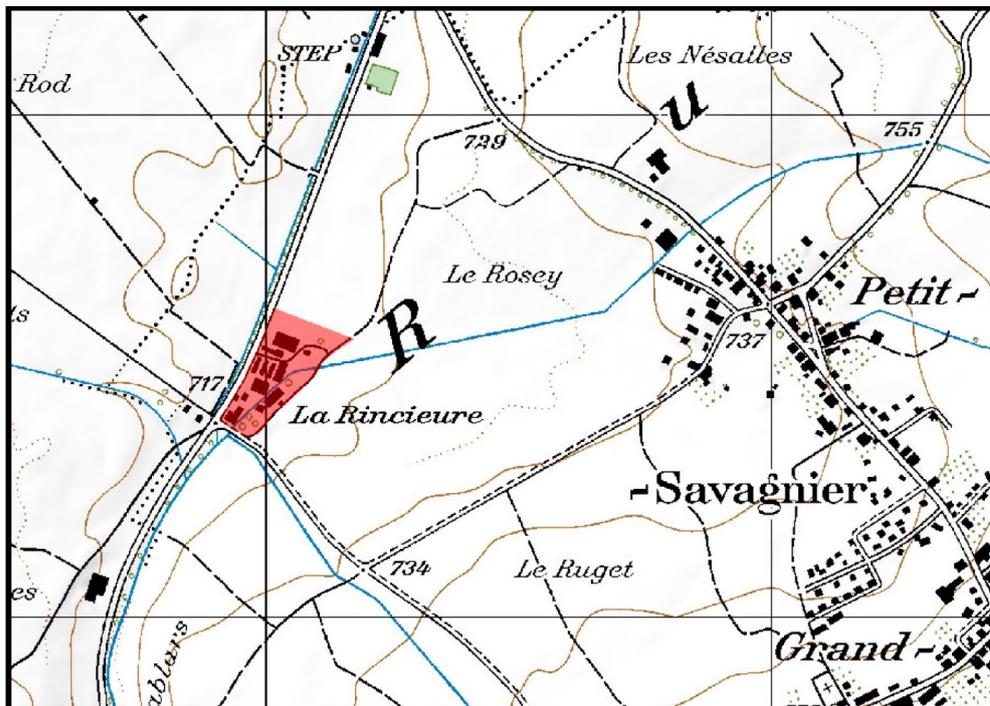
Dombresson



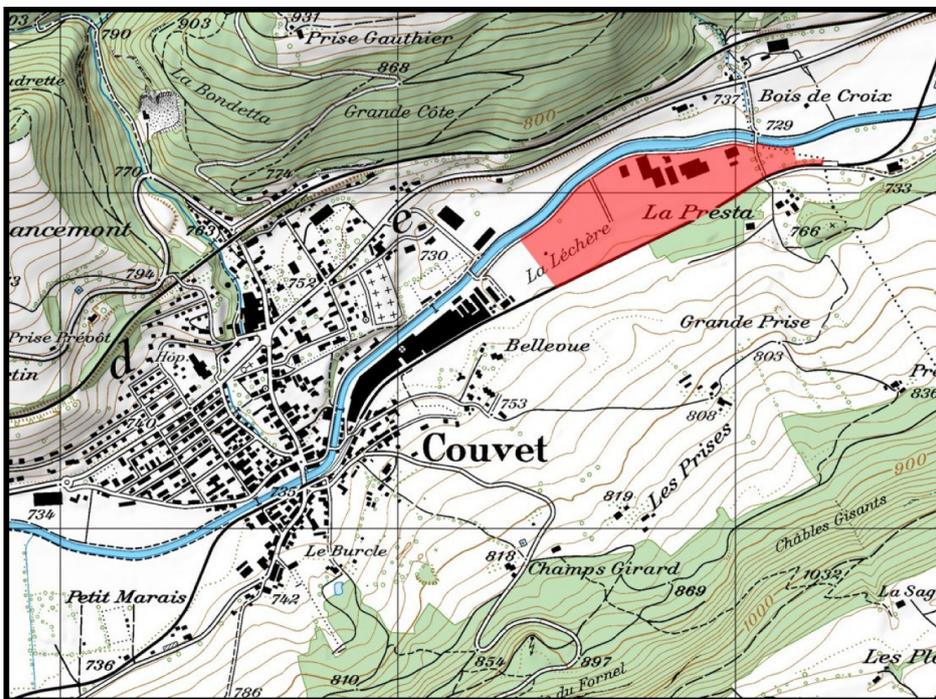
Fontaine



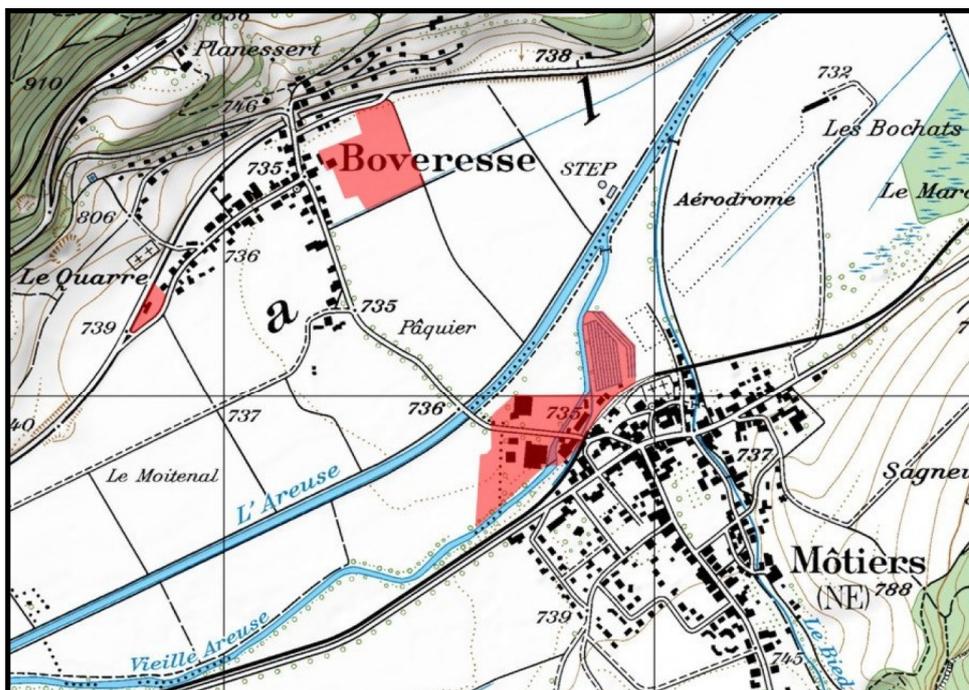
Savagnier



Couvet

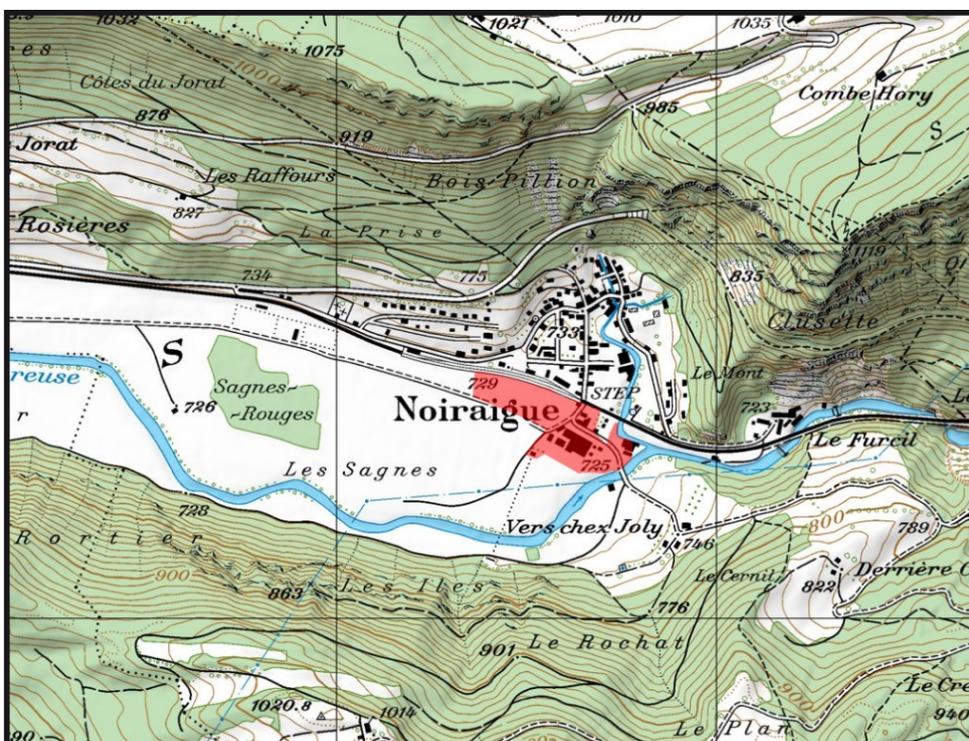


Môtier – Boveresse



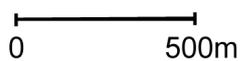
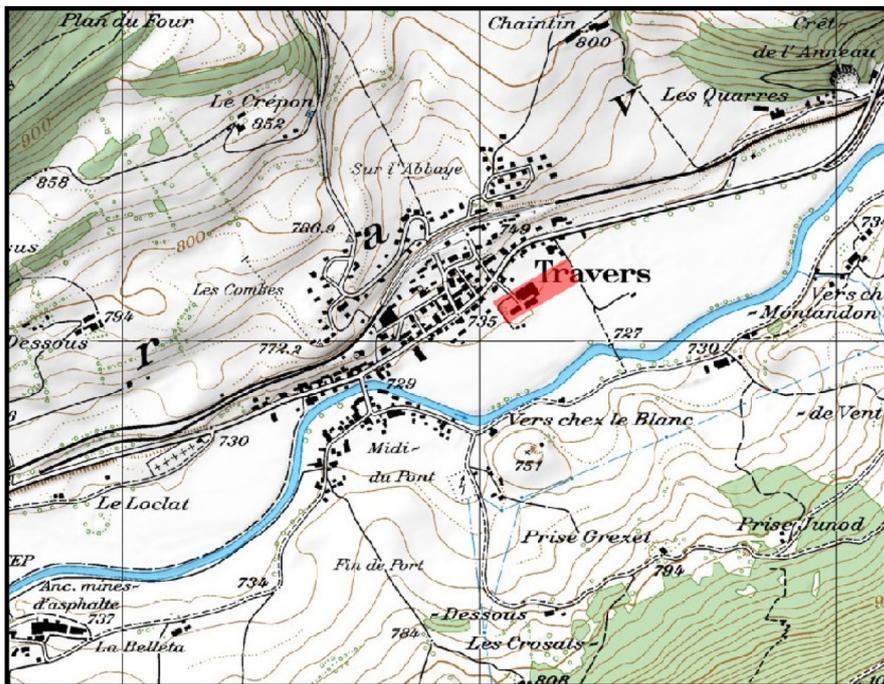
0 500m

Noiraigue

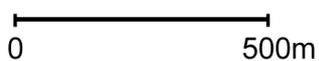
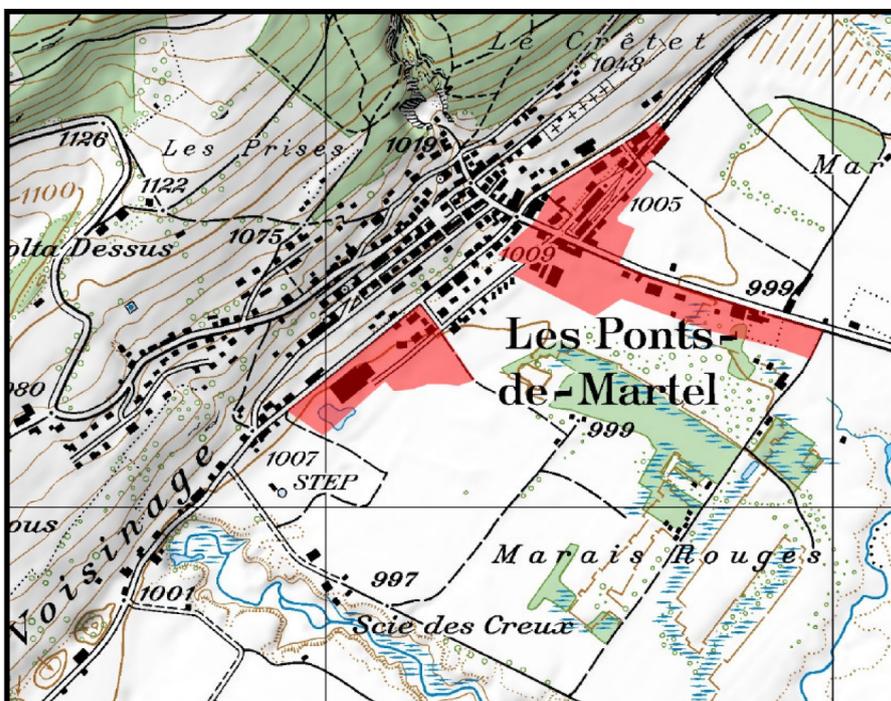


0 500m

Travers



Les Ponts-de-Martel



ANNEXES CHAPITRE 4 :
EXPLOITATION THERMIQUE DES NAPPES PHREATIQUES

Annexe 4.1

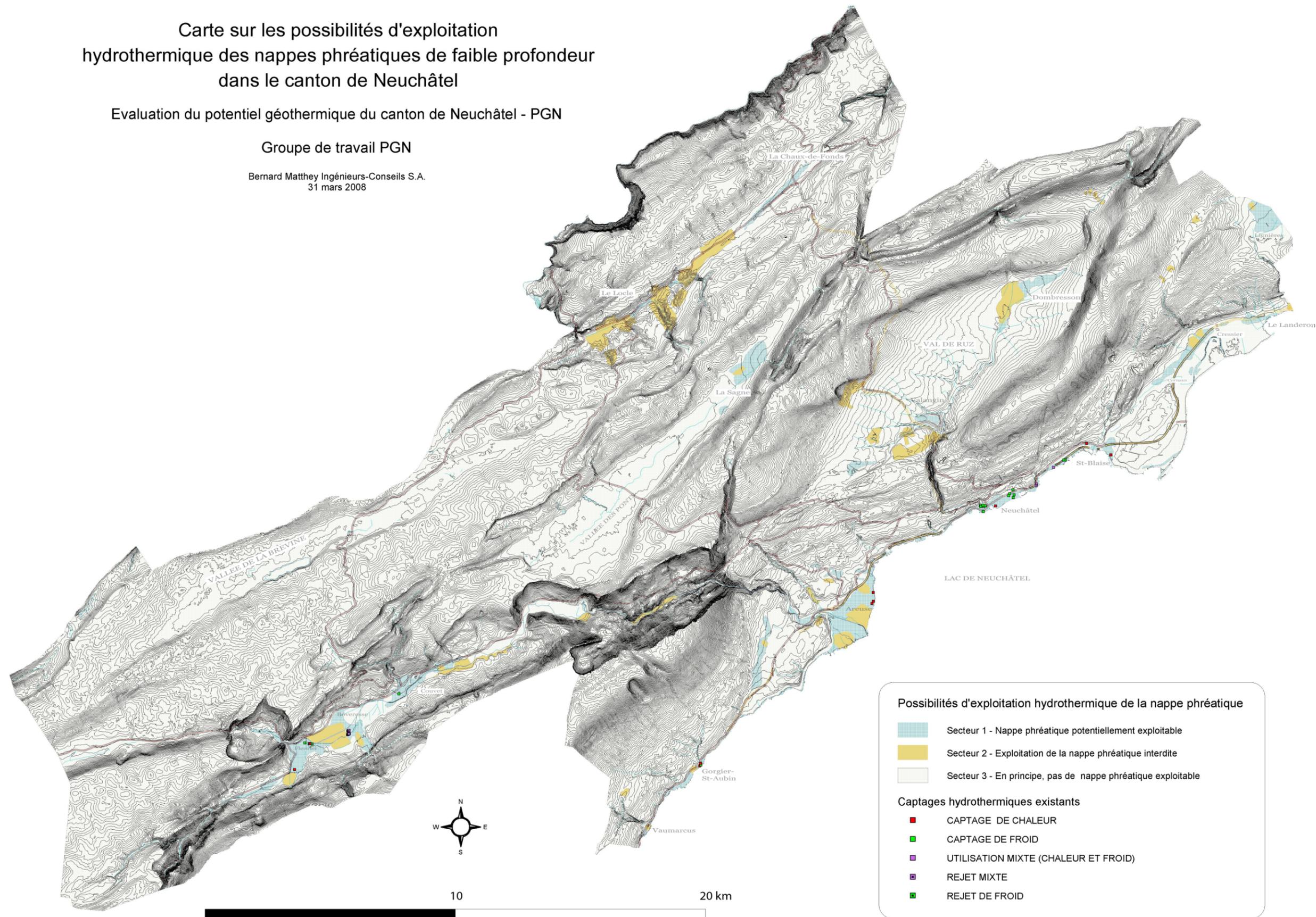
**Carte des possibilités d'exploitation thermique des
nappes phréatiques de faible profondeur dans le
canton de Neuchâtel**

Carte sur les possibilités d'exploitation hydrothermique des nappes phréatiques de faible profondeur dans le canton de Neuchâtel

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel - PGN

Groupe de travail PGN

Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils S.A.
31 mars 2008



Annexe 4.2

**Résumé des caractéristiques des principaux aquifères
(nappe phréatique de faible profondeur) du canton
de Neuchâtel**

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel

Description	Formation aquifère	Extension de la zone exploitable à des fins hydrothermiques ¹⁾	Altitude moyenne	Profondeur du niveau de la nappe	Epaisseur de la nappe (zone saturée perméable)	Perméabilité des terrains favorables			Porosité efficace / coefficient d'emmagasinement	Gradient hydraulique	Particularités chimiques	Température minimale observée / prévisible ²⁾	Température maximale observée / prévisible ²⁾	Température annuelle moyenne ²⁾	Remarques et appréciation sur le potentiel de la ressource ³⁾
						min.	max.	moyenne							
						m ²	m.s.m.	m							
Nappe de Vaumarcus	Alluvions	67'000	432	2	10	-	-	2.00E-03	0.15	0.3	r.a.s.	-	-	12.0	bon - extension limitée
Nappe de Saint-Aubin	Alluvions	250'000	433	3	7	-	7.00E-03	3.00E-03	n.e.	n.e.	Présence possible d'eau appauvrie en oxygène et de fer dissous	8.8	14.0	-	bon - contraintes de qualité de l'eau pompée
Nappe d'Archessus, Bevaix	Graviers fluvio-glaciaires de l'Areuse	450'000	490	3	4	-	-	-	n.e.	max. 3	r.a.s.	8.2	15.5	11.0	moyen - ressource peu explorée
Nappe de Perreux	Graviers fluvio-glaciaires de l'Areuse	225'000	500	2	2 à 12	2.00E-04	3.00E-04	2.50E-04	0.15	n.e.	Eau dure	7.6	12.6	10.3	moyen - ressource peu explorée
Delta de l'Areuse	Alluvions de l'Areuse. Sables et graviers. Niveaux limoneux	2'060'000	435	4	6	1.00E-05	1.00E-03	3.00E-04	n.e.	0.3 à 1	Présence occasionnelle d'eau appauvrie en oxygène et de fer dissous	8.5	12.0	11.5	bon
					20					0.1					Présence possible d'eau appauvrie en oxygène et de fer dissous à proximité du lac. Présence occasionnelle de nitrates, ammoniac.
Nappe Seyon centre-ville de Neuchâtel	remblais et alluvions du delta du Seyon	133'500	434	4	15	-	-	5.00E-04	n.e.	n.e.	possible rencontre de pollutions urbaines locales	11.0	14.0	13.0	très bon
Nappe périlacustre Nord-Est Neuchâtel	remblais + moraine remaniée + graviers intramoraïniques	460'000	433	3	10 à 15	1.00E-05	5.00E-03	5.00E-04	n.e.	n.e.	mauvaise qualité générale. Présence possible d'eau appauvrie en oxygène et de fer dissous. Eau très dure	12.5	15.5	13.0	bon - contraintes de qualité de l'eau pompée
Nappe périlacustre, Hauterive	moraine graveleuse, remblais souvent sablo-limoneux peu perméables	242'300	431	2	10 à 15	5.00E-05	1.00E-03	1.00E-04	n.e.	n.e.	mauvaise qualité générale. Présence possible d'eau appauvrie en oxygène et de fer dissous. Eau très dure	-	-	12.5	bon - contraintes de qualité de l'eau pompée
Nappe des Nageux, Cornaux	Graviers morainiques	302'000	434	1 à 4	6	2.00E-04	2.00E-03	7.00E-04	0.04	0.3 à 0.6	Oxygénation moyenne, traces d'ammonium et herbicides. Eaux très dures	7.4	14.4	11.4	bon
Nappe du Landeron	alluvions graveleuse, cône de déjection du ruisseau de Vaux	312'000	437	4	> 10 m	-	-	2.00E-03	n.e.	n.e.	Présence possible d'eau appauvrie en oxygène avec Fe et Mn dissous	-	-	-	bon - contraintes de qualité de l'eau pompée
Nappe libre des Prés-Royer	Cône de déjection du Torrent et du Seyon, fluvio-glaciaire et alluvions. Graviers grossiers et sables grossiers	633'400	735	1 à 3	4 à 5	5.00E-04	5.00E-03	3.00E-03	0.1	n.e.	Teneur en oxygène moyenne à élevée (70-100%). Fer dissous possible	6.0	12.0	7.5	bon - eau potable exploitée
Coffrane (champs de Serroue)	Cordons de graviers intramoraïniques sous importante zone de graviers, sables et limons non saturés.	278'300	798	26	15	5.00E-05	1.00E-04	1.00E-04	n.e.	n.e.	Eau très dure et sulfatée	8.0	14.0	10.0	peu d'informations sur la ressource
Cône de déjection du Sucre, Couvet	Graviers grossiers, cône de déjection du Sucre.	746'680	740	5 à 20	3 à 15, moyenne 4	hétérogène	3.00E-03	1.00E-03	n.e.	1.2	r.a.s.	7.2	14.2	9.1	bon
Nappe alluviale de Boveresse	alluvions graveleux de l'Areuse sur limons lacustres	370'000	735	1 à 4	3 à 11	4.00E-04	7.00E-03	5.00E-03	0.15	0.25	Présence occasionnelle d'eau appauvrie en oxygène et de fer dissous. Dureté moyenne à élevée	6.5	14.0	8.6	bon
Nappe alluviale Fleurier Ouest (Cornées)	alluvions graveleux de l'areuse sur limons lacustres	966'000	742	1 à 5	5	3.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	0.15	0.5	Parfois chargée en chlorures et nitrates	7.0	14.0	8.6	très bon
Nappe du Marais, La Sagne	Cône de déjection des Cugnets, graviers sablo-limoneux avec niveaux de moraine remaniée et limons	1'056'200	1035	0.5 à 2	5	-	-	2.00E-04	0.1	0.2	Faible teneur en oxygène (30%) influence des niveaux tourbeux.	3.0	-	-	moyen - ressource limitée - contrôle de la température hivernale
Oehningien, Le Locle	Tertiaire (craie et calcaires lacustres de l'Oehningien) + graviers tardiglaciaires	213'000	920	0	-	-	-	très variable	double porosité 3 à 5%	pas de gradient d'écoulement général. Local	Teneur élevée en chlorures, nitrates, sodium, potassium, très dure	5.6	11.1	8.0	moyen - eau potable exploitée
Oehningien, La Chau-de-Fonds	Tertiaire (craie et calcaires lacustres de l'Oehningien) + graviers tardiglaciaires	604'000	990	2 à 7	-	-	-	très variable	double porosité 3 à 5%	n.e.	r.a.s.	-	-	-	peu d'informations sur la ressource

1) Selon représentation sur la carte des possibilités d'exploitation hydrothermique des nappes phréatiques de faible profondeur dans le canton de Neuchâtel

2) Sur la base de la bibliographie consultée, complétée par les valeurs du réseau cantonal de surveillance de la qualité des eaux souterraines

3) Appréciation globale et relative

n.e. : non évalué par manque de données précises

r.a.s. : rien de particulier à signaler

ANNEXES CHAPITRE 5 :
RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS

Annexe 5.1

Carte tectonique du canton de Neuchâtel

Carte tectonique du Canton de Neuchâtel

Géologie

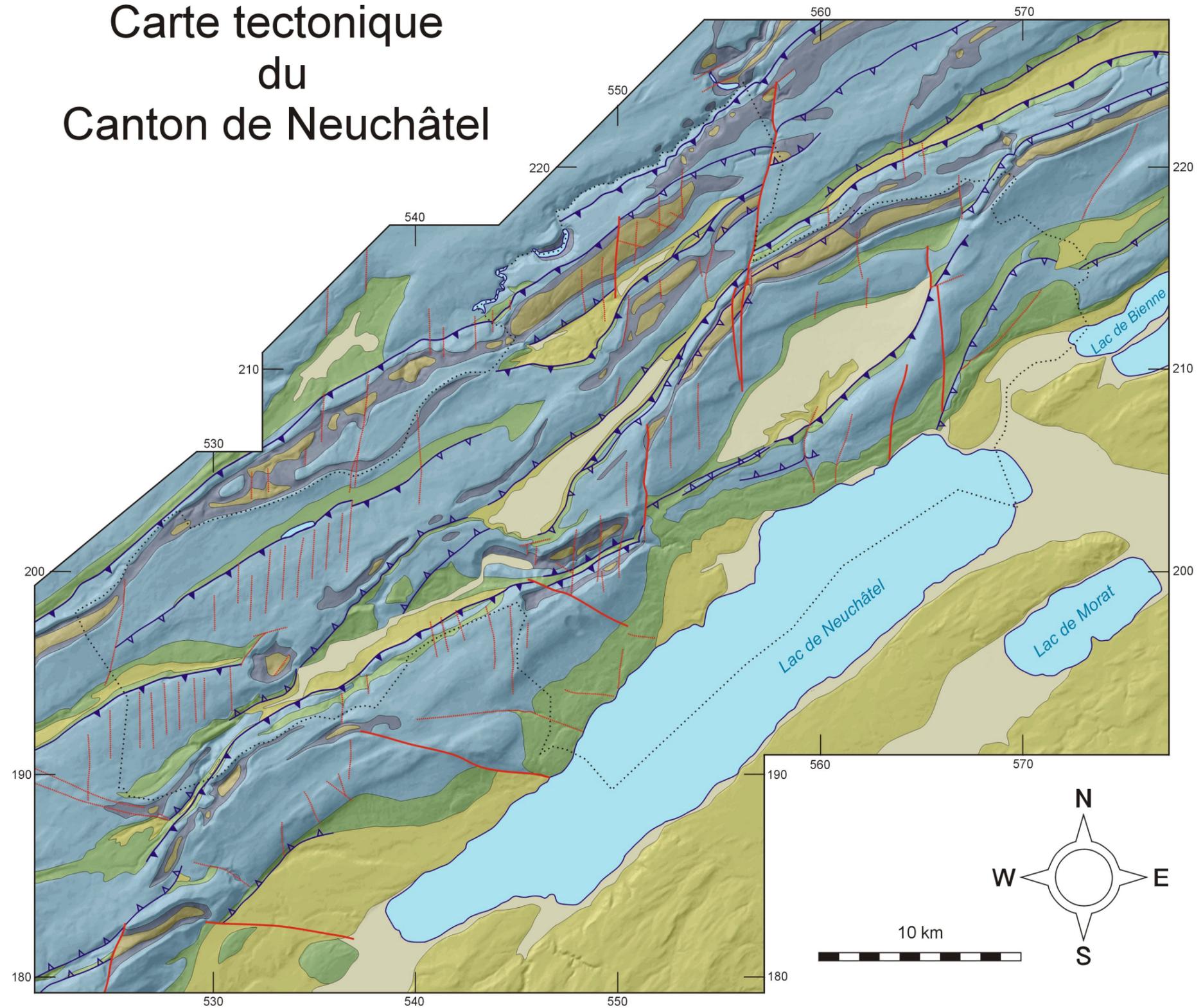
-  Quaternaire
-  Tertiaire
-  Crétacé
-  Malm supérieur
-  Malm inférieur (Argovien)
-  Dogger
-  Aalénien

-  Chevauchement principal
-  Chevauchement secondaire
-  Faille décrochante majeure
-  Faille mineure / Fracture

Géographie

-  Lacs
-  Limite cantonale

Relief : Atlas Digital de la Suisse

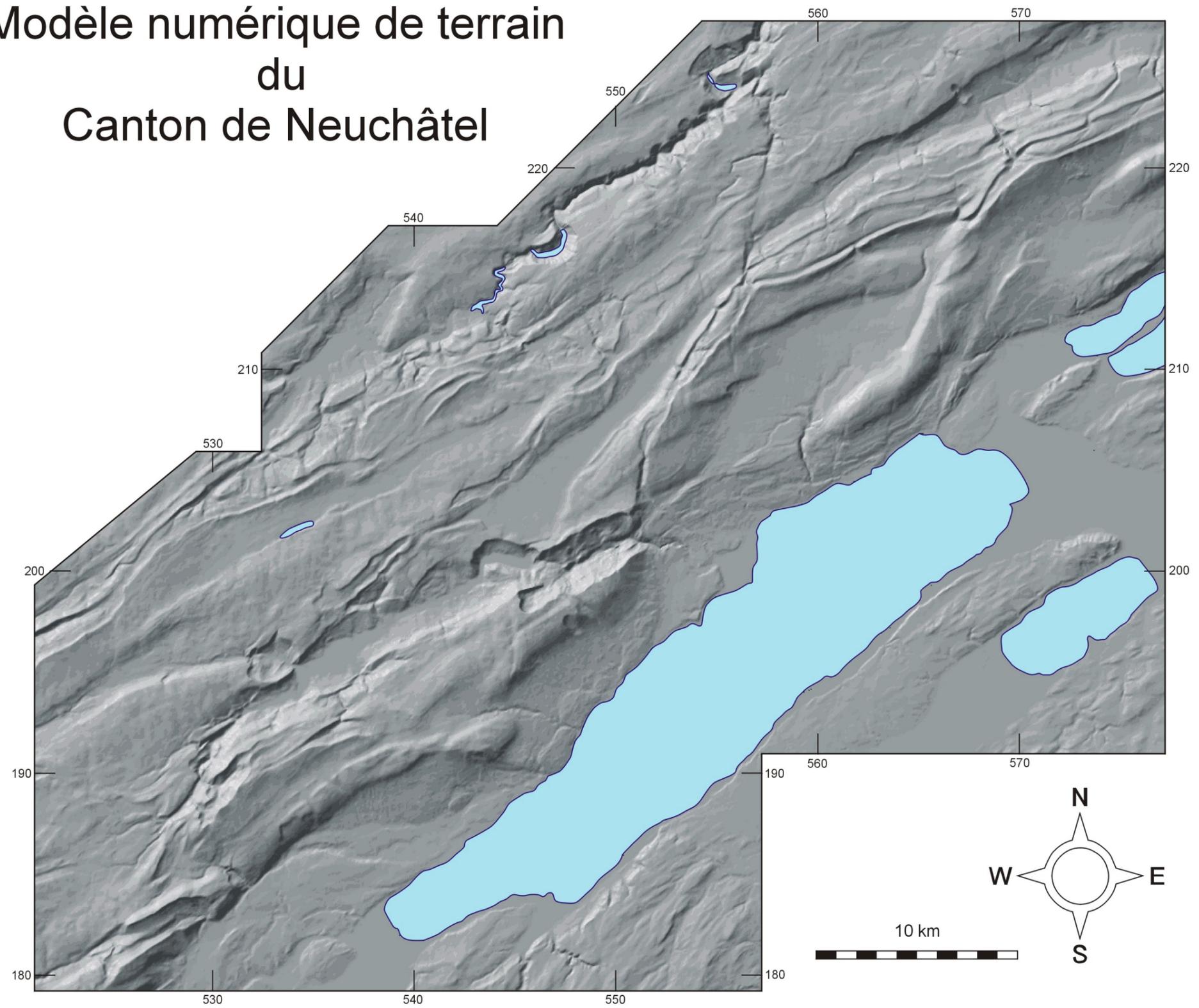


Charles Robert-Charrue 2008

Annexe 5.2

Modèle numérique de terrain du canton de Neuchâtel

Modèle numérique de terrain du Canton de Neuchâtel



Géographie

-  Lacs
-  Limite cantonale

Relief : Atlas Digital de la Suisse

Charles Robert-Charrue 2008

Annexe 5.3

**Carte tectonique du canton de Neuchâtel avec
mention du tracé des coupes de l'annexe 5.4.**

Carte tectonique du Canton de Neuchâtel

Géologie

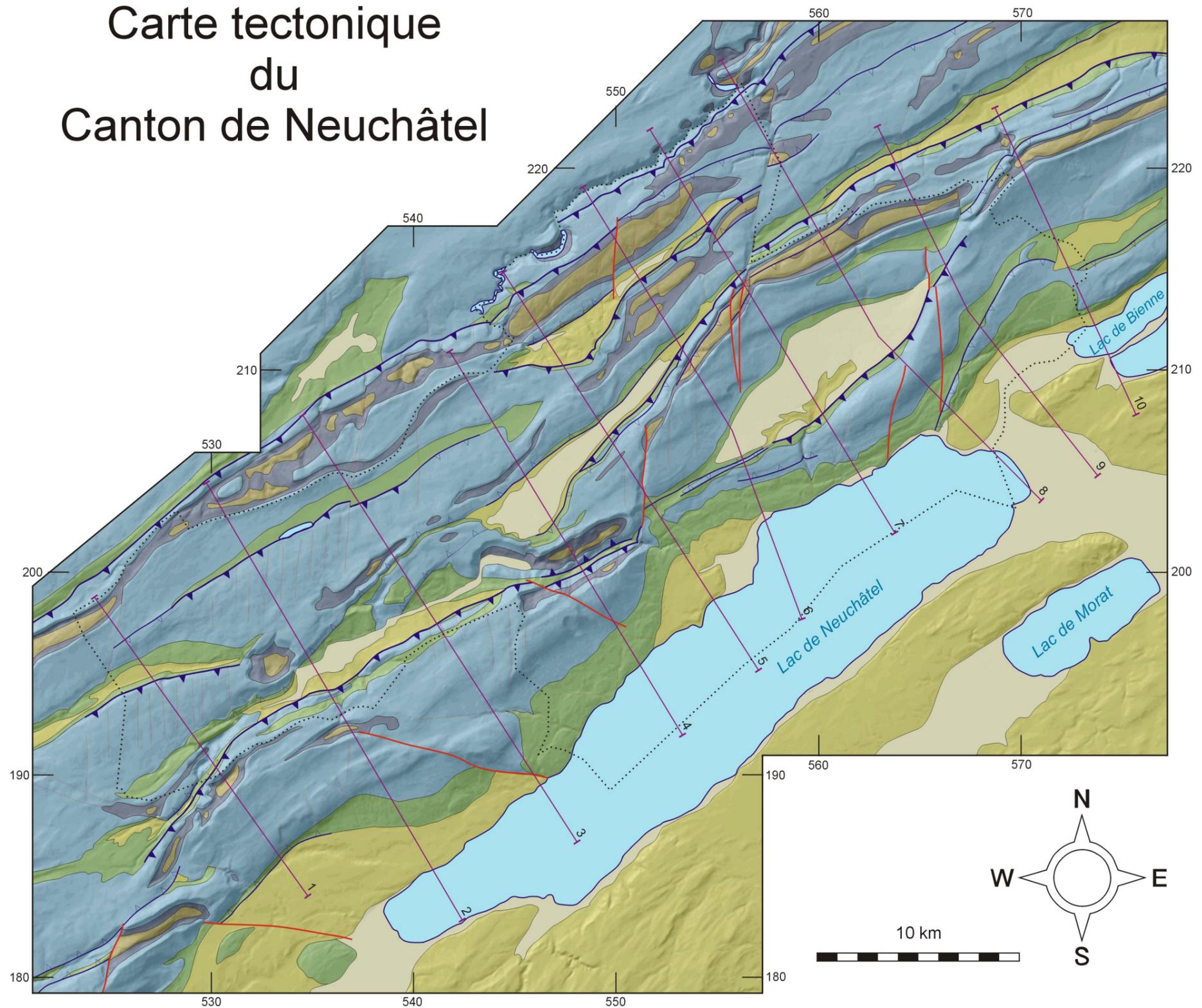
-  Quaternaire
-  Tertiaire
-  Crétacé
-  Malm supérieur
-  Malm inférieur (Argovien)
-  Dogger
-  Aalénien

-  Chevauchement principal
-  Chevauchement secondaire
-  Faille décrochante majeure
-  Faille mineure / Fracture
-  Trait de coupe

Géographie

-  Lacs
-  Limite cantonale

Relief : Atlas Digital de la Suisse



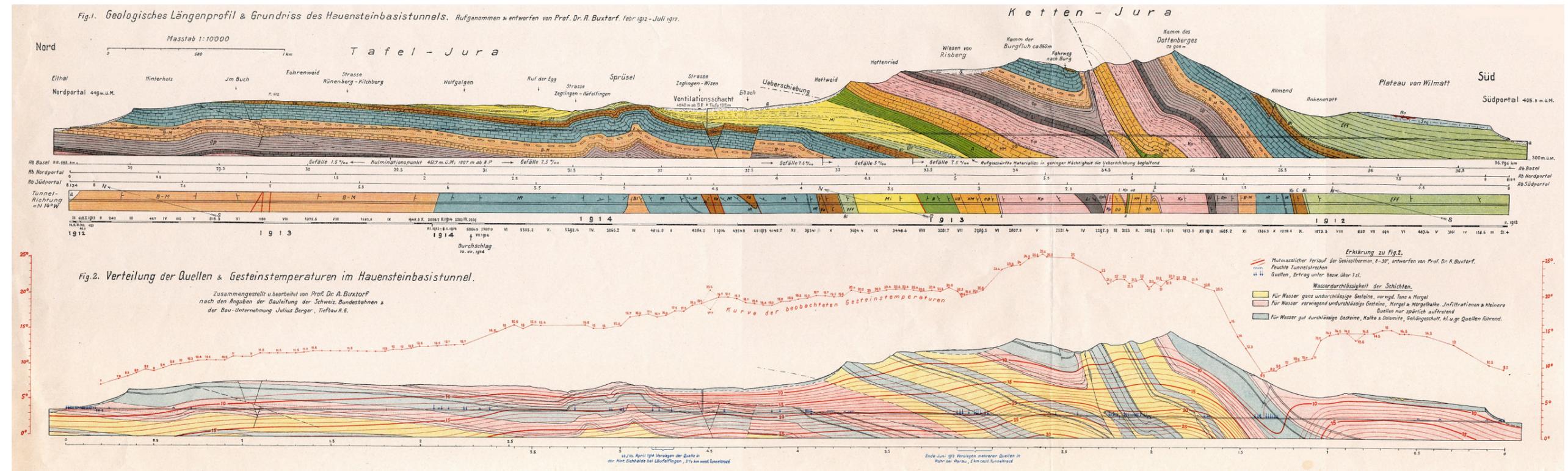
Charles Robert-Charrue 2008

Annexe 5.4
Coupes géologiques

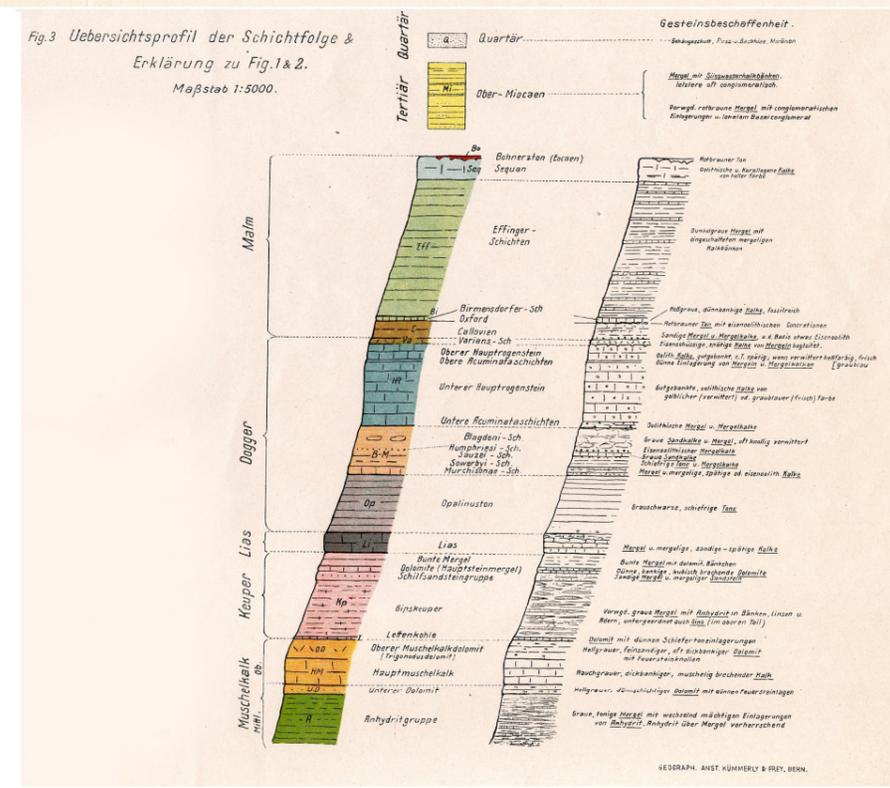
Annexe 5.5

**Coupe géologique et isothermes dans le massif du
Hauenstein d'après les mesures effectuées dans le
tunnel ferroviaire (Buxtorf, + 1917)**

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel



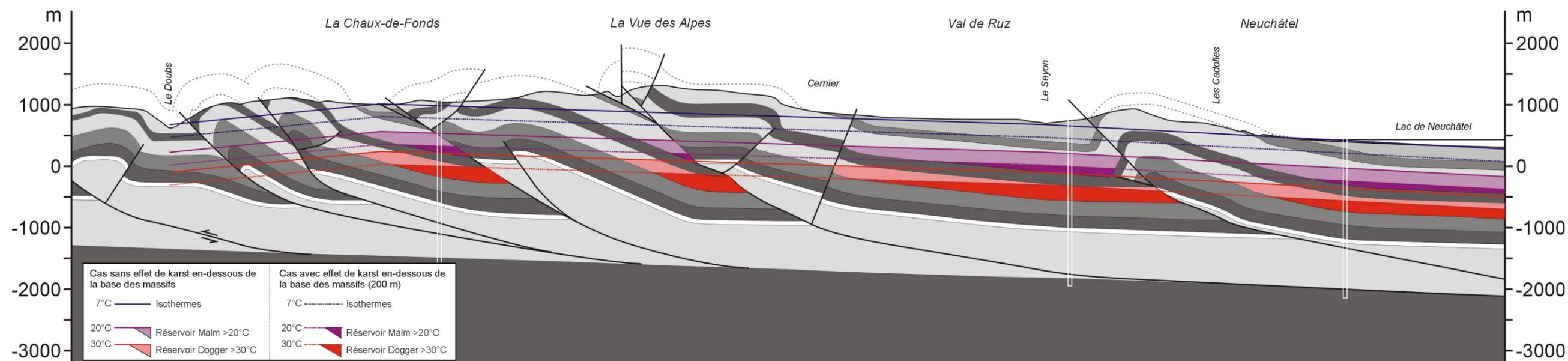
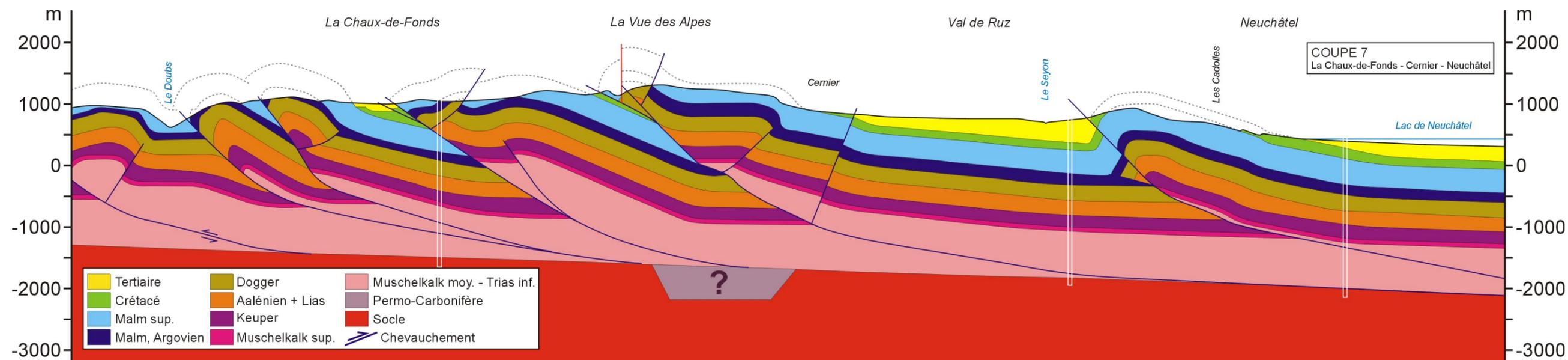
La courbe rouge indique la température mesurée dans le tunnel. Le maximum atteint 25.6°C



Annexe 5.6

**Coupe géologique N°7 :
La Chaux-de-Fonds – Cernier – Neuchâtel,
localisation des aquifères profonds et conditions
thermiques**

Evaluation du potentiel géothermique
du canton de Neuchâtel



En haut: coupe géologique NW – SW N°7 La Chaux-de-Fonds – Cernier - Neuchâtel
En bas : coupe géologique avec la localisation des aquifères profonds du Malm et du Dogger ainsi que les isothermes

Annexe 5.7

Carte des aquifères profonds du canton de Neuchâtel

Carte APR du Canton de Neuchâtel

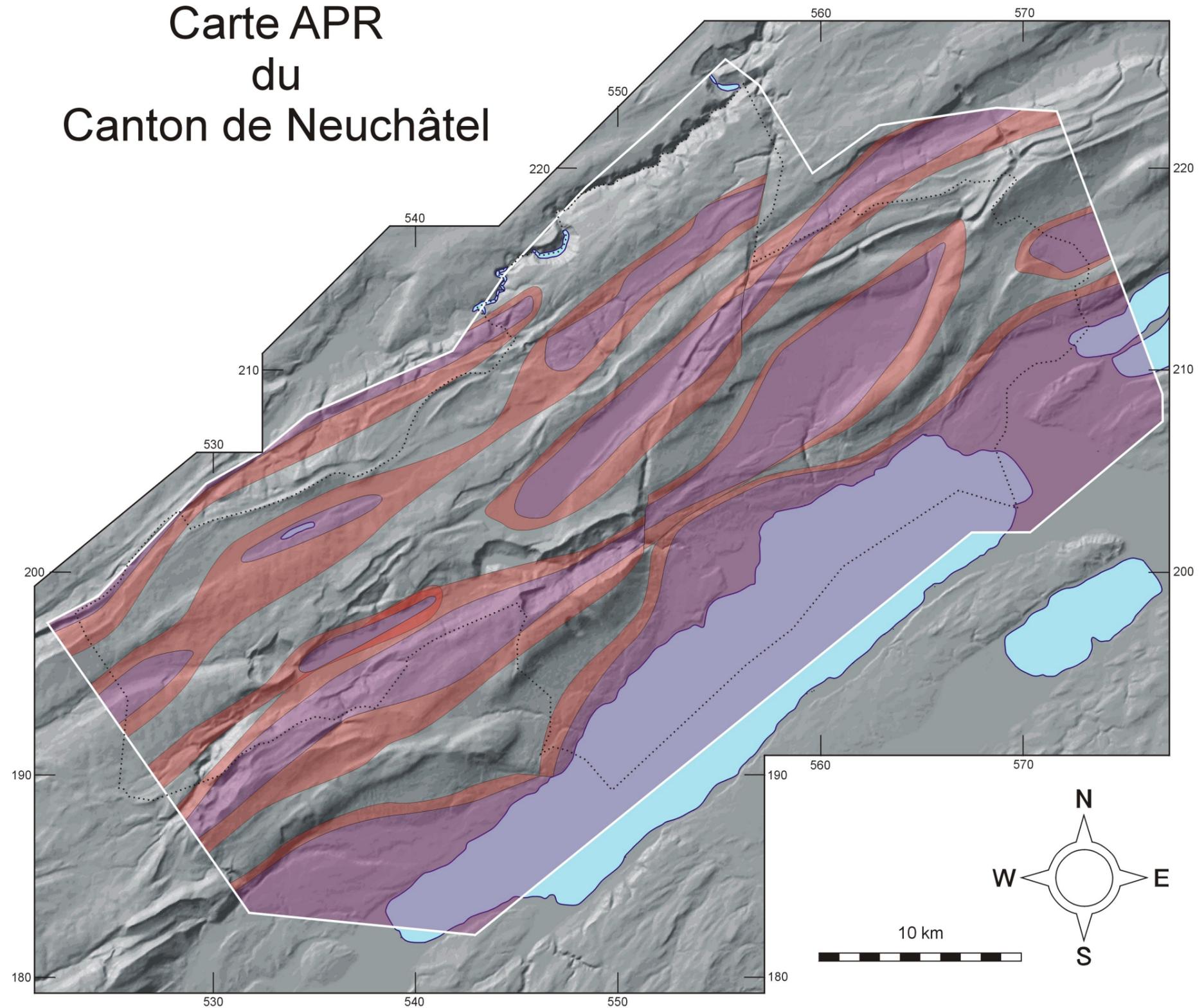
Géothermie

-  Aquifère du Malm sup.
Température > 20°C
-  Aquifère du Dogger
Température > 30°C
-  Limite de l'étude
géothermique

Géographie

-  Lacs
-  Limite cantonale

Relief : Atlas Digital de la Suisse



Charles Robert-Charrue 2008

Annexe 5.8

**Carte des aquifères profonds et des consommateurs
potentiels de chaleur du canton de Neuchâtel**

Carte APR et consommateurs du Canton de Neuchâtel

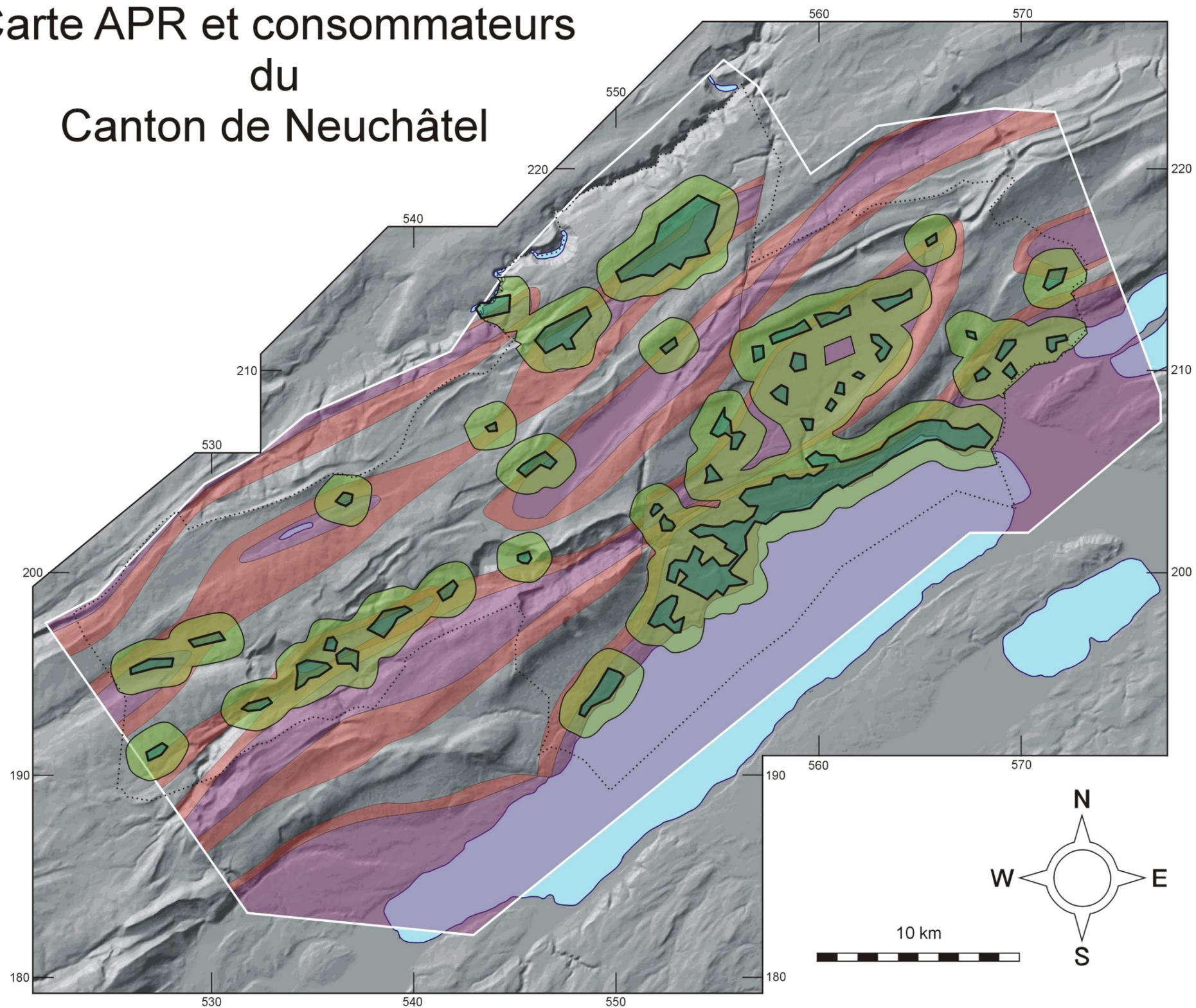
Géothermie

-  Aquifère du Malm sup.
Température > 20°C
-  Aquifère du Dogger
Température > 30°C
-  Limite de l'étude
géothermique
-  Consommateurs
potentiels
-  Rayon de 1 km des
consommateurs

Géographie

-  Lacs
-  Limite cantonale

Relief : Atlas Digital de la Suisse



Charles Robert-Charrue 2008