UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

# Rapport final de la Phase 1

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

# Résumé


## Introduction

Dès la fin de l'étude du potentiel géothermique PDGN en 2010, le canton de Neuchâtel a souhaité poursuivre les investigations pour le développement de la géothermie profonde dans le canton. Il a mandaté pour cela le Laboratoire de géothermie - CREGE de l'Université pour construire et mener le programme GeoNE.

Entre mai 2010 et juillet 2012, les nombreuses investigations réalisées dans le cadre du programme GeoNE dans le but de prospecter les ressources géothermiques profondes sur le territoire du canton de Neuchâtel ont permis de conclure une étape importante dans la prospection de trois régions sélectionnées pour la réalisation de doublets géothermiques. Les trois régions, choisies entre la fin de l'étude PDGN (2008-2010) et le début du programme GeoNE (2010-2012) sont celles de (1) Neuchâtel – St Blaise, (2) Le Locle – La Chaux-de-Fonds et (3) Boudry – Auvernier.

## Développement des systèmes hydrothermaux pour trois aquifères profonds

Lors des précédentes études sur le potentiel géothermique du canton (PGN 2008 et PDGN 2010), trois aquifères potentiels avaient été mis en évidence dans les séries sédimentaires profondes : le Malm (350-650 m), le Dogger (850-1'200 m) et le Muschelkalk (1'450-2'150 m).

## Méthodologie et réalisation

Au cours des travaux du programme GeoNE, des avancées notoires ont été accomplies dans différents domaines touchant les méthodes d'exploration géothermique.

Tout d'abord, sur la base des très nombreuses données géologiques du canton de Neuchâtel accumulées et synthétisées depuis des décennies, des modèles géologiques 3D ont été élaborés au moyen du logiciel GeoModeller pour chacune des trois régions choisies et réalisés à trois échelles différentes, jusqu'au site de forage de 1x1 km. Ils permettent de se représenter dans l'espace les multiples variations des formations géologiques d'intérêt pour la géothermie et de dessiner des coupes géologiques prévisionnelles de futurs forages.

En l'absence de forages profonds et de mesures directes, deux types de modèles thermiques ont été élaborés, afin d'approcher les températures qui seront rencontrées dans les forages des différents sites et pour les trois aquifères potentiels soumis à investigation. Ils permettent de choisir les sites dont les températures seront les plus élevées.

La méthode géophysique de la gravimétrie, qui mesure les différences de densité des roches, apporte des informations précises sur les micro-variations des propriétés et des structures des roches. Elle permet de confirmer et d'affiner les hypothèses sur les modèles géologiques. De très nombreux points de mesures gravimétriques effectués dans le canton pendant le programme GeoNE complètent ainsi ceux de l'Atlas gravimétrique de la Suisse.

La méthode de prospection des gaz des sols, connue et efficace pour certains types de roches et certains environnements géothermiques, n'avait jamais été utilisée dans une prospection de ce type. Quelques profils d'Hélium et de $CO_2$ réalisés pour valider cette méthode s'avèrent prometteurs.

## Résultats pour les trois régions sélectionnées

### Région Neuchâtel – St Blaise

Deux zones ont été particulièrement étudiées, celle de Monruz et celle de St Blaise, en raison des systèmes de failles engendrant une fracturation qui augmente souvent le débit des circulations profondes intéressantes pour le captage d'une ressource géothermique. La zone de St Blaise montre un environnement souterrain plus fracturée que celle de Monruz. Sur le plan de la température des

aquifères, ceux-ci étant plus profonds vers St Blaise, cette zone offre également plus d'intérêt. Une étude de valorisation de la chaleur met en évidence l'intérêt des deux zones, sachant que dans la zone de Monruz, le raccordement à un réseau de chauffage à distance est relativement aisé, alors qu'à St Blaise, les consommateurs existants, mais il n'y a pas encore de réseau CAD.

Le site de forage sélectionné en priorité est donc celui de St Blaise et les trois aquifères potentiels atteignent respectivement les profondeurs et les températures moyennes suivantes : Malm (800 m, 25°C), Dogger (1'300 m, 37°C) et Muschelkalk (1'850 m, 55°C).

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

Deux zones ont été particulièrement étudiées, celle du Crêt-du-Locle et celle de La Chaux-de-Fonds Est, en raison des consommateurs de chaleur potentiels. La position des structures géologiques et la modélisation thermique mettent en évidence des zones dont les débits et les températures seront vraisemblablement moins élevés que sur le littoral. Par contre, la durée de la saison de chauffage est plus longue à 1'000 m d'altitude et des petits CAD à basse température couplés à des pompes à chaleur peuvent également représenter un intérêt économique et énergétique certain.

Le site de forage sélectionné est celui de La Chaux-de-Fonds Est, où les trois aquifères potentiels atteignent respectivement les profondeurs et les températures moyennes suivantes : Malm (200 m, 11°C), Dogger (650 m, 21°C) et Muschelkalk , qui est dédoublé (1'200 et 1'650 m, 35 et 44°C).

### Région Boudry – Auvernier

Une seule zone a été étudiée, entre Colombier, Boudry et Auvernier, à proximité de l'incinérateur de Cottendart et du réseau Cadbar. En effet, ce dernier devra trouver une autre source de chaleur à partir de 2015, lorsque l'incinérateur des ordures sera fermé. Les conditions géologiques et thermiques évaluées ne permettent pas l'alimentation directe du CAD Cadbar, mais un couplage avec des pompes à chaleur ou une transformation du réseau donnerait tout son intérêt à cette option.

Le site de forage sélectionné est celui de Cottendart, où les trois aquifères potentiels atteignent respectivement les profondeurs et les températures moyennes suivantes : Malm (300 m, 16°C), Dogger (800 m, 26°C) et Muschelkalk, qui est dédoublé (1'350 et 1'750 m, 46 et 55°C).

## Transfert de technologie

Le programme GeoNE avait également pour tâche d'assurer un transfert de technologie des méthodes et outils de prospection géothermique développés au Laboratoire de géothermie à l'intention des bureaux de géologues et d'ingénieurs. Ces activités ont inclus deux conférences en novembre 2010 auxquelles ont participé 92 personnes, dont la moitié provenait de bureaux d'étude, ainsi que deux ateliers organisés en avril 2012, qui ont été suivis par 20 personnes.

## Formation continue en géothermie profonde (CAS DEEGEOSYS)

Un autre aspect important du programme GeoNE a été la conception et l'organisation d'un cours de formation en géothermie profonde. Inscrit dans le cadre de la formation continue de l'Université de Neuchâtel, ce certificat d'études avancées (CAS DEEGEOSYS) a débuté en novembre 2011 pour s'achever en juin 2012. Dès sa première édition le succès fut total, avec 27 participants, dont 17 qui ont suivi l'intégralité des quatre modules.

## Conclusions et recommandations

Basée sur les conclusions régionales, la suite de l'exploration géothermique dans le canton de Neuchâtel dépend avant tout des choix et des priorités qui seront fixés. Les modèles ont confirmé l'existence d'un potentiel géothermique dans le canton, apparemment plus important au sud dans la zone de St-Blaise – Marin. Toutefois, en raison du manque d'informations sur les conditions géologiques profondes, les incertitudes devront être comblées d'abord par des campagnes de sismique réflexion et ensuite par les premiers forages d'exploration. Plusieurs scénarios possibles de développement de 1 à 5 sites sont présentés.

# Résumé étendu

## Introduction

Dès la fin de l'étude du potentiel géothermique PDGN en 2010, le canton de Neuchâtel a souhaité poursuivre les investigations pour le développement de la géothermie profonde dans le canton. Il a mandaté pour cela le Laboratoire de géothermie - CREGE de l'Université pour construire et mener à bien le programme GeoNE.

En plus de la volonté de développer quelques projets ciblés pour utiliser la chaleur des aquifères profonds, les autorités ont souhaité renforcer le centre de compétence en géothermie de l'Université. Elles ont également demandé que le CREGE assure le transfert de la technologie acquise et développée lors des investigations de GeoNE auprès des bureaux de géologues et d'ingénieurs sur le canton et les régions voisines. In fine, cette action avait pour but de créer des postes de travail et de fournir une aide à des entreprises pour leur permettre de devenir des intervenants majeurs des futurs projets de géothermie.

Entre mai 2010 et juillet 2012, les nombreuses investigations réalisées dans le cadre du programme GeoNE dans le but de prospecter les ressources géothermiques profondes sur le territoire du canton de Neuchâtel ont permis de conclure une étape importante dans la prospection de trois régions sélectionnées pour la réalisation de doublets géothermiques. Les trois régions, choisies entre la fin de l'étude PDGN (2008-2010) et le début du programme GeoNE (2010-2012) sont celles de (1) Neuchâtel – St Blaise, (2) Le Locle – La Chaux-de-Fonds et (3) Boudry – Auvernier.

## Développement des systèmes hydrothermaux pour trois aquifères profonds

La limite à partir de laquelle le terme de ressource géothermique profonde est utilisé a été fixée à 400 m de profondeur en Suisse. Dans le cadre de cette étude, des investigations ont été conduites sur l'ensemble des formations géologiques sédimentaires profondes susceptibles d'être aquifères (Groupe de travail PGN, 2008; Groupe de travail PDGN, 2010). Dans le canton de Neuchâtel, au-delà de 2'000 à 2'500 m de profondeur environ, on atteint généralement le socle cristallin, qui peut également se comporter de manière aquifère, mais cette formation n'a pas été évaluée. L'eau présente dans ces formations géologiques est plus ou moins chaude et minéralisée en fonction de la durée de son parcours, des roches traversées et de la profondeur qu'elle a atteinte. Les paramètres clés de la réussite d'une prospection géothermique sont évidemment la température du réservoir et le débit de production obtenu par puits (Figure 1)

Le mode d'exploitation à deux puits est appelé un doublet géothermique. Un forage de production apporte l'eau chaude à la surface au moyen de la pompe immergée vers un échangeur de chaleur situé à proximité de la tête de puits. Celui-ci transmet immédiatement l'énergie géothermique à un fluide secondaire, avant que le fluide géothermal ne soit réinjecté en profondeur par le deuxième puits.

Lors des précédentes études sur le potentiel géothermique du canton (PGN 2008 et PDGN 1010), trois aquifères potentiels avaient été mis en évidence dans les séries sédimentaires profondes : le Malm (350-650 m), le Dogger (850-1'200 m) et le Muschelkalk (1'450-2'150 m). Les ressources géothermiques profondes du type de celles prospectées dans le canton peuvent servir à des fins de chauffage urbain, pour des bâtiments locatifs, administratifs, commerciaux ou industriels, au moyen d'une paire de forages atteignant l'aquifère productif (Figure 1). Dans la gamme de profondeur des trois aquifères prospectés, la température reste nettement en dessous de 100 °C, et seule une utilisation thermique peut être envisagée.

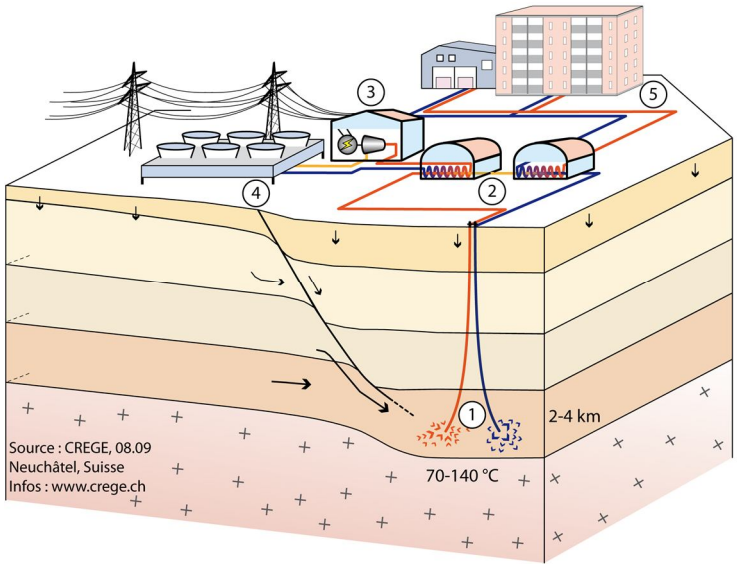



*Figure 1. Schéma d'un système d'exploitation d'un aquifère profond par doublet géothermique. (1) Forages de production et de réinjection. (2) Echangeurs de chaleur. (3) Centrale électrique : turbine et générateur (si la température le permet). (4) Système de refroidissement à air. (5) Réseau de chauffage à distance.*

## Méthodologie et réalisation

Au cours des travaux du programme GeoNE, des avancées notoires ont été accomplies dans différents domaines touchant les méthodes d'exploration géothermique et leur application au canton de Neuchâtel.

Tout d'abord, sur la base des très nombreuses données géologiques du canton de Neuchâtel accumulées et synthétisées depuis des décennies, des modèles géologiques 3D ont été élaborés au moyen du logiciel GeoModeller pour chacune des trois régions choisies et réalisés à trois échelles différentes, jusqu'au site de forage de 1x1 km. Ils permettent de se représenter dans l'espace les multiples variations des formations géologiques d'intérêt pour la géothermie et de dessiner des coupes géologiques prévisionnelles de futurs forages.

En l'absence de forages profonds et de mesures directes, deux types de modèles thermiques ont été élaborés, afin d'approcher les températures qui seront rencontrées dans les forages des différents sites et pour les trois aquifères potentiels soumis à investigation. Ils permettent de choisir les sites dont les températures seront les plus élevées.

La méthode géophysique de la gravimétrie, qui mesure les différences de densité des roches, apporte des informations précises sur les micro-variations des propriétés et des structures des roches. Elle fournit par conséquent des confirmations sur les hypothèses des modèles géologiques. Pendant le programme GeoNE, quelques 2'300 points de mesures gravimétriques ont été effectués dans quatre zones du canton sur une superficie de 145 $km^2$.

L'objectif de la cartographie gravimétrique est de mettre en évidence d'une part l'extension des zones de roches fracturées associées aux failles, qui sont souvent des chemins préférentiels pour la circulation des eaux souterraines. Cette méthode permet d'autre part, de démontrer l'existence de structures géologiques favorisant la formation d'un réservoir géothermique. Les variations gravimétriques peuvent caractériser l'existence de structures géologiques (synclinal, ancien bassin sédimentaire), qui sont invisibles en surface.

La sismique réflexion est une méthode géophysique principalement utilisée dans l'exploration pétrolière, mais elle est également adéquate pour tout type d'étude nécessitant des investigations structurales en profondeur, telles que celles conduites en géothermie profonde. Elle implique des

équipements lourds et est mise en œuvre par des sociétés de service spécialisées. Dans le cadre du programme GeoNE, les moyens à disposition ne permettaient pas d'exécuter des campagnes de sismique réflexion. Cependant, afin préparer la planification d'une future campagne d'acquisition sismique sur les différentes régions, plusieurs profils sismiques synthétiques ont été générés à partir des modèles géologiques, pour mettre en évidence les structures profondes susceptibles d'être confirmées par cette méthode. Ces profils sismiques synthétiques donnent un aperçu théorique de ce que devraient révéler les lignes sismiques 2D proposées.

L'analyse des composés volatiles dans les sols est une technique usuelle pour prospecter les gîtes métallifères et pour le suivi de contaminants, mais aussi pour la prospection de failles actives et de réservoirs géothermiques. La méthode d'exploration des gaz des sols, efficace pour certains types de roches et certains environnements géothermiques, n'avait jamais été utilisée dans ce type de géologie. Quelques profils d'Hélium et de $CO_2$ réalisés pour valider cette méthode se révèlent prometteurs.

Finalement, deux études de valorisation de la chaleur ont été conduites par des intervenants extérieurs, l'une pour la zone de La Chaux-de-Fonds et l'autre pour le littoral neuchâtelois. Elles ont montré l'intérêt de plusieurs scénarios d'utilisation de la ressource géothermique par les consommateurs de chaleur existants.

La majorité des investigations, ainsi que la coordination et la gestion de l'étude, ont été réalisées par le Laboratoire de Géothermie (CREGE) à Neuchâtel. Un certain nombre d'investigations ne faisant pas partie des compétences de l'équipe de projet du Laboratoire de géothermie, elles ont été mandatées à deux bureaux d'ingénieurs (B. Matthey Ing. Conseil SA et Geowatt AG), ainsi qu'au Laboratoire d'énergétique industrielle - LENI de l'EPFL.

## Résultats pour les trois régions sélectionnées

### Région Neuchâtel – St Blaise

Deux zones ont été particulièrement étudiées, celle de Monruz et celle de St Blaise, en raison des systèmes de failles engendrant une fracturation, qui augmente souvent le débit des circulations profondes intéressantes pour le captage d'une ressource géothermique. La zone de St Blaise montre un environnement souterrain plus fracturé que celle de Monruz. Sur le plan de la température des aquifères, ceux-ci étant plus profonds vers St Blaise, cette zone offre également plus d'intérêt. Une étude de valorisation de la chaleur met en évidence l'intérêt des deux zones, sachant que dans la zone de Monruz, le raccordement à un réseau de chauffage à distance est relativement aisé, alors qu'à St Blaise, les consommateurs existent, mais il n'y a pas encore de réseau CAD.

Le site de forage sélectionné en priorité est donc celui de St Blaise, où les trois aquifères potentiels doivent atteindre respectivement les profondeurs et les températures moyennes suivantes : le Malm (800 m, 25°C), le Dogger (1'300 m, 37°C) et le Muschelkalk (1'850 m, 55°C). La synthèse des résultats est résumée dans le Tableau 1.

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

Deux zones ont été particulièrement étudiées, celle du Crêt-du-Locle et celle de La Chaux-de-Fonds Est, en raison des consommateurs de chaleur potentiels. La position des structures géologiques et la modélisation thermique mettent en évidence des zones dont les débits et les températures seront vraisemblablement moins élevés que sur le littoral. Par contre, la durée de la saison de chauffage est plus longue à 1'000 m d'altitude ce qui augmente l'efficacité énergétique d'une centrale géothermique. Finalement, la mise en place de petits CAD à basse température couplés à des pompes à chaleur peut également représenter un intérêt économique et énergétique certain.

Le site de forage sélectionné est celui de La Chaux-de-Fonds Est, où les trois aquifères potentiels doivent atteindre respectivement les profondeurs et les températures moyennes suivantes : le Malm (200 m, 11°C), le Dogger (650 m, 21°C) et le Muschelkalk, qui est dédoublé (1'200 et 1'650 m, 35 et 44°C). La synthèse des résultats est résumée dans le Tableau 1.

*Tableau 1. Synthèse des résultats des cinq zones d'investigation du projet GeoNE*

| **Région Neuchâtel – St Blaise** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Caractéristiques** | **Zone Monruz** | | **Zone St Blaise** | |
| Géologie : fracturation-failles | Favorable | | Très favorable | |
| Site de forage potentiel | Littoral Les Saars - Monruz | | Marin – Nord de l'autoroute | |
| Aquifères potentiels<br>Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk | Prof. moy. (m)<br>400<br>900<br>1450 | T°C moyenne<br>12 - 21<br>21 - 35<br>42 - 55 | Prof. moy. (m)<br>800<br>1300<br>1850 | T°C moyenne<br>20 - 31<br>29 - 46<br>47 - 63 |
| Conditions thermiques | Temp. réduite par l'effet du karst | | Températures les plus élevées | |
| Utilisation de la chaleur | Raccordement au CAD CUM | | Nouveau CAD : haute T°C/basse T°C | |
| Prix de revient de l'énergie (ct/kWh) | Malm : 18.5<br>Dogger : 16.0<br>Muschelkalk : 13.1 | | Malm : 15.7 / 20.4<br>Dogger : 16.6 / 23.4<br>Muschelkalk : - / 15.3 | |
| **Région Le Locle – La Chaux-de-Fonds** | | | | |
| **Caractéristiques** | **Zone Crêt-du-Locle** | | **Zone La Chaux-de-Fonds Est** | |
| Géologie : fracturation-failles | Peu favorable à favorable | | Peu favorable | |
| Site de forage potentiel | Nord-ouest du Crêt-du-Locle | | Est de La Chaux-de-Fonds | |
| Aquifères potentiels<br>Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk<br>Muschelkalk-2 | Prof. moy. (m)<br>250<br>800<br>1500<br>- | T°C moyenne<br>10 - 13<br>18 - 25<br>37 - 44<br>- | Prof. moy. (m)<br>200<br>650<br>1200<br>1650 | T°C moyenne<br>10 - 12<br>18 - 23<br>32 - 37<br>42 - 46 |
| Conditions thermiques | Température réduite par les effets du karst et de l'altitude | | Température réduite par les effets du karst et de l'altitude | |
| Utilisation de la chaleur | Nouveau CAD :<br>haute T°C ou basse T°C | | Raccordement au CAD existant | |
| **Région Auvernier – Boudry** | | | | |
| **Caractéristiques** | **Zone Cottendart** | | | |
| Géologie : fracturation-failles | Peu favorable | | | |
| Site de forage potentiel | A proximité de l'incinérateur de Cottendart | | | |
| Aquifères potentiels<br>Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk<br>Muschelkalk-2 | Prof. moy. (m)<br>300<br>800<br>1350<br>1750 | | T°C moyenne<br>12 - 19<br>21 - 31<br>41 - 50<br>50 - 59 | |
| Conditions thermiques | Augmentation de la température vers le littoral | | | |
| Utilisation de la chaleur | Raccordement au CAD Cadbar (avec ou sans PAC) | | | |

### Région Boudry – Auvernier

Une seule zone a été étudiée, entre Colombier, Boudry et Auvernier, à proximité de l'incinérateur de Cottendart et du réseau Cadbar. En effet, ce dernier devra trouver une autre source de chaleur à partir de 2015, lorsque l'incinérateur des ordures sera fermé. Les conditions géologiques et thermiques évaluées ne permettent pas l'alimentation directe du CAD Cadbar, mais un couplage avec des pompes à chaleur ou une transformation du réseau donnerait tout son intérêt à cette option.

Le site de forage sélectionné est celui de Cottendart, où les trois aquifères potentiels doivent atteindre respectivement les profondeurs et les températures moyennes suivantes : le Malm (300 m, 16°C), le Dogger (800 m, 26°C) et le Muschelkalk, qui est dédoublé (1'350 et 1'750 m, 46 et 55°C). La synthèse des résultats est résumée dans le tableau 1.

## Transfert de technologie

Le programme GeoNE avait également pour tâche d'assurer un transfert de technologie des méthodes et outils de prospection géothermique développés au Laboratoire de géothermie à l'intention des bureaux de géologues et d'ingénieurs. Ces activités ont inclus deux conférences en novembre 2010 auxquelles ont participé 92 personnes, dont la moitié provenait de bureaux d'étude, ainsi que deux ateliers organisés en avril 2012, qui ont été suivis par 20 personnes.

## Formation continue en géothermie profonde (CAS DEEGEOSYS)

Un autre aspect important du programme GeoNE a été la conception et l'organisation d'un cours de formation en géothermie profonde. Inscrit dans le cadre de la formation continue de l'Université de Neuchâtel, ce certificat d'études avancées (CAS DEEGEOSYS) a débuté en novembre 2011 pour s'achever en juin 2012. Dès sa première édition le succès fut total, avec 27 participants, dont 17 qui ont suivi l'intégralité des quatre modules dont les thématiques se distribuaient de la manière suivante (Tableau 2). Tous les cours ont été donnés en anglais par des experts internationaux dans le domaine de la géothermie profonde.

*Tableau 2. Déroulement du CAS DEEGEOSYS 2011-2012*

| **Activité** | **Période** | **Thème** |
|---|---|---|
| **Module 1**<br>Visite du projet EGS de Soultz-sous-Forêts, Alsace | 21-25 nov. 2011<br>25 nov. 2011 | Géologie et Géophysique |
| **Module 2**<br>Examen Modules 1+2 | 23-27 janv. 2012<br>27 janv. 2012 | Géochimie et hydrochimie |
| **Module 3**<br>Visite du projet hydrothermal de Taufkirchen, Bavière | 26-30 mars 2012<br>30 mars 2012 | Forages et diagraphies |
| **Module 4**<br>Examen Modules 3+4 | 4-8 juin 2012<br>8 juin 2012 | Evaluation et production des réservoirs |
| **Travail personnel**<br>Remise d'un rapport technique | Juin-juillet 2012<br>31 juillet 2012 | Thème choisi par les participants |

## Conclusions et recommandations

Basée sur les conclusions régionales, la suite de l'exploration géothermique dans le canton de Neuchâtel dépend avant tout des choix et des priorités qui seront fixés. Les modèles ont confirmé l'existence d'un potentiel géothermique dans le canton, apparemment plus important au sud dans la

zone de St-Blaise – Marin. Toutefois, en raison du manque d'informations sur les conditions géologiques profondes, les incertitudes devront être comblées d'abord par des campagnes de sismique réflexion et ensuite par les premiers forages d'exploration. Plusieurs scénarios possibles de développement de 1 à 5 sites sont présentés (Figure 2).

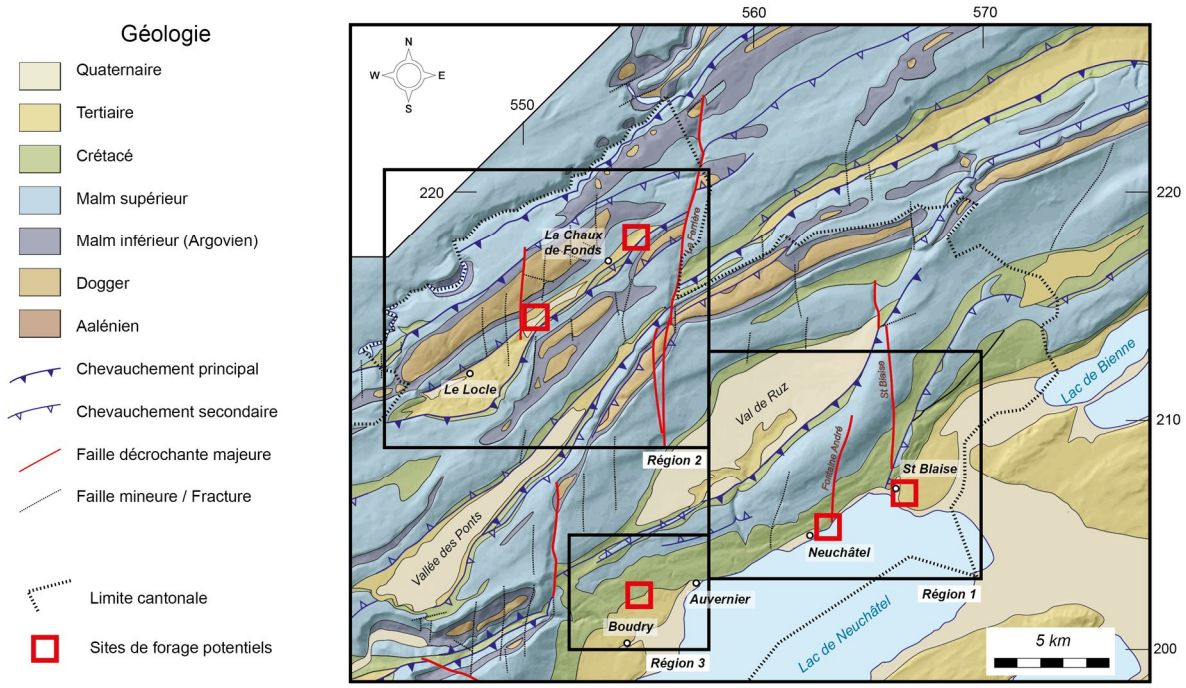



*Figure 2. Carte tectonique du canton de Neuchâtel avec les trois régions d'investigation (rectangles noirs) et les cinq sites de forage potentiels (carrés rouges)*

### Scénario 1 – Prospection par forage de 5 sites

Dans le cadre d'un investissement financier très conséquent, un projet de prospection par forage des ressources géothermiques à l'échelle cantonale, serait mis en place, comprenant une série de profils sismiques 2D et un forage d'exploration dans chacun des cinq sites sélectionnés par le projet GeoNE.

Les profils sismiques permettront de calibrer les modèles géologiques 3D. Chaque forage d'exploration devra traverser l'ensemble des aquifères potentiels et atteindre le socle cristallin. Les diagraphies et tests de production permettront de caractériser les ressources énergétiques de chacun des aquifères profonds. La réalisation de ce scénario permettra d'obtenir une bonne estimation des capacités énergétiques de chaque aquifère à l'échelle cantonale. Pour réaliser ce programme de prospection, le budget est estimé entre 50 et 55 millions de francs.

### Scénario 2 – Prospection par forage de 2 sites

Dans le cadre d'un investissement financier important, un projet de prospection par forage des ressources géothermiques serait mis en place sur deux sites sélectionnés, comprenant une campagne d'acquisition sismique 2D, ainsi qu'un forage d'exploration par site.

Les profils sismiques permettront de calibrer les modèles géologiques 3D. Chaque forage d'exploration devra traverser l'ensemble des aquifères potentiels et atteindre le socle cristallin. Les diagraphies et tests de production permettront de caractériser les ressources énergétiques de chacun des aquifères profonds. La réalisation de ce scénario permettra d'obtenir pour chaque site une bonne estimation des capacités énergétiques de chaque aquifère et fournira des informations pouvant être extrapolées à l'échelle du canton. Pour réaliser ce programme de prospection, le budget est estimé entre 20 et 22 millions de francs.

### Scénario 3 – Prospection par forage de 1 site

Dans le cadre d'un investissement financier limité, la zone de St-Blaise serait retenue pour sélectionner le site de développement optimum des ressources géothermiques profondes.

Préalablement, des profils sismiques 2D permettront d'améliorer le modèle géologique 3D. Sur le site choisi, sera réalisé un forage d'exploration qui devra traverser l'ensemble des aquifères potentiels et atteindre le socle cristallin. Les diagraphies et tests de production permettront de caractériser les ressources énergétiques de chaque aquifère pour le site de St-Blaise. Les informations pourront aussi apporter des données de haute qualité sur le potentiel géothermique du littoral Est. Pour réaliser ce programme de prospection, le budget est estimé entre 12 et 13 millions de francs.

### Scénario 4 – Prospection par forage de ressources à faible température sur 3 sites

Dans le cadre d'un investissement financier limité, trois sites seraient retenus pour prospecter des ressources géothermiques à faible température. Il s'agit essentiellement des aquifères du Malm et du Dogger, à moins de 1'000 m de profondeur et à une température de moins de 30°C. Cette option nécessiterait la création de réseaux de chauffage à distance à basse température, couplés à des pompes à chaleur décentralisées.

Des profils sismiques permettront de calibrer la géométrie des formations géologiques des trois sites sélectionnés. Chaque forage d'exploration devra traverser les aquifères potentiels du Malm et du Dogger. Les diagraphies et tests de production permettront de caractériser les ressources énergétiques des deux aquifères traversés. La réalisation de ce scénario permettra d'obtenir pour chaque site une bonne estimation des capacités énergétiques des aquifères et fournira des informations pouvant être extrapolées à l'échelle régionale.

Ce type de ressource géothermique à faible température et son utilisation sont envisageables dans toutes les régions du canton. Ce scénario inclurait trois forages d'exploration à proximité de nouveaux sites de consommateurs de chaleur à basse température (Ecoquartier, quartier Minergie, nouveau site industriel, centre thermal, etc.). Pour réaliser ce programme de prospection, le budget est estimé entre 8 et 9 millions de francs.

## TABLE DES MATIERES


CHAPITRE I. OBJECTIFS, DEMARCHE ET BILAN DU PROGRAMME GEONE 1

1. SITUATION ET EXPLOITATION DE LA GEOTHERMIE PROFONDE 1

1.1 GEOTHERMIE DES AQUIFERES PROFONDS 1

1.2 MODES D'EXPLOITATION DES AQUIFERES PROFONDS 1

2. ENGAGEMENT DU PROGRAMME GEONE 4

2.1 CONCEPTION DU PROGRAMME GEONE 4

2.2 HISTORIQUE DES ETUDES GEOTHERMIQUES DANS LE CANTON DE NEUCHATEL 4

2.3 ETAT DES CONNAISSANCES DES AQUIFERES PROFONDS AU DEBUT DU PROGRAMME GEONE 5

3. OBJECTIFS DU PROGRAMME GEONE 7

3.1 FEUILLE DE ROUTE 7

3.2 TRANSFERT DE TECHNOLOGIE 8

3.3 DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES HYDROTHERMAUX 9

4. ORGANISATION ET BILAN DU PROGRAMME GEONE 10

4.1 GROUPE DE PROJET 10

4.2 SERVICES ET PRESTATIONS EXTERIEURS 10

4.3 GROUPE DE LIAISON ET CONTACTS AVEC LES AUTORITES CANTONALES ET LES SOCIETES D'ENERGIE 11

4.4 BILAN DU PROGRAMME GEONE 12

5. BIBLIOGRAPHIE 16

CHAPITRE II. METHODOLOGIE 17

1. AVANT-PROPOS 17

2. GEOLOGIE REGIONALE ET MODELISATION GEOLOGIQUE 3D 20

2.1 INTRODUCTION 20

2.2 STRATIGRAPHIE ET FORMATIONS AQUIFERES 20

2.3 STRATIGRAPHIE ET FORMATIONS AQUIFERES 23

2.4 MODELISATION 3D DES AQUIFERES PROFONDS 25

2.5 BIBLIOGRAPHIE 28

3. MODELISATION THERMIQUE 3D 29

3.1 INTRODUCTION 29

3.2 PRINCIPE DE CALCUL DE LA TEMPERATURE 29

3.3 BIBLIOGRAPHIE 32

**4. METHODE GRAVIMETRIQUE** **33**
4.1 LES REGIONS ETUDIEES 33
4.2 LES CORRECTIONS GRAVIMETRIQUES 36
4.3 CARTE D'ANOMALIES BOUGUER ET DESCRIPTION DES CARTES D'ANOMALIES RESIDUELLES 41
4.4 MODELISATION DIRECTE 44
4.5 BIBLIOGRAPHIE 50
**5. INTRODUCTION A LA METHODE DE SISMIQUE REFLEXION** **51**
5.1 PLANIFICATION D'UNE CAMPAGNE SISMIQUE 53
5.2 PROFILS SISMIQUES SYNTHETIQUES PREVISIONNELS 53
5.3 BIBLIOGRAPHIE 55
**6. MESURE DES GAZ DANS LES SOLS** **56**
6.1 BASES DE LA METHODE 56
6.2 MESURES DE $CO_2$ ET HE DANS LE CANTON 56
6.3 ANALYSES ET TRAITEMENT DES DONNEES 58
6.4 BIBLIOGRAPHIE 58

**CHAPITRE III. RESULTATS DE LA PROSPECTION GEOTHERMIQUE DE LA REGION NEUCHATEL – ST BLAISE** **61**

**1. INTRODUCTION** **61**
**2. MODELISATION GEOLOGIQUE 3D DE LA REGION NEUCHATEL-ST BLAISE** **62**
2.1 INTRODUCTION 62
2.2 MODELE GENERAL DE LA REGION DE NEUCHATEL - ST BLAISE 62
2.3 VALIDATION DU MODELE GEOLOGIQUE PAR LA GRAVIMETRIE 64
2.4 MODELE DETAILLE DE LA REGION DE NEUCHATEL-ST BLAISE 74
**3. MODELISATION DES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ET ANALYSE DES ZONES DE FRACTURATION** **76**
3.1 MODELISATION DANS LES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES 76
3.2 MODELE POUR LA ZONE NEUCHATEL 76
3.3 MODELE POUR LA ZONE ST BLAISE 82
3.4 PROSPECTION DES GAZ DE SOLS 87
3.5 ETUDE DE SITES DE FORAGE POTENTIEL 95
**4. POTENTIEL GEOTHERMIQUE** **98**
4.1 MODELE THERMIQUE REGIONAL 98
4.2 MODÈLES THERMIQUES DE DÉTAIL 102

**5. POTENTIEL D'UTILISATION DE LA CHALEUR 106**
5.1 INTRODUCTION 106
5.2 TRAVAUX REALISES 106
5.3 MODES D'EXPLOITATION DE LA CHALEUR GEOTHERMIQUE 107
5.4 POSSIBILITES DE VALORISATION A NEUCHATEL - MONRUZ 109
5.5 POSSIBILITES DE VALORISATION A ST-BLAISE - MARIN 109
5.6 REMARQUES FINALES ET CONCLUSIONS 111
**6. PROJET D'UNE CAMPAGNE SISMIQUE 113**
6.1 PROFILS SISMIQUES SYNTHETIQUES PREVISIONNELS 113
6.2 PLANIFICATION D'UNE CAMPAGNE D'ACQUISITION DE MESURES SISMIQUES 114
**7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 118**
7.1 COMPARAISON DES ZONES DE MONRUZ ET ST BLAISE 118
7.2 SELECTION D'UN SITE DE FORAGE 119
7.3 RECOMMANDATIONS 119
7.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 121

**CHAPITRE IV. RESULTATS DE LA PROSPECTION GEOTHERMIQUE DE LA REGION LE LOCLE - LA CHAUX-DE-FONDS 123**

**1. INTRODUCTION 123**
**2. MODELISATION GEOLOGIQUE 3D 124**
2.1 INTRODUCTION 124
2.2 MODELE GENERAL DE LA REGION LE LOCLE – LA CHAUX DE FONDS 124
2.3 MODELE DETAILLE DE LA REGION LE LOCLE – LA CHAUX DE FONDS 126
2.4 VALIDATION DU MODELE GEOLOGIQUE PAR LA GRAVIMETRIE 128
**3. MODELISATION DES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ET ANALYSE DES ZONES DE FRACTURATION 146**
3.1 MODELISATION DANS LES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES 146
3.2 MODELE POUR LA ZONE LA CHAUX-DE- FONDS 147
3.3 MODELE POUR LA ZONE CRET-DU-LOCLE 147
3.4 ETUDE DE SITES DE FORAGE POTENTIELS 148
**4. POTENTIEL GEOTHERMIQUE 152**
4.1 MODELE THERMIQUE REGIONAL 152
4.2 MODÈLES THERMIQUES DE DÉTAIL 156

**5. POTENTIEL D'UTILISATION DE LA CHALEUR 159**
5.1 INTRODUCTION 159
5.2 ETUDE DES SYSTEMES HYBRIDES POUR VALORISER LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE A LA CHAUX-DE-FONDS 160
5.3 SYNTHESE DES RESULTATS 163
**6. PROJET D'UNE CAMPAGNE SISMIQUE 165**
6.1 PROFILS SISMIQUES SYNTHETIQUES PREVISIONNELS 165
6.2 PLANIFICATION D'UNE CAMPAGNE D'ACQUISITION DE MESURES SISMIQUES 167
**7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 171**
7.1 COMPARAISON DES ZONES DE LA CHAUX-DE-FONDS EST ET CRET-DU-LOCLE 171
7.2 SELECTION D'UN SITE DE FORAGE 172
7.3 RECOMMANDATIONS 174
7.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 174

**CHAPITRE V. RESULTATS DE LA PROSPECTION GEOTHERMIQUE DE LA REGION AUVERNIER - BOUDRY 175**

**1. INTRODUCTION 175**
**2. MODELISATION GEOLOGIQUE 3D 176**
2.1 INTRODUCTION 176
2.2 MODELE DE LA REGION AUVERNIER– BOUDRY 176
2.3 VALIDATION DU MODELE GEOLOGIQUE PAR LA GRAVIMETRIE 177
**3. MODELISATION DES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ET ANALYSE DES ZONES DE FRACTURATION 185**
3.1 MODELE POUR LE SITE DE COTTENDART 185
3.2 ETUDE DE SITES DE FORAGE POTENTIEL POUR LE SITE DE COTTENDART 186
**4. POTENTIEL GEOTHERMIQUE 188**
4.1 MODÈLES THERMIQUES DE DÉTAIL 188
**5. POTENTIEL D'UTILISATION DE LA CHALEUR 191**
5.1 INTRODUCTION 191
5.2 TRAVAUX REALISES 191
5.3 MODES D'EXPLOITATION DE LA CHALEUR GEOTHERMIQUE 191
5.4 POSSIBILITES DE VALORISATION A COLOMBIER 192
5.5 CONCLUSIONS 194
**6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 195**
6.1 CONCLUSION 195
6.2 SELECTION D'UN SITE DE FORAGE 196

6.3 RECOMMANDATIONS 196
6.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 198

**CHAPITRE VI. ASPECTS TECHNOLOGIQUES 199**

**1. PROJET DE FORAGE 199**
1.1 PHASES DES PROJETS DE GEOTHERMIE PROFONDE 199
1.2 CHOIX D'UN SITE ET CONCEPT DE FORAGE 201
1.3 APPAREILS ET CHANTIER DE FORAGE 202
1.4 MESURES ET TESTS DES FORAGES 205
1.5 EQUIPEMENT DES FORAGES 205
1.6 COUT ET ECONOMIE DU PROJET 206
**2. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX 208**
2.1 INTRODUCTION 208
2.2 EXAMEN DES PRINCIPAUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX 208
2.3 ACCEPTATION SOCIALE DU PROJET 216
**3. ESTIMATION ET MINIMISATION DES RISQUES LORS DU DEVELOPPEMENT D'UN PROJET GEOTHERMIQUE 217**
3.1 INTRODUCTION 217
3.2 RISQUES GEOLOGIQUE ET D'EXPLORATION 218
3.3 CLES POUR MINIMISER LES RISQUES D'UN PROJET 218
3.4 RISQUES FINANCIERS 219
**4. POTENTIEL DES SYSTEMES GEOTHERMIQUES STIMULES 220**
4.1 CONCEPT TECHNIQUE ET ETAT DES CONNAISSANCES 220
4.2 QUESTIONS EN SUSPENS ET PROBLEMES A RESOUDRE 222
4.3 SITUATION DES PROJETS EGS DANS LE MONDE 222
4.4 PROJECTIONS A MOYEN TERME ET SITUATION EN SUISSE 224
4.5 POTENTIEL ET INTERET DES EGS POUR LE CANTON DE NEUCHATEL 225
4.6 BIBLIOGRAPHIE 226

**CHAPITRE VII. TRANSFERT DE TECHNOLOGIE 229**

**1. BUT DU TRANSFERT DE TECHNOLOGIE 229**
**2. CONFERENCES GEONE 2010 230**
2.1 CONFERENCE GEONE-1 230
2.2 CONFERENCE GEONE-2 (24.11.10) 230
2.3 RESULTAT ET BILAN DES CONFERENCES GEONE 2010 231

**3. ATELIERS DE GEOTHERMIE GEONE 2012** **233**

3.1 ATELIER GEONE-1 : METHODES D'ECHANTILLONNAGE ET MESURES PHYSICO-CHIMIQUES DES FLUIDES GEOTHERMIQUES 233

3.2 ATELIER GEONE-2 : APPROCHE DE LA MODELISATION GEOLOGIQUE 3D AVEC GEOMODELLER 234

**4. FORMATION CONTINUE DU CAS DEEGEOSYS** **235**

4.1 INTRODUCTION 235

4.2 ORGANISATION DU COURS 235

4.3 PARTICIPANTS 236

4.4 PROGRAMME DU CAS DEEGEOSYS 2011-2012 236

4.5 ENSEIGNEMENT POUR LE CAS DEEGEOSYS 239

**CHAPITRE VIII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES** **241**

**1. CONCLUSIONS** **241**

1.1 CONCLUSIONS PAR REGION 242

1.2 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 245

**2. RECOMMANDATIONS DU COMITE SCIENTIFIQUE** **247**

2.1 PRESENTATION DU COMITE 247

2.2 DEVELOPPEMENT DES ASPECTS DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNIQUE 247

2.3 COMMENTAIRES ET RECOMMANDATIONS SUR LE PROJET GEONE 248

**3. PROGRAMME D'ACTIVITE DU CENTRE DE COMPETENCE EN GEOTHERMIE POUR LE DEVELOPPEMENT DE FUTURS PROJETS DANS LE CANTON** **250**

3.1 GEONE – PROGRAMME DE PHASE 2 250

3.2 GEONE – PROGRAMME DE PHASE 3 252

**ANNEXES** **255**

**1. ANNEXES CHAPITRE II** **255**

**2. ANNEXES CHAPITRE VII** **267**

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

# Rapport final de la Phase 1

## Chapitre I.
## Objectifs, démarche et bilan du programme GeoNE

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I. OBJECTIFS, DEMARCHE ET BILAN DU PROGRAMME GEONE 1

1. SITUATION ET EXPLOITATION DE LA GEOTHERMIE PROFONDE ..... 1
1.1 GEOTHERMIE DES AQUIFERES PROFONDS ..... 1
1.2 MODES D'EXPLOITATION DES AQUIFERES PROFONDS ..... 1
2. ENGAGEMENT DU PROGRAMME GEONE ..... 4
2.1 CONCEPTION DU PROGRAMME GEONE ..... 4
2.2 HISTORIQUE DES ETUDES GEOTHERMIQUES DANS LE CANTON DE NEUCHATEL ..... 4
2.3 ETAT DES CONNAISSANCES DES AQUIFERES PROFONDS AU DEBUT DU PROGRAMME GEONE ..... 5
3. OBJECTIFS DU PROGRAMME GEONE ..... 7
3.1 FEUILLE DE ROUTE ..... 7
3.2 TRANSFERT DE TECHNOLOGIE ..... 8
3.3 DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES HYDROTHERMAUX ..... 9
4. ORGANISATION ET BILAN DU PROGRAMME GEONE ..... 10
4.1 GROUPE DE PROJET ..... 10
4.2 SERVICES ET PRESTATIONS EXTERIEURS ..... 10
4.3 GROUPE DE LIAISON ET CONTACTS AVEC LES AUTORITES CANTONALES ET LES SOCIETES D'ENERGIE ..... 11
4.4 BILAN DU PROGRAMME GEONE ..... 12
5. BIBLIOGRAPHIE ..... 16

## LISTE DES FIGURES

Figure I - 1. Schéma d'un système d'exploitation d'un aquifère profond par doublet géothermique. 1. Forages de production et de réinjection. 2. Echangeurs de chaleur. 3. Centrale électrique : turbine et générateur (si la température le permet). 4. Système de refroidissement à air. 5. Réseau de chauffage à distance.....2

Figure I - 2. Diagramme des différentes utilisations possibles de la chaleur des aquifères profonds (Source : CREGE, 2009).....3

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I - 1. Domaine des débits considérés pour les trois aquifères profonds du canton de Neuchâtel (Groupe de travail PDGN, 2010). .....5

Tableau I - 2. Résumé des caractéristiques moyennes des principaux sites retenus (Groupe de travail PDGN, 2010).....6

Tableau I - 3. Groupe de projet du laboratoire de géothermie - CREGE.....10

Tableau I - 4. Compagnies mandatées pour certaines investigations, qui ont eu lieu dans le cadre du programme GeoNE. .....11

# Chapitre I. Objectifs, démarche et bilan du programme GeoNE

## 1. Situation et exploitation de la géothermie profonde

### 1.1 Géothermie des aquifères profonds

La limite à partir de laquelle le terme de ressource géothermique profonde est utilisé a été fixée à 400 m de profondeur en Suisse et en Allemagne. Dans le cadre de cette étude, des investigations ont été conduites sur l'ensemble des formations géologiques sédimentaires profondes susceptibles d'être aquifères (Groupe de travail PGN, 2008; Groupe de travail PDGN, 2010). Dans le Canton de Neuchâtel, au-delà de 2'000 à 2'500 m de profondeur environ, on atteint généralement le toit du socle cristallin, qui peut également se comporter de manière aquifère, mais cette formation n'a pas été évaluée. L'eau présente dans ces formations géologiques est plus ou moins chaude et minéralisée en fonction de la durée de son parcours, des roches traversées et de la profondeur qu'elle a atteinte. Les paramètres clés de la réussite d'une prospection géothermique sont évidemment la température du réservoir et le débit de production par puits.

Les plus anciennes exploitations de ressources géothermiques profondes sont représentées par le thermalisme qui utilise des remontées exceptionnelles en surface de ces fluides chauds. Etant donné qu'il n'existe pas de telles manifestations dans le canton de Neuchâtel, ni d'ailleurs de forages d'une profondeur supérieure à 400 m pour l'eau, le pétrole ou le gaz, les premiers forages géothermiques pour investiguer les fluides profonds seront évidemment des forages d'exploration. Les informations concernant les aquifères potentiels profonds les plus proches du territoire neuchâtelois se trouvent soit dans la région d'Yverdon-les-Bains, soit dans la région de Lyss (Seeland).

L'exploitation thermique classique des aquifères profonds consiste à capter des fluides géothermiques au moyen de forages, à les amener à la surface par pompage, à en extraire la chaleur à des fins de chauffage ou de production électrique, puis à les réinjecter en profondeur.

### 1.2 Modes d'exploitation des aquifères profonds

Dans la plupart des cas, les fluides contenus dans les aquifères profonds sont moyennement à fortement minéralisés et contiennent certains gaz en quantité plus ou moins abondante, ce qui les rend impropres à la consommation et n'autorise pas de les rejeter après refroidissement dans une rivière, un lac, ou dans une nappe phréatique de faible profondeur. Après l'usage thermique de ces fluides profonds, il est par conséquent, nécessaire de les refouler dans le même aquifère au moyen d'un second forage (puits d'injection), et ainsi éviter tout impact sur l'environnement. L'autre avantage notoire de ce mode d'exploitation est de conserver la totalité du fluide dans l'aquifère et de n'extraire que la chaleur, ce qui permet de maintenir la pression hydraulique dans le forage de production et de ne pas augmenter les coûts de pompage au cours du temps.

Dans le cas rare où les eaux souterraines profondes ne sont que faiblement minéralisées et non sulfurées, il est envisageable, après refroidissement, d'obtenir l'autorisation d'évacuer l'eau dans le réseau hydrographique de surface (OFEN, 1998). Un seul puits de production (singlet) suffira alors.

Dans la plupart des installations, le fluide géothermique est produit par une pompe électrique immergée placée dans la partie supérieure du forage (50-300 m). Dans quelques rares cas où la pression artésienne de l'aquifère est suffisamment élevée, le forage est mis en production sans pompe.

Le mode d'exploitation à deux puits est appelé un doublet géothermique (Figure I - 1). Un forage de production apporte l'eau chaude à la surface au moyen de la pompe immergée vers un échangeur de chaleur situé à proximité de la tête de puits. Celui-ci permet immédiatement de transmettre l'énergie géothermique à un circuit secondaire, ce qui évite les problèmes de corrosion et de dépôt dans les conduites du réseau de chauffage par l'eau géothermale.

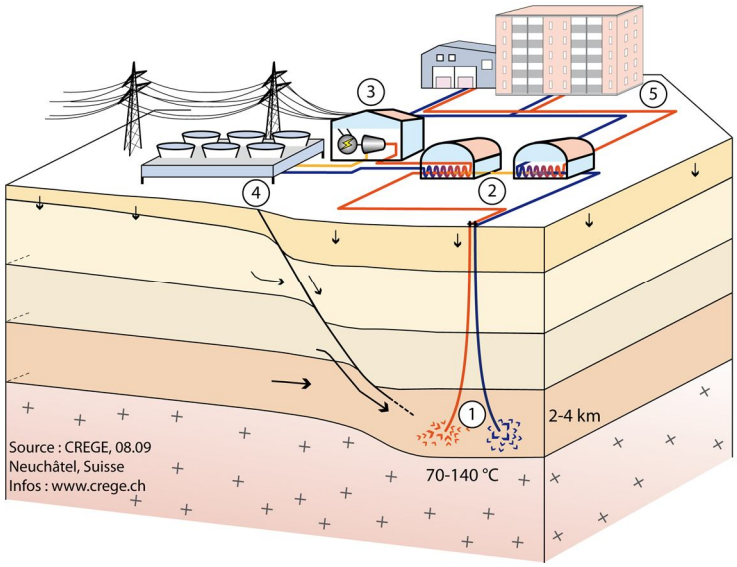



*Figure I - 1. Schéma d'un système d'exploitation d'un aquifère profond par doublet géothermique. 1. Forages de production et de réinjection. 2. Echangeurs de chaleur. 3. Centrale électrique : turbine et générateur (si la température le permet). 4. Système de refroidissement à air. 5. Réseau de chauffage à distance.*

Afin d'éviter un court-circuit provoqué par une circulation trop rapide dans l'aquifère entre le forage de production et le forage d'injection et par conséquent l'arrivée du front froid après quelques années seulement, la base des puits doit se situer à une distance suffisante – généralement entre 300 et 1'500 m, selon la profondeur, la perméabilité et le débit de production. Depuis les premières réalisations géothermiques, la typologie des doublets a évolué. Si, dans les années 1970, on utilisait généralement des puits verticaux espacés en surface, depuis les années 1980, on réalise les deux forages à partir d'une plate-forme commune à quelques mètres l'un de l'autre et l'on atteint l'espacement voulu en profondeur grâce à une déviation d'un ou des deux forages. Néanmoins, dans le cas de l'installation de Riehen (BS), les deux forages ont été forés en 1988-89 verticalement et à environ 1 km de distance, car il s'agissait de la première installation du genre en Suisse et du premier forage géothermique profond de la région bâloise.

En cas de température insuffisante pour un usage direct dans un CAD (chauffage à distance), une pompe à chaleur (PAC) peut être utilisée afin de rehausser le niveau de température et d'augmenter la production de chaleur. Une autre option consiste à construire une centrale hybride (bivalente) avec une autre source d'énergie (bois, déchets, etc.). Dans ce cas, la chaleur géothermique sert à préchauffer le retour du fluide du CAD. Les niveaux de température nécessaires à l'exploitation d'un système de chauffage varient sensiblement selon le type de bâtiment et la valorisation de la chaleur géothermique d'un aquifère doit tenir compte de ce paramètre dès les premières investigations (Figure I - 2).

Une option récente, consiste à utiliser une ressource géothermique de moyenne profondeur (1000 – 1500 m) pour alimenter un nouveau réseau de chaleur à basse température qui fournit de l'énergie à un quartier de bâtiments à basse consommation.

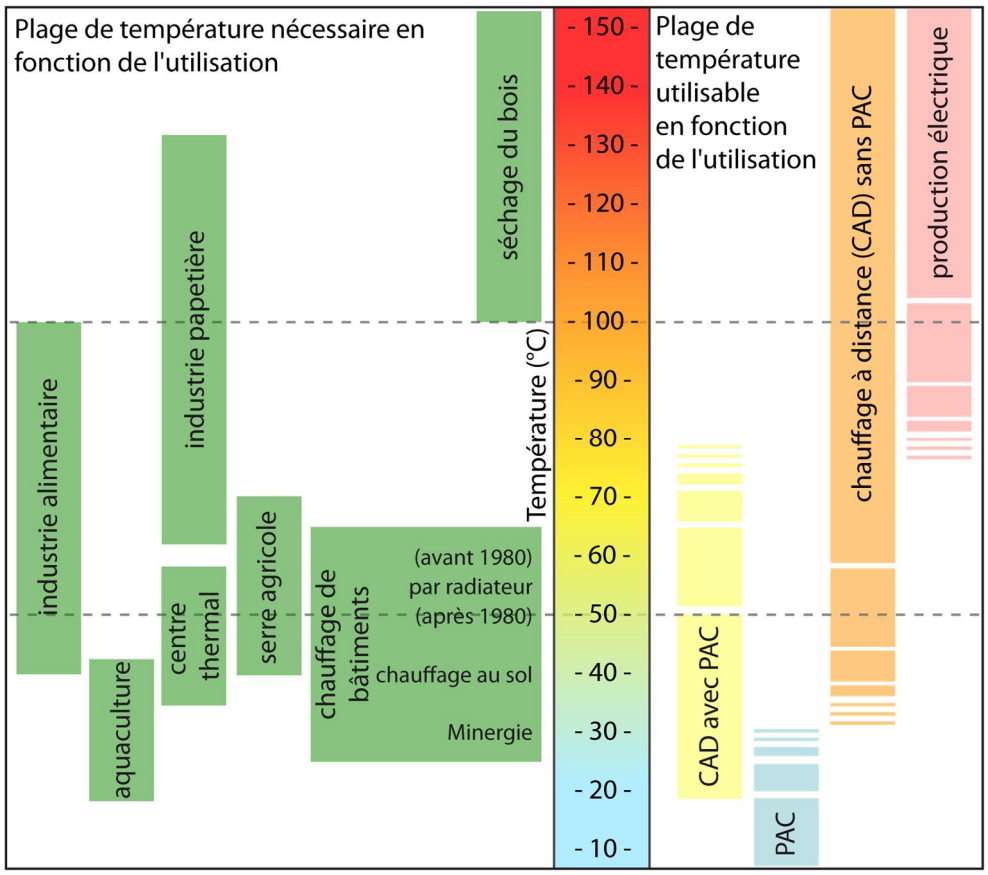



*Figure I - 2. Diagramme des différentes utilisations possibles de la chaleur des aquifères profonds (Source : CREGE, 2009).*

# 2. Engagement du programme GeoNE

## 2.1 Conception du programme GeoNE

Au printemps 2010, les conclusions et les recommandations concernant le potentiel des aquifères profonds du projet PDGN (Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel) étaient connues. Intéressées à mettre en place les conditions pour le développement de la géothermie profonde sur le territoire, les autorités cantonales, respectivement le Service de l'énergie et de l'environnement (SENE) et le Service de l'économie (DEC), ont mandaté le CREGE, Laboratoire de géothermie de l'Université de Neuchâtel, pour concevoir et réaliser le programme GeoNE.

En plus de la volonté de développer quelques projets ciblés pour utiliser la chaleur des aquifères profonds, les autorités ont souhaité d'une part renforcer le centre de compétence en géothermie de l'Université. Finalement, elles ont également demandé que le CREGE assurer le transfert de la technologie acquise et développée lors de des investigations de GeoNE auprès des bureaux de géologues et d'ingénieurs sur le canton et les régions voisines. In fine, cette action avait pour but la création de postes de travail et l'aide à des entreprises pour devenir les intervenants majeurs des futurs projets de géothermie.

Le programme GeoNE a officiellement débuté en mai 2010 et s'est terminé en juillet 2012.

## 2.2 Historique des études géothermiques dans le canton de Neuchâtel

Le canton de Neuchâtel est encore pauvre en données du sous-sol profond. En effet, il n'y a aucun forage d'une profondeur supérieure à 450 m réalisé sur son territoire. Les seuls huit forages entre 300 et 450 m sont tous des puits forés dans le Malm pour la production d'eau potable. Aucun forage de prospection gazière, pétrolière ou géothermique n'a été réalisé jusqu'à ce jour, bien que des campagnes de sismique réflexion aient été exécutées dans les années 1970 et 1980 pour l'exploration pétrolière.

Une première étude sur les possibilités de la géothermie profonde sur le littoral neuchâtelois a été financée par l'Office fédéral de l'énergie (Matthey, 1986). Dix ans plus tard, le Service cantonal de l'énergie a mandaté une étude préliminaire concernant un projet de géothermie profonde à Marin (Borreguero, 1996). En 2004, ce même service a demandé une étude de faisabilité d'un chauffage à distance basé sur la géothermie pour le site de Marin-Epagnier (Tecnoservice Engineering, 2004).

Dans la foulée des études du potentiel géothermique des cantons romands, une première évaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN) a été réalisée entre 2007 et 2008. Cette étude, intégralement financée par la Fondation ProTechno, a été réalisée par un groupe de travail de spécialistes des différentes disciplines concernées, formé et conduit par le CREGE, à l'époque appelé Centre de recherche en géothermie de Neuchâtel. Cette étude portait aussi bien sur les aquifères profonds que sur les sondes géothermiques verticales, les géostructures énergétiques et l'exploitation thermique des nappes phréatiques (Groupe de travail PGN, 2008).

A la suite des conclusions et recommandations du projet PGN, le Service cantonal de l'énergie a mandaté le CREGE pour effectuer une évaluation quantitative plus détaillée du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel dans les quatre domaines mentionnés et participer à la mise en application des recommandations du rapport final. De plus, il a été décidé qu'un cinquième type de ressource serait examiné lors de ce projet : le potentiel thermique des eaux de surface. L'étude proposée a été intitulée Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel –

PDGN. Ce programme a débuté dès la fin 2008 par la constitution d'un groupe de travail composé de spécialistes provenant du réseau de compétences du CREGE et de membres des différents services concernés du canton (Groupe de travail PDGN, 2010). Cette étude s'est achevée au milieu de 2010, avec des recommandations précises pour la suite du développement de la géothermie profonde dans le canton.

## 2.3 Etat des connaissances des aquifères profonds au début du programme GeoNE

La section Potentiel des Aquifères Profonds de l'étude PDGN (Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel) est arrivée à un certain nombre de résultats qui ont servi comme base de travail pour le programme GeoNE. Les principaux résultats de PDGN sont résumés ci-dessous.

Les trois aquifères profonds potentiels étudiés sont le Malm, le Dogger et le Muschelkalk. Des valeurs moyennes de profondeur, de débit et de température ont été fixées pour chaque aquifère. D'autre part, le potentiel géothermique par doublet a été calculé pour chaque aquifère, ainsi que le nombre de doublets géothermiques théoriques pour la superficie du canton.

En l'absence de forages profonds et de modélisation thermique, il était difficile de prévoir des anomalies positives ou négatives de la température et du gradient géothermique. Par défaut, un gradient de 30 °C·km$^{-1}$ a été utilisé, sachant que localement, les effets des circulations karstiques peuvent refroidir fortement l'aquifère du Malm.

Dans l'évaluation des débits, le problème est le même et il n'est pas possible d'extrapoler les conditions de perméabilité des formations proches de la surface à des formations géologiques situées entre 500 et 2'000 m de profondeur. En l'absence de nouvelles données, Ce sont les débits moyens du cas « roche saine », utilisés au cours de l'étude PDGN pour les trois aquifères profonds, qui ont été attribués de manière conservative pour l'étude GeoNE (Tableau I - 1).

*Tableau I - 1. Domaine des débits considérés pour les trois aquifères profonds du canton de Neuchâtel (Groupe de travail PDGN, 2010).*

| **Débit (l·s$^{-1}$)** | **Malm** | **Dogger** | **Muschelkalk** |
|---|---|---|---|
| Roche saine | 15 – 20 | 10 – 15 | 10 - 15 |
| Roche tectonisée | 20 – 40 | 15 – 30 | 15 - 20 |

Ensuite, 38 sites de forages potentiels ont été examinés sur une dizaine de communes, en fonction de paramètres précis (structure géologique, réseau de chauffage à distance, nombre d'habitants, superficie et disponibilité des parcelles pour implanter un forage). Finalement, une deuxième sélection de dix sites comprenant le plus de critères favorables a été réalisée et est présentée dans le Tableau I - 2. C'est sur cette base que les trois sites régions d'étude ont pu être choisis dès le début du programme GeoNE.

*Tableau I - 2. Résumé des caractéristiques moyennes des principaux sites retenus (Groupe de travail PDGN, 2010).*

| **Aquifère** | | **Malm** | | | **Dogger** | | | **Muschelkalk** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Régions** | **Sites retenus** | Prof (m) (1) | T (°C) (2) | P (MWth) (3) | Prof (m) (1) | T (°C) (2) | P (MWth) (3) | Prof (m) (1) | T (°C) (2) | P (MWth) (3) |
| Boudry | Buchilles | 600 | 29 | 1.4 | 1150 | 45 | 1.3 | 1750 | 63 | 1.7 |
| Colombier | Aérodrome Planeyse | 550 | 27 | 1.2 | 1150 | 45 | 1.3 | 1750 | 63 | 1.7 |
| La Chaux-de-Fonds | CISA Stand de tir | 450 | 19 | 0.7 | 900 | 33 | 0.7 | 1450 | 51 | 1.1 |
| Fleurier | Acacias | 550 | 24 | 1.2 | 1200 | 44 | 1.4 | 2150 | 72 | 1.8 |
| Le Locle | Collège des Jeanneret | 400 | 18 | 0.6 | 875 | 32 | 0.6 | 1650 | 57 | 1.4 |
| St Blaise-Marin-Epagnier | Le Loclat Cité des Sors | 625 | 30 | 1.5 | 1075 | 43 | 1.2 | 1750 | 63 | 1.7 |
| Neuchâtel | Les Saars | 350 | 21 | 0.8 | 850 | 36 | 0.8 | 1550 | 58 | 1.5 |

(1) Prof : profondeur moyenne de l'aquifère (m)

(2) T : température moyenne de l'aquifère (°C)

(3) P : puissance thermique du forage de production (MWth) : P géo = $\rho$ Cp·D·ΔT

- $\rho$ : masse volumique du fluide en kg·m$^{-3}$
- Cp : chaleur spécifique en J·kg$^{-1}$·°C$^{-1}$
- D : débit en m$^{3}$·s$^{-1}$
- ΔT : différence entre la température de production et celle de réinjection en °C

Les températures de réinjection du fluide géothermique et les débits considérés dans le calcul de la puissance sont les suivants :

- Température de réinjection : Malm (10 °C), Dogger (20 °C), Muschelkalk (30 °C).
- Débit de production : Malm (15-20 l·s$^{-1}$), Dogger (10-15 l·s$^{-1}$), Muschelkalk (10-15 l·s$^{-1}$).

# 3. Objectifs du programme GeoNE

Le programme GeoNE a été élaboré sur la base des conclusions et recommandations pour les ressources géothermiques profondes rédigées dans le rapport final du Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel (Groupe de travail PDGN, 2010). Les projets PDGN et GeoNE se sont succédés dans la continuité, comme d'ailleurs le projet PDGN, qui avait débuté dès la fin de la première étude du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (Groupe de travail PGN, 2008).

Le programme GeoNE avait pour but de développer la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Les connaissances géologiques, hydrogéologiques et thermiques étant encore lacunaires dans les roches sédimentaires à plus de 400 m de profondeur, et au toit du cristallin, cela ne permettait pas de débuter immédiatement un forage d'exploration sur un site choisi.

Des phases préliminaires ont été prévues dans le programme GeoNE, incluant un programme d'exploration avec la réalisation d'un modèle géologique 3D, de campagnes de mesures gravimétriques et d'une modélisation des températures et de la productivité.

Dans une première phase, des investigations ont été engagées sur les seuls aquifères profonds localisés dans les formations sédimentaires, même si la partie altérée au sommet du socle cristallin offre un grand potentiel pour la co-production d'électricité et de chaleur. Un certain nombre d'incertitudes devaient d'abord être levées lors de la prospection.

L'unité de transfert de technologie du Laboratoire de géothermie de l'Université de Neuchâtel avait pour tâche de permettre la réalisation d'installations géothermiques produisant de la chaleur à moyen terme, puis de l'électricité à long terme dans le canton du Neuchâtel. Pour atteindre cet objectif, il était prévu de fournir les mesures et calculs essentiels pour débuter l'exploration concrète de trois sites dans le canton de Neuchâtel. De plus, dans le cadre du transfert de technologie, les connaissances nécessaires en géothermie et en prospection géologique/géophysique devaient être progressivement transférées aux bureaux d'ingénieurs et géologues, en particulier dans le canton de Neuchâtel.

L'unité de transfert de technologie est intégrée au Laboratoire de géothermie et la direction du Laboratoire s'occupe du développement de concepts et de programmes pour ce domaine. Le responsable pour la réalisation des projets géothermiques s'est occupé en particulier de la géothermie dans le canton de Neuchâtel. Pour la période 2010-2012, un collaborateur a été engagé pour le domaine de l'exploration géologique et géophysique.

## 3.1 Feuille de route

Dans le cadre du programme GeoNE, le Laboratoire de géothermie a conduit, entre 2010 et 2012, les activités suivantes :

- Le transfert de technologie pour les ingénieurs impliqués dans la réalisation d'installations géothermiques et la mise à disposition pour les spécialistes, des résultats et des recherches du Laboratoire; 2 à 4 bureaux par an sont en principe concernés.
- Le développement des systèmes hydrothermaux dans le canton de Neuchâtel (2 à 5 sites pour la période 2010-2012).

Les résultats ont été présentés au Geothermal Investment Center (GIC) essentiellement sous la forme de rapports semestriels en août et en février des années considérées.

# 3.2 Transfert de technologie

## 3.2.1 Dossiers et conférences pour l'industrie et les bureaux d'ingénieurs

### DOSSIER SUR LES 3 SITES SELECTIONNES

- Introduction générale à la géothermie, les conditions nécessaires pour la production de chaleur et d'électricité et les concepts généraux d'exploration des sites.
- Une description géologique/hydrogéologique des trois sites avec un résumé des données existantes et utiles pour l'évaluation du site et l'exploration.
- Programme de développement des sites avec un plan d'exploration à court terme et un plan d'utilisation à long terme.

### PREPARATION DE CONFERENCES POUR LES BUREAUX D'INGENIEURS ET L'INDUSTRIE

#### *Conférence sur le potentiel de la géothermie dans le canton du Neuchâtel*

- But : Information aux institutions publiques et à l'industrie sur le potentiel de la géothermie à Neuchâtel
- Présentation de l'étude « Potentiel du développement de la géothermie à Neuchâtel - PDGN » et des 3 dossiers
- Propositions d'investissement pour l'industrie
- Mise en évidence du succès :
    - 30 participants, 10 % de participants internationaux
    - 3 projets financés par l'industrie ou les services publics dans le cadre du développement de la géothermie en 2010-2011

#### *Conférence d'information sur le programme de transfert de technologie du Laboratoire de géothermie*

- But : Information aux bureaux d'ingénieurs et à l'industrie sur les possibilités du programme de transfert de technologie et du potentiel de la géothermie à Neuchâtel
- Présentation des 3 dossiers
- Présentation d'une collaboration existante dans le programme de transfert de technologie
- Propositions de collaborations avec des bureaux d'ingénieurs
- Mise en évidence du succès :
    - 30 participants, 10 % de participants internationaux
    - Etablissement de 3 projets en collaboration avec des bureaux d'ingénieurs (en 2010)

### 3.2.2 Fonctionnement du Programme Transfert de technologie

#### FORMATION DES ENTREPRISES (PROGRAMME DE FORMATION CONTINUE)

- Concept général des cours d'une formation continue en géothermie profonde (CAS DEEGEOSYS)
- Contact avec des intervenants potentiels
- Concept financier

## 3.3 Développement de systèmes hydrothermaux

### 3.3.1 Étude de préfaisabilité

#### *Synthèse des données géologiques, hydrogéologiques et thermiques sur trois sites*

- Concept de prospection géologique/géophysique/géochimique
- Modélisation géologique 3D (3 sites)

### 3.3.2 Etude de faisabilité

- Planning, coordination et supervision des campagnes géophysiques, étude d'impact; information au public
- Préparation : prospection gravimétrique sur trois sites et test d'autres méthodes (+ achat du gravimètre)

Les objectifs du programme GeoNE qui s'inscrivent dans le cadre du développement de la géothermie à Neuchâtel sont les suivants : l'unité de transfert de technologie du Laboratoire de Géothermie contribue activement à la réalisation d'installations géothermiques profondes pour produire de la chaleur à moyen terme, puis de l'électricité à long terme dans le canton du Neuchâtel.

Pour atteindre ces objectifs, il était prévu de fournir les mesures, les calculs et les modèles nécessaires afin de débuter l'exploration concrète de trois sites dans le canton de Neuchâtel. Ces nouvelles connaissances en géothermie et en prospection géologique/géophysique ont été acquises selon le programme prévu lors de la Phase 1 du programme GeoNE.

# 4. Organisation et bilan du programme GeoNE

## 4.1 Groupe de projet

Les conclusions et recommandations des chapitres concernant la géothermie profonde dans les rapports finaux des deux précédentes études du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (Groupe de travail PGN, 2008 ; Groupe de travail PDGN, 2010), ont bien sûr orienté les objectifs du programme GeoNE, la détermination des cibles géothermiques et la formation du groupe de projet.

Le groupe de projet GeoNE (Tableau I - 3) a mené les travaux nécessaires sur le terrain, au laboratoire et au bureau, d'une part pour évaluer les sites les plus favorables pour le développement du potentiel géothermique profond du canton et d'autre part pour donner, aux services cantonaux d'abord, mais également aux futurs chefs de projets, aux bureaux d'ingénieurs et aux compagnies de production/distribution d'énergie, des recommandations permettant un développement harmonieux des aquifères profonds. La majorité des investigations, ainsi que la coordination et la gestion de l'étude, ont été réalisées par le Laboratoire de Géothermie (CREGE) à Neuchâtel.

*Tableau I - 3. Groupe de projet du Laboratoire de géothermie - CREGE*

| **Nom, Fonction** | **Activités dans le programme GeoNE** |
|---|---|
| Prof. Eva Schill, géologue, géophysicienne | Cheffe de projet, coordination avec le comité scientifique, responsable des finances |
| Dr. François-D. Vuataz, hydrogéologue, géothermicien | Responsable du transfert de technologie (conférences, formation continue), coordination avec les intervenants extérieurs, édition des rapports intermédiaires et du rapport final |
| Dr. Guillaume Mauri, géophysicien | Campagnes de gravimétrie, interprétation et modélisation des données gravimétriques, édition et mise en page du rapport final |
| Dr. François Negro, géologue | Modélisation géologique 3D, modèles thermiques |
| Nicolas Clerc, géologue | Planification de campagnes sismiques et réalisation des coupes sismiques synthétiques |
| Dr. Yassine Abdelfettah, géophysicien | Développement d'outil de traitement et d'interprétation des données géophysiques |
| Dr. Niels Giroud, géochimiste | Prospection des gaz des sols |
| Dr. Luca Guglielmetti, géologue | Modèles thermiques détaillés |
| Laurent Marguet, technicien | Campagnes de gravimétrie, gestion de l'équipement |

## 4.2 Services et prestations extérieurs

Comme un certain nombre d'investigations ne faisaient pas partie des compétences de l'équipe de projet du Laboratoire de géothermie, ces dernières ont été mandatées à deux bureaux d'ingénieurs et à un laboratoire de l'EPFL (Tableau I - 4).

*Tableau I - 4. Compagnies mandatées pour certaines investigations, qui ont eu lieu dans le cadre du programme GeoNE.*

| **Institution, Localité** | **Prestation pour le programme GeoNE** |
|---|---|
| Bureau B. Matthey Ing. Cons. SA, Montézillon | Scénarios possibles à mettre en œuvre pour valoriser l'eau de forages géothermiques sur le littoral neuchâtelois, en particulier dans les régions de Neuchâtel et de St-Blaise-Marin, novembre 2011 |
| Geowatt AG, Zurich | Modèles de température et de potentiel géothermique, octobre 2011 |
| Laboratoire d'Energétique Industrielle - LENI, EPFL, Lausanne | Systèmes hybrides pour les installations de géothermie profondes : cas d'étude de La Chaux-de-Fonds, juin 2011 |

## 4.3 Groupe de liaison et contacts avec les autorités cantonales et les sociétés d'énergie

Divers contacts ont eu lieu avec les services de l'Etat de Neuchâtel et des villes durant la période du programme GeoNE, par le biais de conférences, de présentations et de séances de travail.

- M. Thierry Grosjean, Conseiller d'Etat, chef du département de l'Economie (DEC)
- M. Jean-Luc Bochatay, Promotion économique, Service de l'économie (DEC)
- M. Yves Lehmann, Chef du Service de l'énergie et de l'environnement (SENE)
- M. Marc Schaffner, Service de l'énergie et de l'environnement (SENE)
- M. Jean-François Zürcher, Président du Swiss Geothermal Network (SGnet)
- Prof. François Zwahlen, Gérant Président du Geothermal Investment Centre (GIC).
- Mme Isabelle Butty, Hydrogéologue, Service de l'énergie et de l'environnement (SENE)
- M. Christophe Denervaud, Géologue cantonal, Service de l'aménagement du territoire
- M. Maurice Grunig, Délégué à l'énergie de la Ville de La Chaux-de-Fonds
- M. Christian Trachsel, Délégué à l'énergie de la Ville de Neuchâtel
- M. Ian Forrer, Délégué à l'énergie de la Ville du Locle
- M. Laurent Gacon, Ingénieur à VITEOS
- M. Jean-Pierre Authier, Président de CADBAR
- M. Antoine Grandjean, Vice-président de VADEC
- M. Giovanni Tarantino, Directeur technique de VADEC

# 4.4 Bilan du programme GeoNE

## 4.4.1 Compétences développées pendant le programme GeoNE

### DESCRIPTION

À Neuchâtel, les structures de la recherche et du développement de la géothermie au début du programme GeoNE étaient les suivantes. Au niveau de la recherche, l'Université de Neuchâtel a créé une chaire de géothermie en 2009, qui début 2010 a regroupé l'ancien groupe de recherche du Centre de Recherche en Géothermie (CREGE) et le Laboratoire de géothermie. Ces deux entités ont fusionné au sein de l'Université de Neuchâtel et sont devenues officiellement le Laboratoire de géothermie - CREGE. La stratégie du nouveau CREGE regroupait deux phases :

- Une première phase, qui devait permettre de déterminer les besoins et les lacunes des bureaux d'ingénieurs et des industries suisses actives en géothermie profonde et de mettre en place les solutions appropriées pour permettre l'essor de la production de chaleur et d'électricité par la géothermie en Suisse.
- Une deuxième phase, qui comprenait le développement de méthodes d'exploration géothermiques, ainsi que la publication scientifique de ces méthodes et de leurs résultats dans différents projets.

Dans le cadre de la première phase, la stratégie du nouveau CREGE consistait à créer de fortes collaborations avec les bureaux d'ingénieurs et l'industrie pour connaître et analyser les défis les plus importants pour le développement de la géothermie en Suisse. Avant et pendant le programme GeoNE, le CREGE s'engagea dans d'autres projets en Suisse, notamment ceux de St. Gall, Winterthur, Zürich, Bâle, Riehen, Bienne, AGEPP, Saillon, Brigerbad, GP La Côte et Genève. La grande majorité de ces projets concerne les ressources hydrothermales, qui étaient jugées comme les plus appropriées pour une première phase de développement de la géothermie profonde en Suisse, et qui permettaient de nouer un fort lien scientifique et technique avec les objectifs fixés (ressources hydrothermales et les aquifères cibles) dans le canton du Neuchâtel. Dans le même temps, le CREGE a continué à développer des connaissances dans l'exploration et la création des projets de géothermie stimulée (EGS) dans les projets de recherche à Soultz-sous-Forêts (France). Le CREGE a également fourni son expertise pour de nouveaux acteurs industriels de la géothermie helvétique, tels que Axpo Neue Energie AG et Geo-Energie Suisse.

Pendant cette première phase, il est devenu évident qu'il y avait un manque très important de connaissances et d'experts en géothermie profonde en Suisse. Pour cette raison, le CREGE a mis en place deux types de programme :

- Une formation universitaire standard avec un nouveau programme de Master en hydrogéologie et géothermie, qui a débuté en 2010 à l'Université de Neuchâtel.
- Une formation continue pour garantir une formation professionnelle, qui satisfait les besoins urgents de l'industrie pour développer la géothermie profonde en Suisse. Cette formation continue, intégrée à l'Université de Neuchâtel, est un certificat d'études avancées (CAS) en systèmes géothermiques profonds (DEEGEOSYS). Elle a débuté en automne 2011 avec un total de 27 participants.

Parallèlement au développement du CREGE, l'association SGnet (Swiss Geothermal Network), qui a son siège à Neuchâtel et dont le CREGE est représenté au sein de son comité, s'est engagée à continuer sa stratégie de lobbying pour la géothermie profonde. Aujourd'hui, le SGnet est co-auteur du plan d'action d'un groupe d'entreprises électriques suisses, qui est devenu la base du programme de développement de la géothermie en Suisse.

À travers le programme GeoNE, un troisième pilier de la géothermie s'est construit à Neuchâtel, avec la création d'un groupe d'expert en géothermie profonde, le CREGE, au sein de l'Université de Neuchâtel. Le Laboratoire de géothermie du CREGE, à travers ses compétences universitaires et ses expertises en géothermie permet à la fois au secteur privé (bureaux d'ingénieurs, compagnies d'énergie) et aux autorités cantonales et fédérales d'avoir un partenaire privilégié dont les expertises et les connaissances sont adaptées pour concevoir, engager et réaliser les phases des projets en géothermie profonde qui concerne la prospection et la valorisation des ressources du sous-sol. Le programme GeoNE est l'exemple du savoir-faire du CREGE.

Dans le cadre de la deuxième phase de la stratégie du CREGE, différentes compétences scientifiques et techniques, qui sont décrites dans le chapitre II Méthodologie, ont été développées pendant le programme GeoNE. Cette deuxième phase se termine actuellement à travers plusieurs méthodes d'explorations géothermales développées par le CREGE. Certaines d'entre elles, comme celle sur le projet de gravimétrie financée par la CTI, sont commercialisées en partenariat avec le secteur privé. Ces partenaires sont en particulier des bureaux d'ingénieurs. Au niveau scientifique et académique, le CREGE est dans une phase de communication des résultats à travers des publications scientifiques. Un nombre de 5 à 10 publications auront été soumis d'ici la fin 2012.

## LISTE DES COMPETENCES DEVELOPPEES PENDANT LE PROGRAMME GEONE

Les compétences développées au CREGE pendant le programme GeoNE s'orientent selon les besoins de l'exploration géothermique dans le canton de Neuchâtel et à travers le plateau Suisse. Par conséquent, il y a une forte interaction entre les projets de St. Gall, Zürich, Riehen, Bienne et Neuchâtel. Cette situation, a permis au CREGE de non seulement développer des méthodes, mais également de les tester dans les autres projets. Le développement de ces compétences ont été présentés et discutés dans différents congrès scientifiques sous forme de résumés (présentations orales, posters et abstracts). Les travaux effectués sur ces différentes méthodes seront publiés dans des journaux scientifiques dans la prochaine phase jusqu'à la fin 2012.

### *Gravimétrie*

Les plus importantes compétences ont été acquises dans le domaine de la gravimétrie et de la micro-gravimétrie : cela concerne autant les mesures que le traitement des données et leur interprétation.

Abdelfettah Y. & Schill E., 2012. Delineation of geothermally relevant Paleozoic graben structures in the crystalline basement of Switzerland using gravity. Submitted to Society of Exploration Geophysics meeting, Istanbul, 2012.

Schill E., Altwegg P., Abdelfettah Y. & Radogna P.V., 2012. Exploration of structures and determination of porosity changes to the basement. Internat. Geothermal Conf. Freiburg, Germany.

Schill E., Guglielmetti L., Klingler P., Abdelfettah Y. & Alcolea A., 2012. The role of structural changes for geothermal projects in the area of Basel. Proceed. 37th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-194.

Abdelfettah Y. & Schill E., 2011. Accurate gravity data correction and 3D gravity forward modeling code for geophysicist and no-geophysicist users. Swiss Geoscience Meeting 2011, Zürich, Switzerland.

Guglielmetti L., Abdlfettah Y., Schill E., Comina C. & Mandrone G., 2011. Gravity survey in an Alpine crystalline massif showing geothermal activity. Geothermal Resources Council, Transact., 35.

Schill E. & Uhde, J., 2011. Deep geothermal systems – advantages and limitations of using natural permeability. Swiss Geoscience Meeting 2011, Zürich, Switzerland.

### *Modélisation géologique 3D et analyse de la mécanique des systèmes de faille :*

Les compétences acquises dans le domaine de la modélisation géologique se concentrent sur la construction des modèles du sous-sol suisse. Par contre pour l'analyse de la mécanique des failles plusieurs logiciels ont été développés pour analyser les modèles géologiques.

Baillieux P., Schill E., Moresi L., Abdelfettah Y. & Dezayes C., 2012. Investigation of Natural Permeability in Graben Systems: Soultz EGS Site (France): Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-194.

Schill E. & Klingler P., 2011. Increase of productivity in the Riehen geothermal system (Switzerland): Tracer test and reservoir. Mitteilungen der Geotechnik Schweiz, 161.

Schill E. Klingler P. & Schädle K.-H., 2011. Increase of productivity in the Riehen geothermal system (Switzerland): Tracer test and reservoir model. EGU General Assembly, Vienna, Austria.

### *Identification des systèmes de faille en surface*

Des méthodes développées par le CHYN pour l'hydrogéologie ont été appliquées pour la première fois dans des projets géothermiques. Des logiciels pour le traitement et la modélisation du sous-sol ont été développés par le CREGE.

DiTomaso, G., 2011. Identification of internal fault structures in shallow granitic subsurface by very-low frequency measurements, Master thesis, University of Neuchâtel.

### *Intégration des données géologiques, géophysiques et géochimiques*

La force principale du CREGE, qui est unique en Suisse, est la compétence d'intégrer des données d'origine différentes et pertinentes pour la géothermie.

Mauri G., Negro F., Abdelfettah Y., Vuataz F.D. & Schill E., 2011. Multi-disciplinary study for deep geothermal exploration of low enthalpy reservoir, Neuchâtel, Switzerland. AGU General Assembly, San Francisco, USA.

Schill E., Kohl T., Geiermann J., Baujard C., Koch S., Deckert H., Munoz G. & Abdelfettah Y., 2011. Multi-disciplinary prospection approach for EGS reservoirs in the German Variscian basement. Proceed. 36th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-191.

Durant la période du programme GeoNE, le CREGE a établi un laboratoire géothermique en partie avec l'Université de Berne (Laboratoire de la Vue-des-Alpes) pour mesurer toutes les propriétés thermiques des roches utiles pour la prospection et l'évaluation des ressources géothermiques : la conductivité thermique, la capacité thermique et la production de la chaleur.

## 4.4.2 Impact du programme GeoNE sur la géothermie en Suisse

Actuellement en Suisse, la géothermie est développée principalement au niveau des communes avec le support des cantons et l'implication de sociétés productrices d'énergie. Les deux projets les plus avancés de St. Gall (SG) et de AGEPP à Lavey (VD) sont principalement industriels. A Zürich, le projet de Triemli était piloté par les services de la ville. Un consortium incluant les services de la ville, du canton et plusieurs entreprises électriques étaient impliqué dans le projet EGS de Bâle. Le développement futur pour la géothermie en Suisse par contre est guidé par les grandes entreprises électriques, notamment Axpo et BKW et différents consortiums, par exemple, Geo-Energie Suisse. L'ensemble de ces entreprises ont d'une manière ou d'une autre participé au plan d'action suisse pour la géothermie.

La chaire de géothermie de l'Université de Neuchâtel est toujours la seule actuellement en Suisse. Par conséquent, le CREGE est l'institution de référence scientifique pour les projets géothermiques. Le programme GeoNE a permis au CREGE de développer et de valider plusieurs méthodes et logiciels. L'acquisition de ces compétences, a permis au CREGE de participer dans la majorité des projets géothermiques en Suisse. Un exemple est le contrat cadre que le CREGE, à travers l'Unine, a signé avec Axpo Neue Energie AG. Dans la structure de ce contrat, l'Axpo a fixé un lien préférentiel avec le centre de compétences à Neuchâtel. L'autre exemple et l'expertise fournie par le CREGE au sein du comité scientifique de la société Géo-Energie Suisse.

Au niveau international, le CREGE fait partie du comité scientifique du BRGM (France) et conseille ce groupe très actif dans le domaine de la géothermie.

Finalement, le CREGE est devenu une référence pour l'exploration géothermique au niveau Européen. Aujourd'hui le CREGE fait partie du le conseil d'administration de la «European Energy Research Alliance – Joint Program for Geothermal Energy», qui est responsable pour l'exploration des ressources géothermiques.

# 5. Bibliographie

Abdelfettah Y. & Schill E., 2012. Delineation of geothermally relevant Paleozoic graben structures in the crystalline basement of Switzerland using gravity. Submitted to Society of Exploration Geophysics meeting, Istanbul, 2012.

Abdelfettah Y.& Schill E., 2011. Accurate gravity data correction and 3D gravity forward modeling code for geophysicist and no-geophysicist users. Swiss Geoscience Meeting 2011, Zürich, Switzerland.

Baillieux P., Schill E., Moresi L., Abdelfettah Y. & Dezayes C., 2012. Investigation of Natural Permeability in Graben Systems: Soultz EGS Site (France): Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-194.

Borreguero M., 1996. Projet d'exploitation géothermique de Marin, Etude préliminaire, GEOREPONSES. 31 pp.

DiTomaso, G., 2011. Identification of internal fault structures in shallow granitic subsurface by very-low frequency measurements, Master thesis, University of Neuchâtel.

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

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.

Guglielmetti L., Abdlfettah Y., Schill E., Comina C. & Mandrone G., 2011. Gravity survey in an Alpine crystalline massif showing geothermal activity. Geothermal Resources Council, Transact., 35.

Matthey B., 1986. Recherche d'un site favorable, Gisement géothermique du Littoral Neuchâtelois Possibilité d'Exploitation à des Fins Thermales ou Géothermiques. Rapport pour l'Office fédéral de l'énergie, 104 pp.

Mauri G., Negro F., Abdelfettah Y., Vuataz F.D. & Schill E., 2011. Multi-disciplinary study for deep geothermal exploration of low enthalpy reservoir, Neuchâtel, Switzerland. AGU General Assembly, San Francisco, USA.

Schill E. & Klingler P., 2011. Increase of productivity in the Riehen geothermal system (Switzerland): Tracer test and reservoir. Mitteilungen der Geotechnik Schweiz, 161.

Schill E. Klingler P. & Schädle K.-H., 2011. Increase of productivity in the Riehen geothermal system (Switzerland): Tracer test and reservoir model. EGU General Assembly, Vienna, Austria.

Schill E., Altwegg P., Abdelfettah Y. & Radogna P.V., 2012. Exploration of structures and determination of porosity changes to the basement. Internat. Geothermal Conf. Freiburg, Germany.

Schill E., Guglielmetti L., Klingler P., Abdelfettah Y. & Alcolea A., 2012. The role of structural changes for geothermal projects in the area of Basel. Proceed. 37th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-194.

Schill E., Kohl T., Geiermann J., Baujard C., Koch S., Deckert H., Munoz G. & Abdelfettah Y., 2011. Multi-disciplinary prospection approach for EGS reservoirs in the German Variscian basement. Proceed. 36th Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-191.

Schill, E. &, Uhde, J., 2011. Deep geothermal systems – advantages and limitations of using natural permeability. Swiss Geoscience Meeting 2011, Zürich, Switzerland.

Tecnoservice Engineering, 2004. Etude de faisabilité: Centrale géothermique Chauffage à distance sur le site de Marin-Epagnier. Rapp. pour le Service cantonal de l'énergie, Neuchâtel.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

# Rapport final de la Phase 1

## Chapitre II.

## Méthodologie

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

CHAPITRE II. METHODOLOGIE 17

1. AVANT-PROPOS ..... 17
2. GEOLOGIE REGIONALE ET MODELISATION GEOLOGIQUE 3D ..... 20
2.1 INTRODUCTION ..... 20
2.2 STRATIGRAPHIE ET FORMATIONS AQUIFERES ..... 20
2.3 STRATIGRAPHIE ET FORMATIONS AQUIFERES ..... 23
2.4 MODELISATION 3D DES AQUIFERES PROFONDS ..... 25
2.5 BIBLIOGRAPHIE ..... 28
3. MODELISATION THERMIQUE 3D ..... 29
3.1 INTRODUCTION ..... 29
3.2 PRINCIPE DE CALCUL DE LA TEMPERATURE ..... 29
3.3 BIBLIOGRAPHIE ..... 32
4. METHODE GRAVIMETRIQUE ..... 33
4.1 LES REGIONS ETUDIEES ..... 33
4.2 LES CORRECTIONS GRAVIMETRIQUES ..... 36
4.3 CARTE D'ANOMALIES BOUGUER ET DESCRIPTION DES CARTES D'ANOMALIES RESIDUELLES ..... 41
4.4 MODELISATION DIRECTE ..... 44
4.5 BIBLIOGRAPHIE ..... 50
5. INTRODUCTION A LA METHODE DE SISMIQUE REFLEXION ..... 51
5.1 PLANIFICATION D'UNE CAMPAGNE SISMIQUE ..... 53
5.2 PROFILS SISMIQUES SYNTHETIQUES PREVISIONNELS ..... 53
5.3 BIBLIOGRAPHIE ..... 55
6. MESURE DES GAZ DANS LES SOLS ..... 56
6.1 BASES DE LA METHODE ..... 56
6.2 MESURES DE $CO_2$ ET HE DANS LE CANTON ..... 56
6.3 ANALYSES ET TRAITEMENT DES DONNEES ..... 58
6.4 BIBLIOGRAPHIE ..... 58

## LISTE DES FIGURES

Figure II - 1. Carte tectonique du canton de Neuchâtel (modifiée d'après groupe de travail PGN, 2008). ....20
Figure II - 2. Colonne stratigraphique synthétique du Jura neuchâtelois. Modifiée d'après Sommaruga (1997) et Valley (2002). La stratigraphie du Trias est extrapolée à partir des données du Jura oriental (d'après Jordan, 1994). ....22
Figure II - 3. Carte tectonique de la zone d'étude avec la localisation des modèles réalisés, modifiée d'après les travaux du groupe de travail PGN (2008). Localisation sur la Figure II - 1. ....23
Figure II - 4. Coupe au travers du Jura neuchâtelois modifiée d'après les travaux du groupe de travail PGN (2008). Localisation de la coupe sur la Figure II - 3. ....24
Figure II - 5. Comparaison des formations prises en comptes entre les modèles régionaux et de détail. ....26
Figure II - 6. Localisation des différents modèles détaillés pour les zones et sites de forage potentiels dans la région Neuchâtel – St-Blaise. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....26
Figure II - 7. Localisation des différents modèles détaillés pour les zones et sites de forage potentiels dans la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....27
Figure II - 8. Localisation des différents modèles détaillés pour les zones et sites de forage potentiels dans la région Auvernier – Boudry. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....28
Figure II - 9. Principe de calcul de la température ....30
Figure II - 10. Principe de calcul de la température pour les modèles Geomodeller. $\lambda$ : conductivité thermique et A : Production de chaleur ....32
Figure II - 11. Carte des stations gravimétriques sur la région de Neuchâtel – St-Blaise 81360 stations de mesures sur 100 km$^2$). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....34
Figure II - 12. Carte des stations gravimétriques sur la région de La Chaux-de-Fonds (617 stations de mesures sur 20 km$^2$). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....34
Figure II - 13. Carte des stations gravimétriques sur la région du Crêt-du-Locle (141 stations de mesures sur 9 km$^2$). ....35

Figure II - 14. Carte des stations gravimétriques sur la région de Bôle et Cottendart (186 stations de mesures sur 16 km$^2$). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).....35
Figure II - 15. Carte des effets du Lac de Neuchâtel sur la région de Neuchâtel – St-Blaise. La densité de l'eau du lac a été fixée à 1.00 g.cm$^{-3}$ (voir texte pour le détail). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....38
Figure II - 16. Carte des effets du Lac de Neuchâtel sur la région d'Auvernier - Boudry. La densité de l'eau du lac a été fixée à 1.00 g.cm$^{-3}$ (Voir texte pour le détail). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....39
Figure II - 17. Cartes des effets des caves sur la région de Neuchâtel – St-Blaise (voir texte pour le détail). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....40
Figure II - 18. Carte Bouguer régionale pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie (Klingele & Olivier, 1980) et des stations gravimétriques GeoNE. Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'étude (voir texte pour le détail).....41
Figure II - 19. Carte gravimétrique résiduelle régionale pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie et des stations gravimétriques GeoNE. La carte résiduelle est la carte Bouguer (Figure II - 18) à laquelle a été soustraite la tendance régionale (Annexe, Figure A04). Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'études (voir texte pour le détail).....42
Figure II - 20. Carte gravimétrique résiduelle de Neuchâtel – St-Blaise. Les lignes blanches en pointillés sont des anomalies gravimétriques qui sont supposées représenter des failles (Voir texte pour le détail). .....44
Figure II - 21. Carte gravimétrique des effets des dépôts post-Mésozoïques pour la région de Neuchâtel – St-Blaise (voir texte pour le détail).....48
Figure II - 22. Carte gravimétrique résiduelle après soustraction (stripping) dépôts post-Mésozoïques pour la région de Neuchâtel – St-Blaise (voir texte pour le détail). .....48
Figure II - 23. Camion vibreur. A chaque point de tir, ces engins mettent le sol en résonance durant une vingtaine de secondes en couvrant une gamme de fréquence prédéfinie. Les vibrations sont transmises au sol par le biais d'une lourde plaque métallique située sous le camion, frappant le sol à la fréquence désirée (Source de l'image : www.dmp.wa.gov.au).....51
Figure II - 24. Principe d'acquisition de sismique réflexion. Une onde acoustique est générée à partir d'une source (camions vibreur, explosifs). Lorsqu'elles rencontrent une interface entre deux couches géologiques présentant un contraste de vitesse de propagation

suffisamment important ($V_1 \neq V_2 \neq V_3$) pour générer un réflecteur sismique, une partie du signal est renvoyé vers la surface où son temps d'arrivée est enregistré par des géophones placés le long de la ligne à investiguer. En connaissant les vitesses de propagation des différentes couches traversées (modèle de vitesse), ces temps d'arrivée (temps double) peuvent être convertis en profondeur, permettant de situer la position des différents réflecteurs dans le sous-sol. ....52

Figure II - 25. Exemple d'une ligne sismique 2D mettant en évidence la géométrie et les profondeurs des différents réflecteurs correspondant aux principales limites de couches géologiques qui forment le sous-sol. ....52

Figure II - 26. Equipement d'échantillonnage et d'analyse des gaz de sols. (1) Tige de cuivre insérée à 80—100 cm de profondeur. (2) Tube de silicone reliant le tube de cuivre à l'analyseur. (3) Analyseur de $CO_2$, $CH_4$ et $O_2$. (4) Tube de silicone reliant la sortie de l'analyseur au sac d'échantillonnage. (5) Sac d'échantillonnage ....57

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II - 1. Propriétés thermiques des roches utilisées dans les modèles de Geowatt. ....30

Tableau II - 2. Propriétés thermiques des roches utilisées dans les modèles Geomodeller ....31

Tableau II - 3. Quantification des incertitudes sur les mesures gravimétriques. ....36

Tableau II - 4. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région de Neuchâtel- St Blaise. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). *Mesurées dans le projet IGS-NE. # Valeurs de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. +Basées sur la littérature. ....46

Tableau II - 5. Quantification des densités des roches formant les dépôts sédimentaires post-Mésozoïques (Tertiaire & Quaternaire) Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de littérature. ....47

Tableau II - 6. Vitesse de propagation des ondes sismiques au sein des principales formations géologiques formant le sous-sol de la région, établies sur la base de mesures de puits dans les forages d'Essertines (VD) et du Risoux (France) (Sommaruga, 1997) et assignées aux modèles géologiques pour la génération des profils sismiques synthétiques. ....54

# Chapitre II. **Méthodologie**

## 1. Avant-propos

Afin de limiter au mieux le risque d'échec des forages (forage non productif ou froid), il est indispensable de réaliser une phase d'exploration des ressources géothermiques profondes de la région d'intérêt. Cette phase est réalisée en utilisant des méthodes assez similaires, sur certains aspects, à celles de l'exploration minière et pétrolière. Une campagne de prospection géothermique profonde doit toujours regrouper le plus possible d'informations relatives à la structure du sous-sol, ainsi que sur les aquifères cibles, dans la limite du budget financier alloué. La structure du sous-sol est déterminée par combinaison des informations géologiques de surface et du sous-sol (types de roche et structures tectoniques) avec des informations géophysiques.

Les investigations géologiques effectuées en surface et dans les forages préexistants apportent des données essentielles pour comprendre le sous-sol et ainsi évaluer le potentiel géothermique des aquifères profonds. Malheureusement ces informations sont souvent ponctuelles et lacunaires dans la zone d'étude et ne suffisent pas pour construire des modèles géologiques en trois dimensions suffisamment fiables afin de planifier les forages d'exploration, ainsi que la phase d'exploitation de la ressource géothermique.

C'est pourquoi, les informations géologiques doivent toujours être associées à des données géophysiques, qui fournissent le long de profils (2D) ou de grilles (3D) des données continues sur les différentes structures géologiques. Il existe beaucoup de méthodes géophysiques (Reynolds, 2011), mais seules quelques-unes apportent des informations fiables sur les structures géologiques localisées à plus de 1'000 mètres de profondeur sous la surface du sol. Les trois principales méthodes sont la sismique réflexion, la gravimétrie et les méthodes électro-magnétiques (AMT ; MT, magnétisme).

Dans le cas d'aquifères profonds en milieu sédimentaire tectonisé, tel que dans la chaîne montagneuse du Jura, les méthodes électro-magnétiques ne permettent pas d'apporter des informations fiables, en raison de la nature des roches sédimentaires, mais aussi à cause des activités humaines, qui créent trop de perturbations anthropiques.

La méthode gravimétrique est couramment utilisée dans le cadre de l'exploration minière, tout spécialement pour mettre en évidence les gisements métallifères et pour la prospection des réservoirs géothermiques de haute température. Plusieurs études ont montré que la gravimétrie pouvait fournir des informations fiables pour localiser des systèmes géothermiques profonds en milieu volcanique notamment, puisque les eaux thermales altèrent les propriétés chimiques et physiques des roches qu'elles traversent, créant des contrastes de variation gravimétrique avec les zones non géothermiques. En milieu, sédimentaire, telle que la chaîne du Jura, la méthode gravimétrique n'est pas pour l'instant couramment utilisée. Toutefois, avec le développement de méthodes de calcul de plus en plus puissantes et précises, l'existence de modèles numériques de terrain de plus en plus précis et des protocoles de mesure adaptés, la gravimétrie apporte des informations de plus en plus fiables et précises sur les structures géologiques profondes. Les résultats de la gravimétrie permettent (Chapitre II, section 4) :

- de valider les modèles géologiques ;
- de déterminer les zones de fracturation ;

- de mettre en évidence à travers les modèles (normaux et inverse) les faiblesses des modèles géologiques et d'apporter des informations pour les améliorer.

La méthode de sismique réflexion est très certainement la méthode la plus utilisée dans le monde industriel pour l'exploration pétrolière et géothermique. Cette méthode donne de très bons résultats d'imagerie des structures géologiques sous certaines conditions (Chapitre II, section 5).

D'un point de vue financier, bien que couramment utilisée par les industries pour différents types d'exploration, la méthode de sismique réflexion reste relativement coûteuse. Le détail des coûts pour deux profils est présenté dans les chapitres III et IV, pour trois zones d'étude du programme GeoNE. La sismique réflexion 3D est un outil très puissant pour visualiser les structures et les réservoirs potentiels. Quelques campagnes de sismique 3D ont été réalisées en Suisse à des coûts très élevés, comme par exemple dans le canton de St-Gall.

Les mesures gravimétriques offrent certes une information moins complète et plus difficile à interpréter que celles de la sismique réflexion, mais la gravimétrie reste bon marché, puisqu'elle est nettement moins lourde à mettre en œuvre sur le plan logistique. Le prix d'une étude pour une surface de 145 $km^2$, comme ce qui a été réalisé pour le programme GeoNE, aura coûté quelques centaines de milliers de francs, en comptant l'achat de l'équipement et la mise au point de la méthodologie. Le coût moins élevé d'une campagne d'acquisition gravimétrique est dû au fait que sa réalisation ne nécessite que deux personnes et un équipement portatif léger, tandis qu'une campagne sismique requiert la mobilisation de plusieurs dizaines de personnes, de plusieurs camions vibreurs, ainsi que le déploiement de plusieurs kilomètres de câbles et des centaines de capteurs. Malgré une différence entre ces deux méthodes quant à la précision des résultats, on peut d'une certaine manière considérer la méthode gravimétrique comme une méthode d'exploration légère et « low cost » en comparaison de la sismique réflexion.

Pour la majorité des projets de géothermie profonde d'envergure, le montant d'une campagne de sismique réflexion 2D complète, reviendrait à quelques millions de francs et représente une charge financière importante.

Dans le cadre du programme GeoNE, une campagne sismique 2D significative à l'échelle du canton aurait consommé la presque totalité du budget. C'est pourquoi, il a été décidé d'utiliser les données sismiques existantes, et de concentrer la collecte de nouvelles informations du sous-sol à l'aide d'une cartographie gravimétrique détaillée de chacune des trois régions d'étude.

Pour étudier les circulations potentielles de fluides profonds dans les systèmes de failles, qui relieraient les aquifères géothermiques prospectés et le sommet du socle cristallin, une étude des gaz des sols a été réalisée dans la région de Neuchâtel – St Blaise.

L'organisation du Chapitre II-Méthodologie traduit la manière dont cette phase d'exploration des ressources géothermique profondes a été réalisée pour le canton de Neuchâtel :

- Les données géologiques et les informations disponibles ont été regroupées et synthétisées pour produire les différents modèles géologiques 3D (Chapitre II, section 2).
- Le potentiel géothermique de chaque région a été étudié en se basant sur les études antérieures et sur les modèles géologiques 3D (Chapitre II, section 3).
- La campagne d'exploration gravimétrique s'est déroulée sur une période de 18 mois pour couvrir chacune des régions d'étude. Les résultats gravimétriques ont permis de valider les modèles géologiques et de mettre en évidence les zones de fracturation. (Chapitre II, section 4).
- La planification de campagnes d'exploration sismique 2D. (Chapitre II, section 5).

- La réalisation d'une étude des gaz des sols ciblée sur les zones de fracturation mises en évidence par la gravimétrie, pour identifier d'éventuelles circulations profondes (Chapitre II, section 6).
- Une description complète des différentes méthodes utilisées dans le cadre du programme GeoNE est présentée dans ce chapitre.

# 2. Géologie régionale et modélisation géologique 3D

## 2.1 Introduction

La chaîne du Jura est classiquement considérée comme une chaîne de plissement d'avant pays correspondant à la zone de déformation externe de l'arc alpin datant du Miocène supérieur. Elle est limitée au SE par le bassin molassique, à l'ouest par le graben de la Bresse et au nord par le graben du Rhin. Le Jura interne (ou Haute chaîne) est composé d'une succession de plis sur rampe, constitués de roches sédimentaires de couverture d'âge Mésozoïque et Cénozoïque détachées de leur socle pré-triasique par un niveau de décollement évaporitique. Ces plis sont recoupés par de nombreux décrochements sénestres, dont l'orientation dessine un éventail le long de la chaîne. Le canton de Neuchâtel est situé dans la partie centrale du Jura interne, à la limite avec la partie septentrionale du bassin molassique (Figure II - 1).

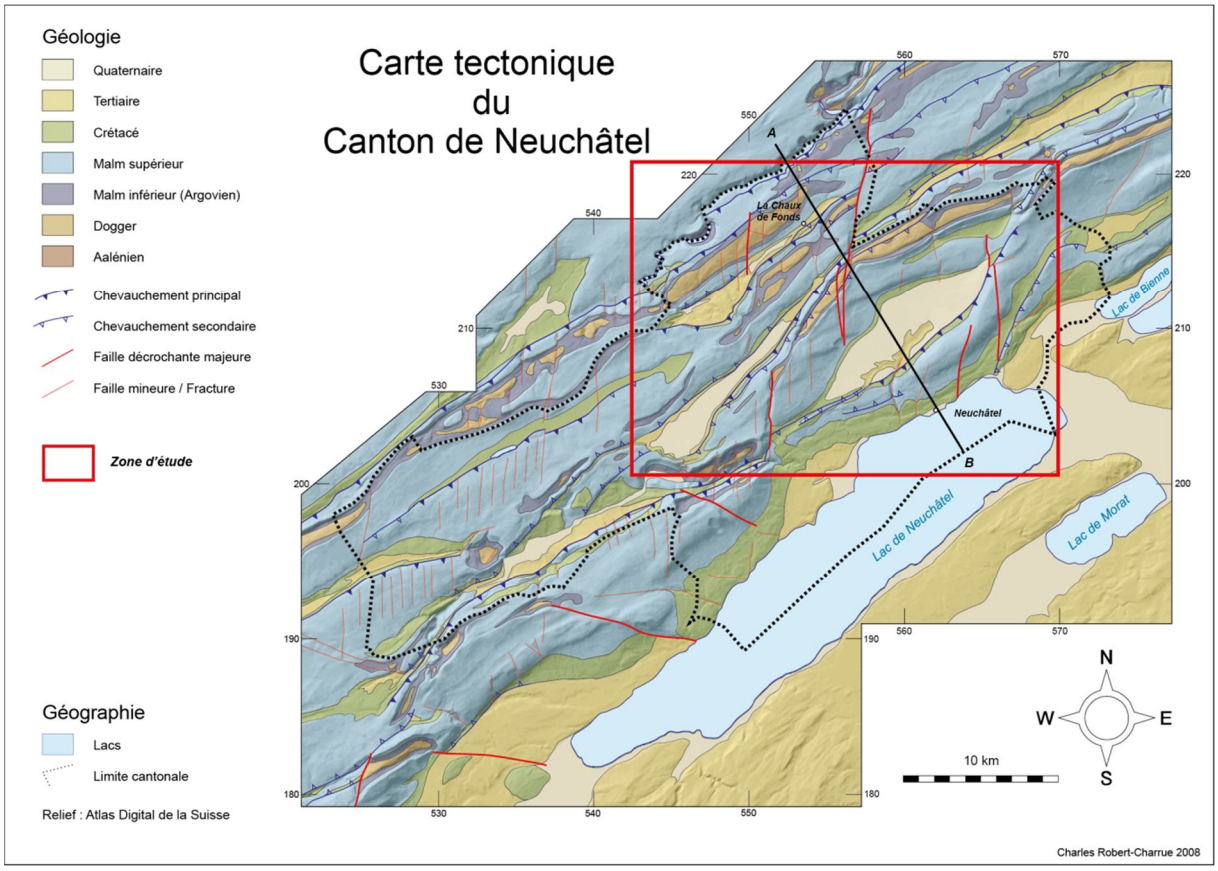



*Figure II - 1. Carte tectonique du canton de Neuchâtel (modifiée d'après groupe de travail PGN, 2008).*

## 2.2 Stratigraphie et formations aquifères

### 2.2.1 Stratigraphie du Jura neuchâtelois

La couverture sédimentaire du Jura, d'une épaisseur d'environ 2500 m, est constituée de roches dont l'âge s'étend du Trias au Miocène (Figure II - 2). Dans le Jura Neuchâtelois, les roches présentes en surface sont essentiellement des calcaires et des marnes d'âge Jurassique à Crétacé inférieur,

surmontées par des dépôts de molasse d'âge Tertiaire et de sédiments quaternaires (Figure II - 1 et Figure II - 2). Le détail des lithologies de différentes formations est donné sur la Figure II - 2. La formation géologique du Trias n'affleure pas dans le canton, les données présentées correspondent à une extrapolation du Jura oriental (Figure II - 2).

Les trois principaux aquifères présents dans le Jura neuchâtelois sont situés dans les calcaires du Malm supérieur (Aquifère 1), du Dogger moyen et supérieur (Aquifère 2) et du Muschelkalk supérieur (Aquifère 3) (Figure II - 2).

### 2.2.2 Aquifère du Malm supérieur (Aquifère 1)

Le Malm supérieur, formé par des calcaires massifs d'une épaisseur d'environ 400 m et fortement karstifiés, constitue l'aquifère le plus important du canton en terme de volume (Figure II - 2). Les débits sont également importants dans les zones karstifiées et les zones de failles. Cependant, c'est un aquifère de peu profond et donc de faible température.

### 2.2.3 Aquifère du Dogger (Aquifère 2)

Le Dogger est constitué d'une alternance de calcaires et de marnes, avec une karstification moins importante que celle du Malm. Les niveaux aquifères sont la dalle nacrée (Callovien), les oolithes du Bathonien et du Bajocien ainsi que les calcaires à entroques du Bajocien (Figure II - 2). La perméabilité et les débits seraient moins importants que dans le Malm, mais les formations du Dogger sont à plus grande profondeur, ce qui en fait un aquifère intéressant pour une exploitation géothermique. Dans le forage d'Hermrigen (Seeland, BE), l'aquifère du Dogger, situé à une profondeur comprise entre 1150 et 1450 m, atteint une température de 50°C.

### 2.2.4 Aquifère du Muschelkalk supérieur (Aquifère 3)

Les formations du Muschelkalk supérieur n'affleurent pas dans le canton mais sont connues dans le Jura oriental et grâce aux forages profonds comme celui d'Hermrigen. Le Muschelkalk supérieur est constitué de dolomies et calcaires coquillers à une épaisseur d'environ 80 m. Dans le forage d'Hermrigen (Seeland, BE), l'aquifère du Muschelkalk, situé à une profondeur de 2000 m, atteint une température de 85°C.

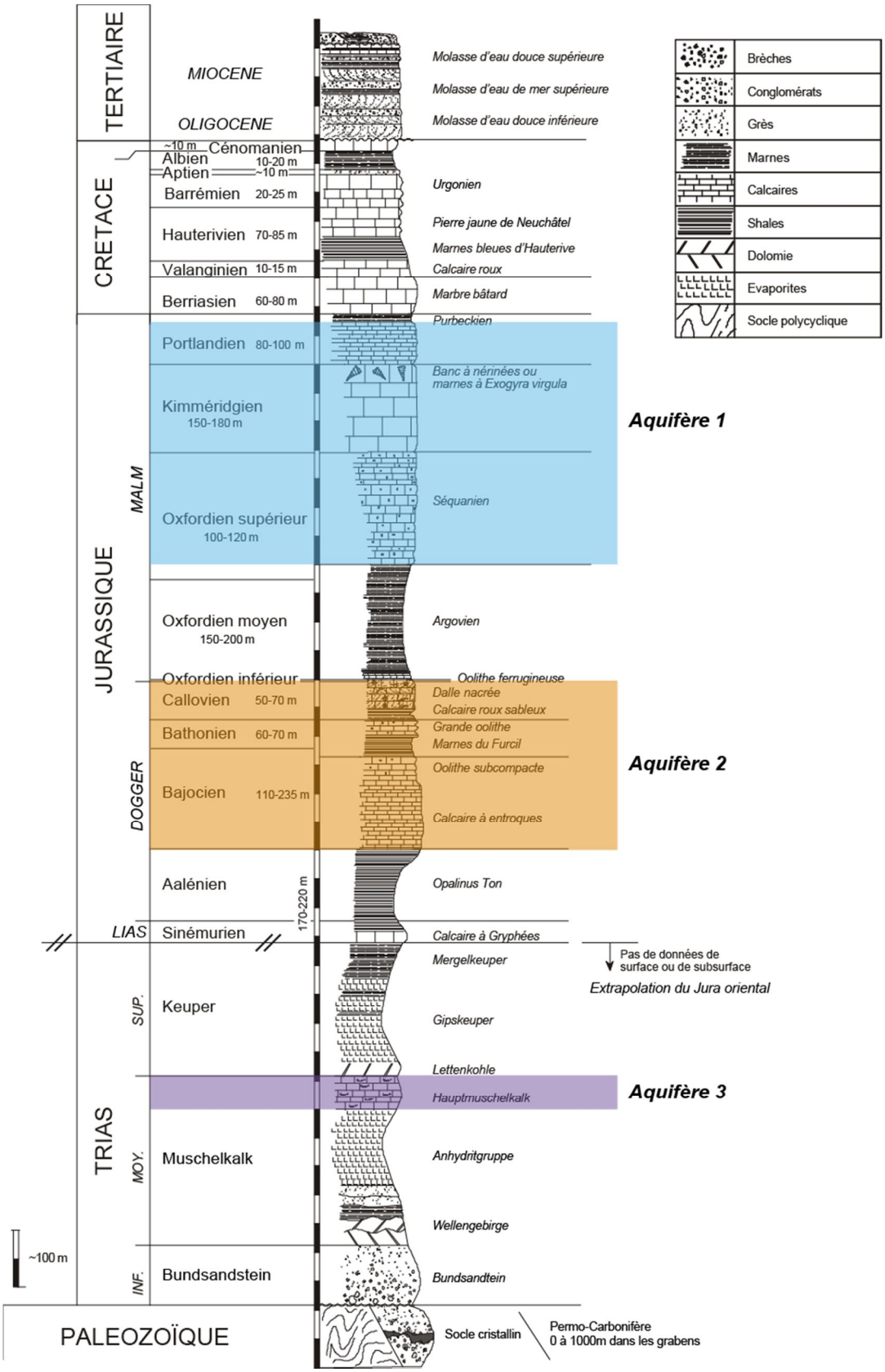



*Figure II - 2. Colonne stratigraphique synthétique du Jura neuchâtelois. Modifiée d'après Sommaruga (1997) et Valley (2002). La stratigraphie du Trias est extrapolée à partir des données du Jura oriental (d'après Jordan, 1994).*

# 2.3 Stratigraphie et formations aquifères

## 2.3.1 Structure régionale

D'un point de vue structural, le Jura est composé par une succession de plis développés sur des chevauchements à vergence NO durant le Cénozoïque. L'orientation des axes des plis est globalement NE-SO à l'échelle régionale (Figure II - 1). Ces plis sont recoupés par une série de décrochements sénestres d'orientation NNE-SSO, d'amplitude et de taille variable (Figure II - 1). D'après les données de sismique réflexion disponibles, ces failles affectent l'ensemble de la couverture méso-cénozoïque, mais aucun décalage n'a été observé dans le toit du socle (Sommaruga, 1997). L'existence de grabens permo-carbonifères n'a pas été mise en évidence par les profils de sismique réflexion dans cette partie du Jura (Sommaruga, 1997).

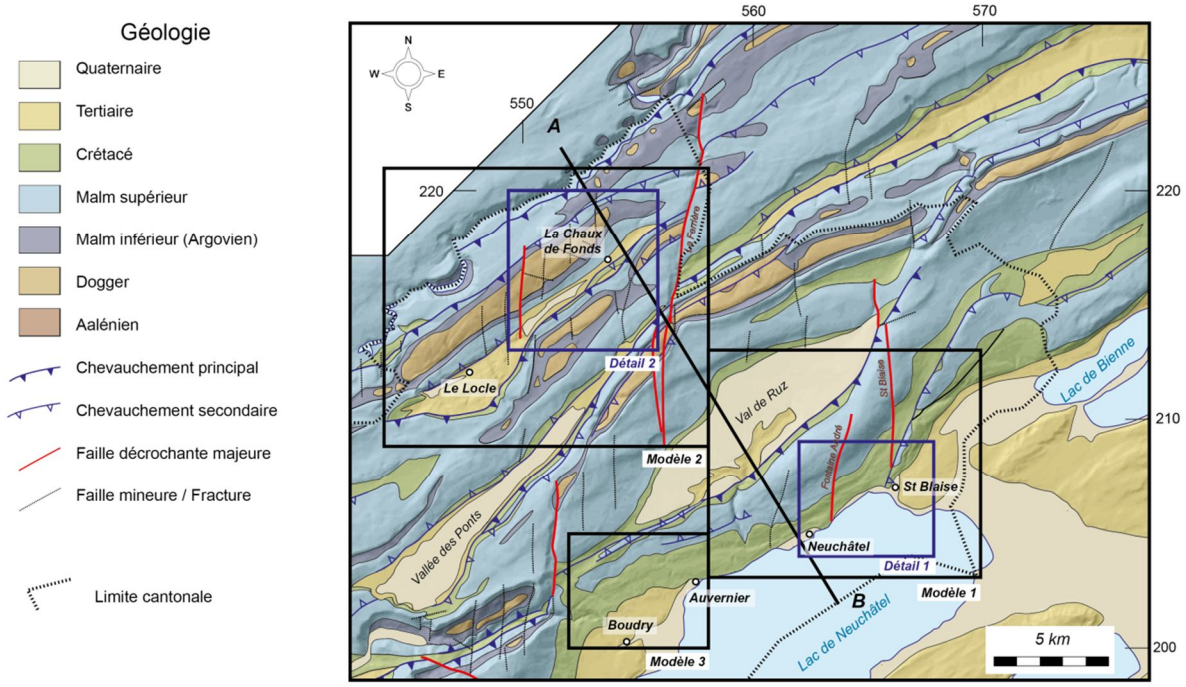



*Figure II - 3. Carte tectonique de la zone d'étude avec la localisation des modèles réalisés, modifiée d'après les travaux du groupe de travail PGN (2008). Localisation sur la Figure II - 1.*

## 2.3.2 Structure dans la région de Neuchâtel-La Chaux de Fonds

La structure de la zone d'étude, située entre Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds, est composée d'une succession de six grands plis sur rampe. La structure générale de cette zone est représentée sur la coupe de la Figure II - 4. Les anticlinaux, qui forment les principaux reliefs, sont constitués par les calcaires du Dogger et du Malm supérieur. Les synclinaux, qui forment les vallées, comme le Val-de-Ruz ou la Vallée des Ponts, sont constitués par le remplissage de sédiments tertiaires et quaternaires, qui reposent sur les calcaires du Crétacé (Figure II - 3). Ces plis sont recoupés par des systèmes de failles en décrochement d'orientation NNE-SSW, comme le décrochement de la Ferrière dans la région de La Chaux-de-Fonds, le décrochement de St-Blaise ou le décrochement de Fontaine-André dans la région de Neuchâtel et St-Blaise (Figure II - 3). L'ensemble des plis dans cette région a une orientation NE-SO, qui peut être localement modifiée par le mouvement sénestre le long des décrochements les plus importants et qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

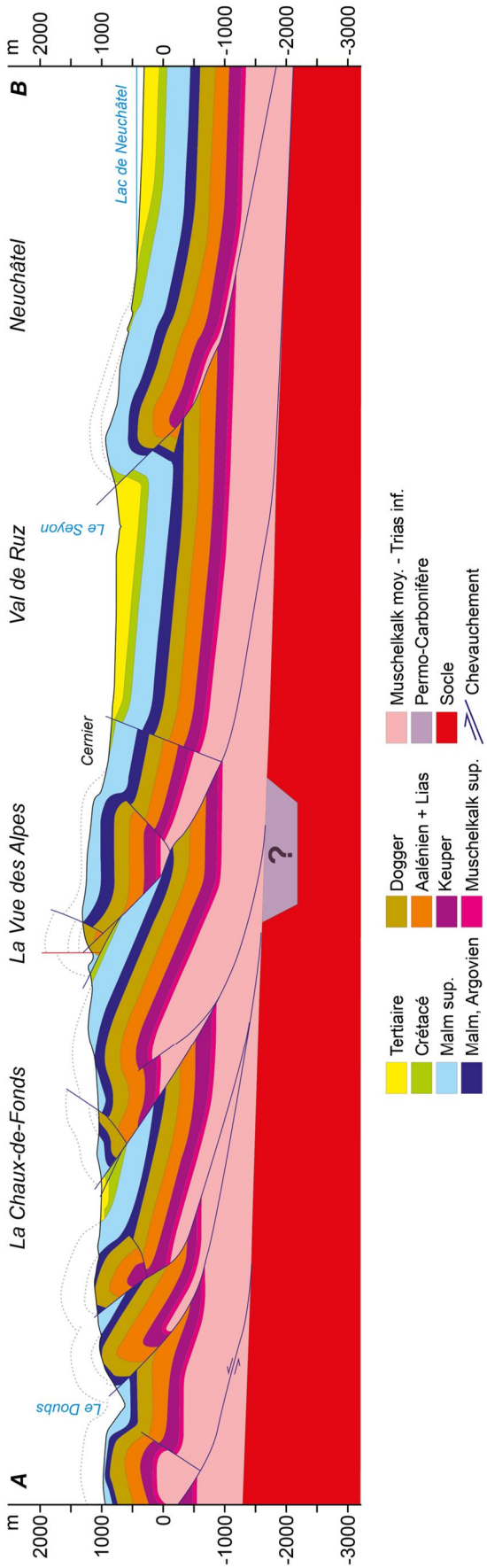



*Figure II - 4. Coupe au travers du Jura neuchâtelois modifiée d'après les travaux du groupe de travail PGN (2008). Localisation de la coupe sur la Figure II - 3.*

# 2.4 Modélisation 3D des aquifères profonds

## 2.4.1 Méthodologie

Une série de modèles géologiques 3D a été réalisée afin de mieux contraindre la géométrie des aquifères profonds potentiels pour une exploitation géothermique. Ces modèles ont été réalisés à partir d'une synthèse des données de surface et de subsurface disponibles dans la zone d'étude. Les modèles géologiques 3D ont été réalisés avec le logiciel 3D GeoModeller (BRGM, Intrepid geophysics). La stratégie de modélisation a consisté à réaliser plusieurs modèles avec différents niveaux de détail et de résolution. Dans les modèles régionaux, les formations géologiques ont été regroupées en incluant les grands accidents tectoniques majeurs. Dans les modèles de détail, autour des zones potentielles d'implantation de forages géothermiques, le nombre des formations géologiques a été augmenté, et les structures tectoniques secondaires ont été ajoutées. Certaines parties de ces modèles de détail ont été affinées, avec un calcul à plus haute résolution, autour des zones d'implantations potentielles de forages géothermiques. Des logs synthétiques ont également été réalisés pour une sélection de cinq sites de forage.

Les modèles réalisés sont les suivants (Figure II - 3) :

- Un modèle régional pour la région littorale entre Neuchâtel et St-Blaise (Modèle 1)
- Un modèle de détail dans la région littorale entre Neuchâtel et St-Blaise (Détail 1)
- Deux modèles détaillés affinés autour des zones de forage potentielles à Neuchâtel et à St-Blaise
- Deux logs de forage synthétiques pour les sites de Neuchâtel - Monruz et St-Blaise - Marin
- Un modèle régional pour la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds (Modèle 2)
- Un modèle détaillé autour de La Chaux-de-Fonds (Détail 2)
- Deux modèles détaillés affinés autour des zones de forage potentielles à La Chaux-de-Fonds et au Crêt-du-Locle
- Deux logs de forage synthétiques pour les sites de La Chaux-de-Fonds Est et du Crêt-du-Locle
- Un modèle détaillé pour la région Auvernier - Boudry (Modèle 3)
- Un log de forage synthétique pour le site de Cottendart.

## 2.4.2 Modèles pour la région Neuchâtel – Saint-Blaise

Le Modèle 1 couvre une zone de 12x10 km qui s'étend du littoral jusqu'au Val-de-Ruz (Figure II - 3), et s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 3 km. Il a été calculé avec une résolution horizontale de 200 m et une résolution verticale de 50 m. Pour ce modèle, les aquifères ont été modélisés dans leur ensemble et seules les structures tectoniques majeures ont été inclues. Le modèle Détail 1 couvre une zone de 6x5 km et s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 2.5 km. Il prend en compte l'ensemble des formations géologiques des différents aquifères (Figure II - 5) ainsi que les structures tectoniques secondaires. Il a été calculé avec une résolution horizontale de 100 m et une résolution verticale de 50 m. Les deux modèles réalisés autour des zones de forages potentielles à Neuchâtel et St-Blaise couvrent des zones de 3x3 km et ont été calculés avec une résolution horizontale et verticale de 50 m (Figure II - 6). Enfin deux logs de forage synthétiques (1x1 km) ont été réalisés autour des sites potentiels de Neuchâtel - Monruz et St-Blaise - Marin (Figure II - 6).

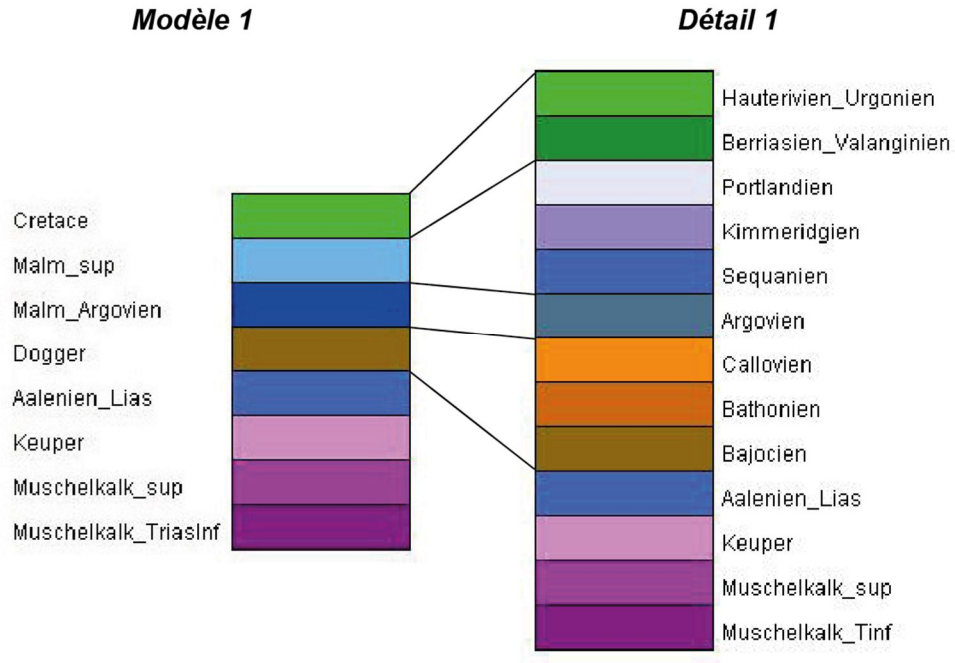



*Figure II - 5. Comparaison des formations prises en comptes entre les modèles régionaux et de détail.*

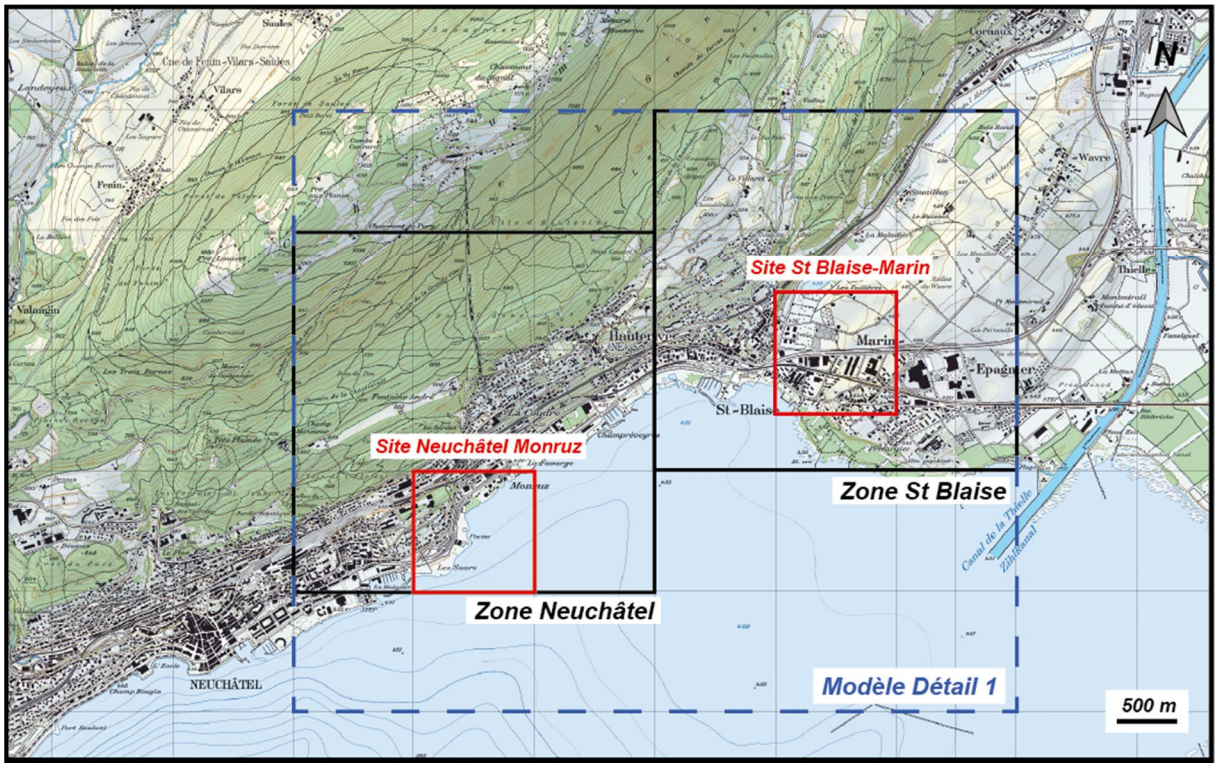



*Figure II - 6. Localisation des différents modèles détaillés pour les zones et sites de forage potentiels dans la région Neuchâtel – St-Blaise. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 2.4.3 Modèles pour la région Le Locle - La Chaux de Fonds

Le Modèle 2 couvre une zone de 14x12 km entre Le Locle et La Chaux-de-Fonds (Figure II - 3), et s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 3 km. Il a été calculé avec une résolution horizontale de 200 m et une résolution verticale de 50 m. Comme précédemment, les aquifères ont été

modélisés dans leur ensemble et seules les structures tectoniques majeures ont été inclues. Le modèle Détail 2 couvre une zone de 7x7 km et s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 2.5 km. Il prend en compte, comme auparavant, l'ensemble des formations géologiques des différents aquifères (Figure II - 5) ainsi que les structures tectoniques secondaires. Il a été calculé avec une résolution horizontale de 100 m et une résolution verticale de 50 m. Les deux modèles réalisés autour des zones de forages potentielles à La Chaux-de-Fonds et au Crêt-du-Locle couvrent des zones de 2x2 et 3x3 km respectivement et ont été calculés avec une résolution horizontale et verticale de 50 m (Figure II - 7). Enfin deux logs de forage synthétiques (1x1 km) ont été réalisés autour des sites potentiels de La Chaux-de-Fonds Est et du Crêt-du-Locle (Figure II - 7).

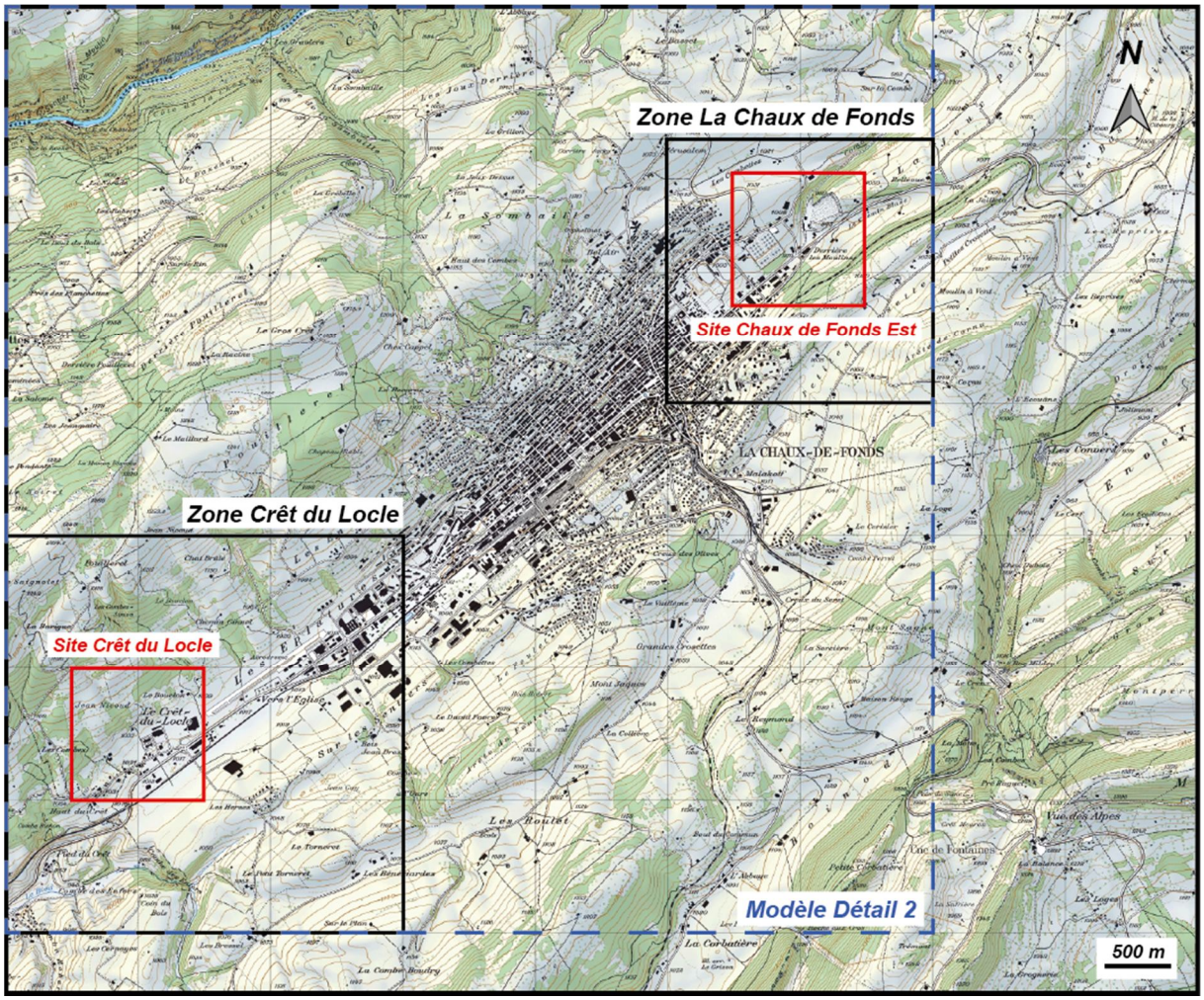



*Figure II - 7. Localisation des différents modèles détaillés pour les zones et sites de forage potentiels dans la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 2.4.4 Modèles pour la région Auvernier-Boudry

Le site de Cottendart ayant été sélectionné plus tardivement dans la phase de déroulement du projet GeoNE, seul un modèle de détail a été réalisé pour la région Auvernier - Boudry. Le Modèle 3 couvre une zone de 6x5 km entre Auvernier et Boudry (Figure II - 8) et s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 2.5 km. Il prend en compte l'ensemble des formations géologiques des différents aquifères (Figure II - 5) ainsi que les structures tectoniques secondaires, ayant ainsi la même précision que les modèles Détail 1 et 2. Il a été calculé avec une résolution horizontale de 100 m et

une résolution verticale de 50 m. Même s'il couvre une zone plus restreinte, la cohérence des structures géologiques a été vérifiée avec le Modèle 1 et le modèle Détail 1. Un log de forage synthétique (1x1 km) a également été réalisé autour du site potentiel de Cottendart.

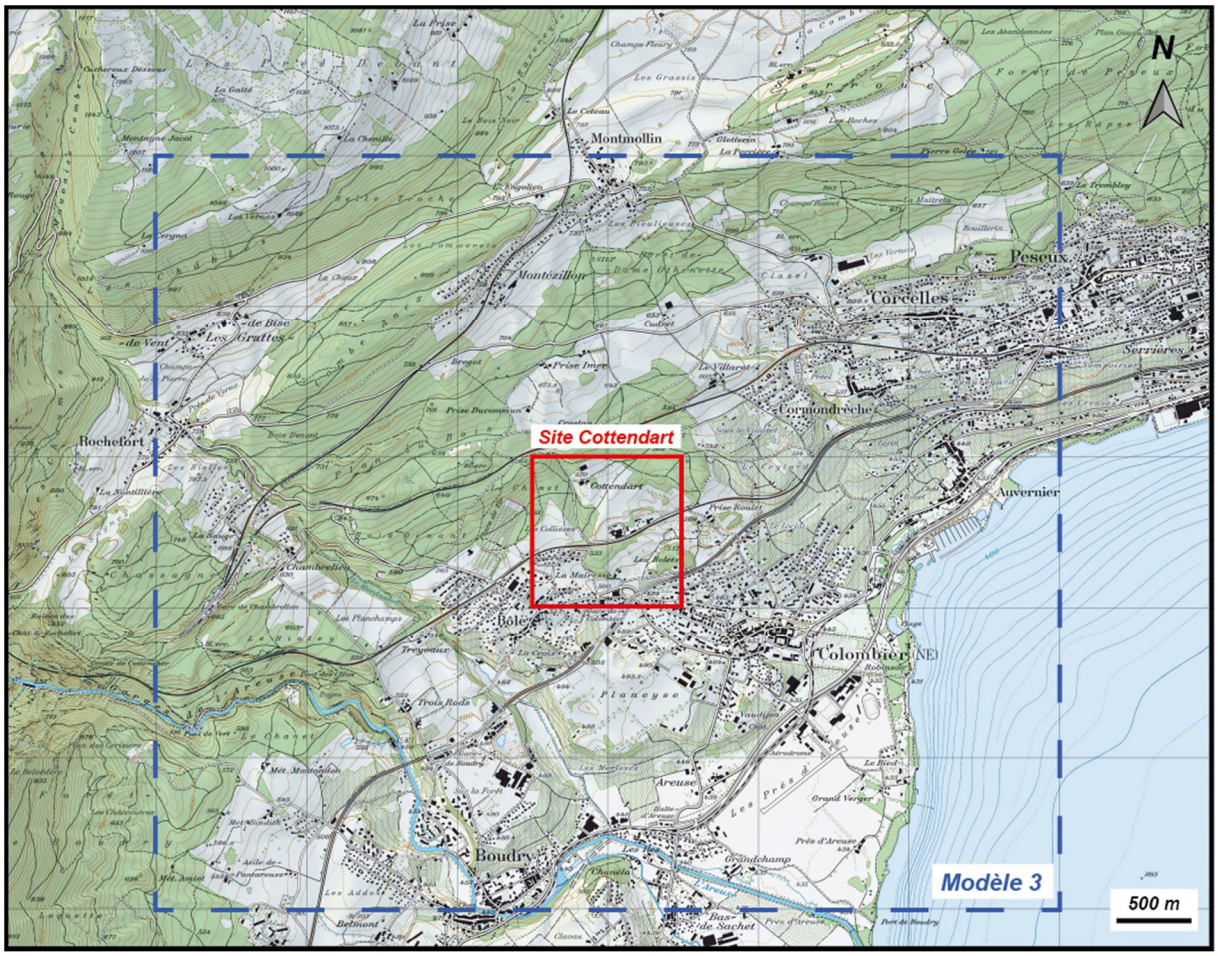



*Figure II - 8. Localisation des différents modèles détaillés pour les zones et sites de forage potentiels dans la région Auvernier – Boudry. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 2.5 Bibliographie

Jordan P., 1994. Evaporite als Abscherhorizonte. Eine gefügekundlich-strukturgeologische Untersuchung am Beispeil der Nordschweizer Trias. Matériaux pour la Carte Géologique de la Suisse 164, Berne, 79 pp.

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

Sommaruga A, 1997. Geology of the central Jura and the molasse basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. *Mémoire de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles*, tome XII, 176 pp.

Valley B., 2002. La vallée des Ponts-de-Martel. Rétro-déformation 3-D d'une structure complexe dans le Jura neuchâtelois. Travail de diplôme en Géologie, Unine, 107 pp.

# 3. Modélisation thermique 3D

## 3.1 Introduction

La modélisation thermique du champ de température dans les aquifères profonds s'est déroulée en deux étapes. Une première phase a été réalisée par le bureau Geowatt AG sur les modèles régionaux de Neuchâtel - St Blaise et Le Locle - La Chaux-de-Fonds. Une deuxième phase a été réalisée à l'Unine sur les modèles de détail et les modèles raffinés autour des sites de forages potentiels pour les trois régions d'étude. Comme pour les modèles géologiques, les variations des paramètres thermiques des différentes formations géologiques ont été prises en compte avec plus de détail. De plus, au cours de cette deuxième phase, l'effet des écoulements dans le karst a été pris en compte afin de mettre en évidence des perturbations potentielles du gradient géothermique.

## 3.2 Principe de calcul de la température

### 3.2.1 Modèles régionaux (Geowatt)

Le potentiel géothermique dépend de la température de chaque couche. Cependant aucune donnée de température dans un forage n'est disponible dans la zone d'étude. La mesure la plus profonde est disponible à Hermrigen (profondeur de 2'200 m). Afin d'extrapoler les températures dans le sous-sol le plus précisément possible, des modèles numériques ont été développés, qui permettent de prendre en compte la géologie en 3D, la température à la surface et le flux thermique naturel. Une conductivité thermique et un taux de production de chaleur sont attribués à chaque couche géologique. Afin de calculer la température en 3D et pour chaque couche, un maillage est construit sur la base des modèles géologiques 3D. Le modèle numérique par éléments finis obtenu par ce procédé prend ainsi en compte les principales couches géologiques présentes dans les modèles géologiques.

Chaque modèle géologique est discrétisé afin d'obtenir un maillage par éléments finis. Cette étape est réalisée grâce à différents outils numériques internes développés par Geowatt. Le calcul est basé sur le code par éléments finis FRACTure (Kohl & Hopkirk, 1995). Les résultats présentés se basent sur un modèle diffusif de la température, avec couplage de la conductivité thermique et de la température, ce qui nécessite un processus de calcul itératif (Geowatt, 2011).

Les calculs thermiques nécessitent tout d'abord la définition de conditions de bord et de propriétés de matériaux. Les paramètres suivants sont ainsi nécessaires :

- Définition de la température à la surface, $T_0(z)$
- Définition de la conductivité thermique $\lambda$ à 20°C pour chaque matériel (chaque couche géologique)
- Définition du taux de production de chaleur $A$ pour chaque matériel (chaque couche géologique)
- Définition du flux thermique naturel $q$ à la base du modèle.

Les processus advectifs (modification de la température à cause d'écoulements d'eau dans le sous-sol) ne sont pas pris en compte, dans la mesure où il n'existe pas assez de données permettant de les modéliser de manière satisfaisante sur les domaines concernés. Le principe des modèles est montré en Figure II - 9.

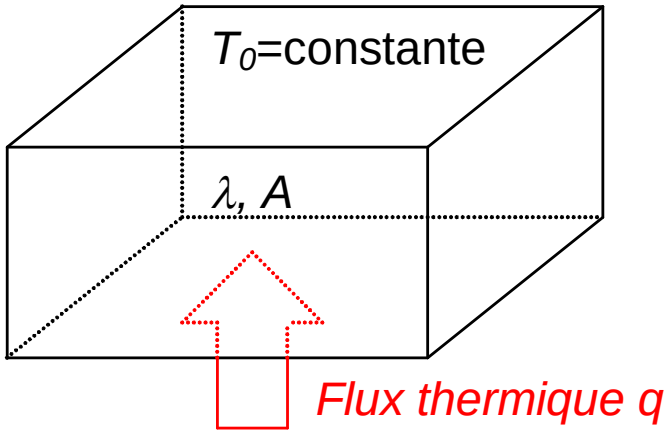



*Figure II - 9. Principe de calcul de la température*

La température à la surface est prise en compte avec une dépendance selon l'altitude. La relation entre l'altitude et la température à la surface est donnée dans les travaux de Signorelli & Kohl (2004).

Concernant les propriétés thermiques des roches, les paramètres utilisés dans les calculs proviennent de la base de données de Schärli & Kohl (2002) et de résultats de calibration de modèles thermiques sur le plateau Suisse, en particulier de l'Atlas des Ressources Géothermiques de la Suisse Occidentale (Baujard et al., 2007). Les paramètres utilisés dans les calculs figurent dans le Tableau II - 1.

Le flux thermique imposé en base du modèle est hétérogène. Il est dérivé de différentes sources, parmi lesquelles :

- l'Atlas de la Suisse 2.0 (ETH et Swisstopo, 2004)
- l'Atlas des Ressources Géothermiques de la Suisse Occidentale (Baujard et al., 2007).

*Tableau II - 1. Propriétés thermiques des roches utilisées dans les modèles de Geowatt.*

| **Formation** | **Conductivité thermique [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]** | **Production de chaleur [$\mu W \cdot m^{-3}$]** |
|---|---|---|
| Tertiaire | 2.9 | 0.5 |
| Crétacé, Jurassique supérieur | 2.9 | 0.5 |
| Jurassique inférieur | 2.9 | 0.5 |
| Keuper | 2.9 | 0.5 |
| Muschelkalk supérieur | 2.9 | 0.5 |
| Trias inférieur | 2.9 | 0.5 |
| Socle | 3.1 | 2.8 |

## 3.2.2 Modèles de détail (Unine)

Le calcul de température pour les modèles de détail a été réalisé à l'aide du module de modélisation directe de la température du logiciel Geomodeller (BRGM, Intrepid Geophysics). La méthode de calcul est similaire à celle utilisée par Geowatt, avec un modèle de calcul de température uniquement diffusif. Les paramètres de conductivité thermique et de production de chaleur ont

cependant été affinés pour les différentes formations géologiques (Tableau II - 2). Les données pour la couverture sédimentaire proviennent de la base de données de Schärli & Kohl (2002) et du rapport d'Andenmatten & Kohl (2003). Des mesures de conductivité thermique, effectuées au Laboratoire de géothermie de l'Unine sur des échantillons prélevés dans la zone d'étude, ont également été utilisées. Les valeurs de conductivité thermique et de production de chaleur pour le socle sont les mêmes que celles des modèles thermiques de Geowatt.

Le flux de chaleur utilisé à la base du modèle a été recalculé à partir des valeurs observées en surface, en retirant la composante liée à la production de chaleur interne des différentes formations géologiques du modèle. Pour le socle, une loi de décroissance de la production de chaleur en fonction de la profondeur a été appliquée, basée sur des observations dans le forage de Soultz-sous-Forêts (Pribnow et al., 1999). Le détail des calculs de flux de chaleur est présenté dans les sections « Potentiel géothermique » des chapitres III, IV et V.

*Tableau II - 2. Propriétés thermiques des roches utilisées dans les modèles Geomodeller*

| | **Formation** | **Conductivité thermique [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]** | **Production de chaleur [$\mu W \cdot m^{-3}$]** |
|---|---|---|---|
| | Tertiaire | 2.2 | 0.5 |
| Crétacé | Hauterivien-Urgonien | 2.9 | 0.25 |
| | Berriasien-Valanginien | 3 | 0.25 |
| Malm sup. | Portlandien | 2.8 | 0.5 |
| | Kimmeridgien | 2.9 | 0.5 |
| | Sequanien | 2.6 | 0.5 |
| Malm inf. | Argovien | 2 | 1 |
| Dogger | Callovien | 2.5 | 0.25 |
| | Bathonien | 2.6 | 0.25 |
| | Bajocien | 2.6 | 0.25 |
| Lias | Aalenien-Lias | 2 | 0.7 |
| Trias | Keuper | 3 | 0.8 |
| | Muschelkalk supérieur | 3.1 | 0.4 |
| | Trias inférieur | 2.7 | 0.9 |
| | Socle | 3.1 | 2.8 |

Dans un premier temps, les températures ont été calculées pour les différents modèles de détail des régions de Neuchâtel - St Blaise, Le Locle - La Chaux-de-Fonds et Auvernier - Boudry dans le cas d'un gradient géothermique non perturbé par les écoulements souterrains dans le karst. Une deuxième série de modèles a ensuite été réalisée afin d'estimer l'effet potentiel de ces écoulements froids et rapides. Le principe du calcul est inchangé mais la température de surface du modèle est fixée à la base du Malm supérieur, avec une faible augmentation de température correspondant au gradient géothermique observé dans les systèmes karstiques (Tableau II - 2 , Figure II - 10). Les températures utilisées à la base du Malm ont été ajustées en fonction de la zone d'étude, de la structure géologique locale et des données de forage disponibles. Le détail des différents calculs de

température pour chaque région est présenté dans les sections « Potentiel géothermique » des chapitres III, IV et V.

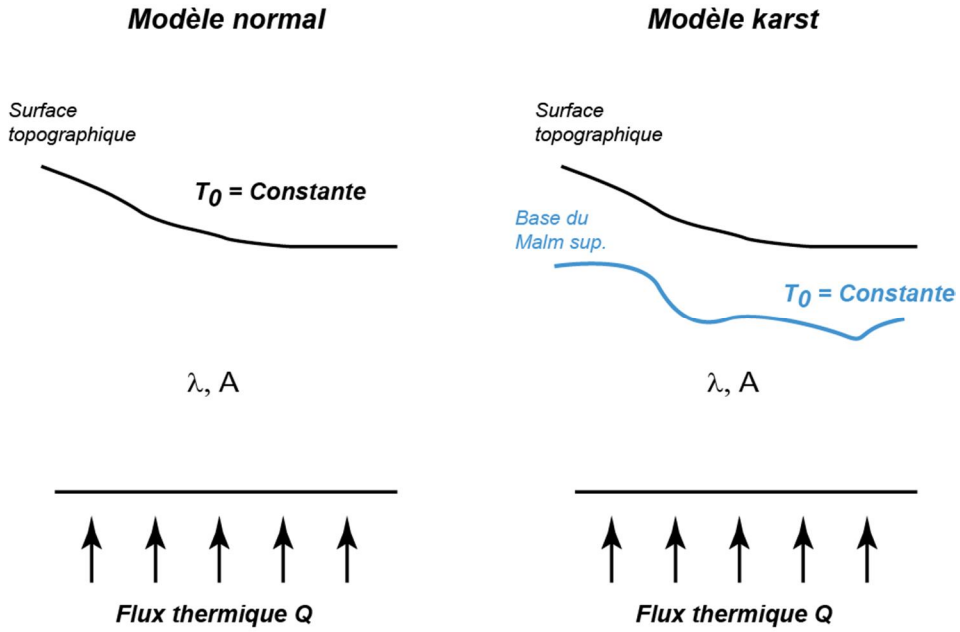



*Figure II - 10. Principe de calcul de la température pour les modèles Geomodeller. λ : conductivité thermique et A : Production de chaleur.*

## 3.3 Bibliographie

Andenmatten-Berthoud N. & Kohl T., 2003. Atlas des Ressources Géothermiques Suisses. Rapport Annuel 2003 pour l'Office Fédéral de l'Energie, Bern. Commission Suisse de Géophysique

Baujard C., Signorelli S. & Kohl T., 2007. Atlas des Ressources géothermiques de la Suisse Occidentale, Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz – Domaine Sud-Ouest du Plateau Suisse, Commission Suisse de Géophysique, Nr. 40.

ETH & Swisstopo, 2004. Atlas der Schweiz.

Geowatt, 2011. Modèles de température et de potentiel géothermique, Région de Neuchâtel.

Kohl T. & Hopkirk R.J., 1995. "FRACTure" a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock. Geothermics, 24(3): 345-359.

Pribnow D., Fesche W. & Hägedorn F., 1999. Heat production and temperature to 5 km depth at the HDR site in Soultz-sous-Forets, GGA-Report, report n°119144, GGA-Hannover.

Schärli U. & Kohl T., 2002. Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. ISSN 0253-1186, Swiss Geophysical Commission. Beiträge zur Geologie der Schweiz: Geophysik, Nr. 36.

Signorelli S. & Kohl T., 2004. Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. Global and Planetary Change, 40: 267-284.

# 4. Méthode gravimétrique

## 4.1 Les régions étudiées

Entre septembre 2011 et juin 2012, dans le cadre du projet GeoNE, les mesures effectuées pour la cartographie gravimétrique ont regroupé 2300 stations gravimétriques, sur une superficie de 145 kilomètres carrés. Le territoire neuchâtelois étudié est divisé en quatre régions, qui répondent aux demandes de la ville de La Chaux-de-Fonds et aux objectifs du projet. Par ordre décroissant de grandeur :

- La région de Neuchâtel - St Blaise (10 x 10 km, Figure II - 11), qui comprend Neuchâtel Centre et Est, Hauterive, St-Blaise, Marin, Hauterive et qui remonte vers le nord jusqu'à la bordure Nord du Val-de-Ruz, dont la bordure à l'est est marquée par Valangin.
- La région de La Chaux-de-Fonds qui comprend la partie Est et le centre de la ville (5 x 4 km, Figure II - 12).
- La région du Crêt-du-Locle (3 x 3 km, Figure II - 13).
- La région de Cottendart (4 x 4 km, Figure II - 14), qui comprend les villages de Bôle, Boudry, Cormondrèche et Colombier.

Chaque région est associée à un ou plusieurs quartiers regroupant des consommateurs de chaleur potentiels, ainsi que des structures géologiques potentiellement intéressantes pour la géothermie.

L'objectif de la cartographie gravimétrique est de mettre en évidence :

- L'extension des zones de roches fracturées associées aux failles, qui sont souvent des chemins préférentiels pour la circulation des eaux souterraines. Les variations gravimétriques locales étant associées aux variations locales de masse, il est possible de mettre en évidence des diminutions de densité des roches et donc une augmentation de leur perméabilité, qui sont provoquées par les mouvements le long des failles et le broyage des roches.
- L'existence de structures géologiques favorisant la formation d'un réservoir géothermique. Les variations gravimétriques peuvent caractériser l'existence de structures géologiques (synclinal, ancien bassin sédimentaire), qui sont invisibles car entièrement recouvertes par les sédiments récents.

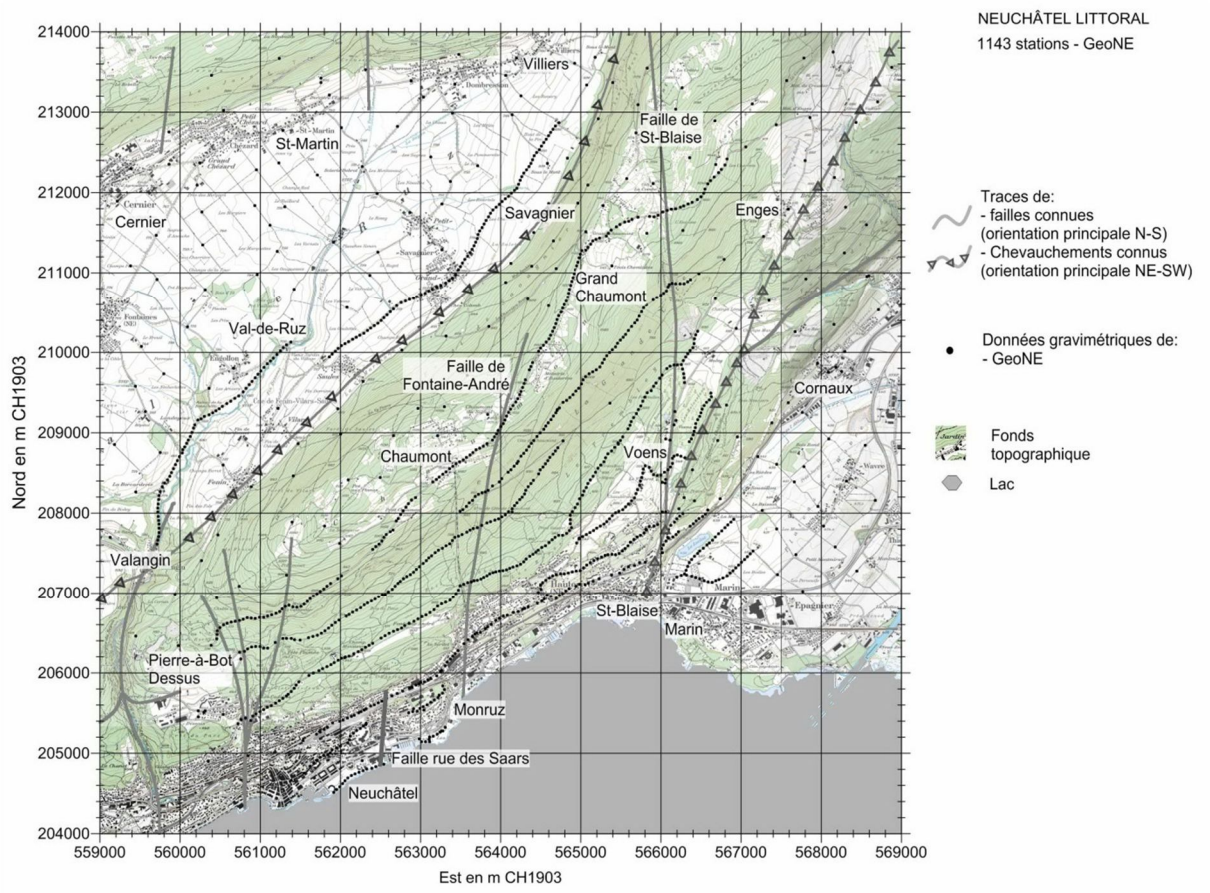



*Figure II - 11. Carte des stations gravimétriques sur la région de Neuchâtel – St-Blaise 81360 stations de mesures sur 100 km$^2$). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

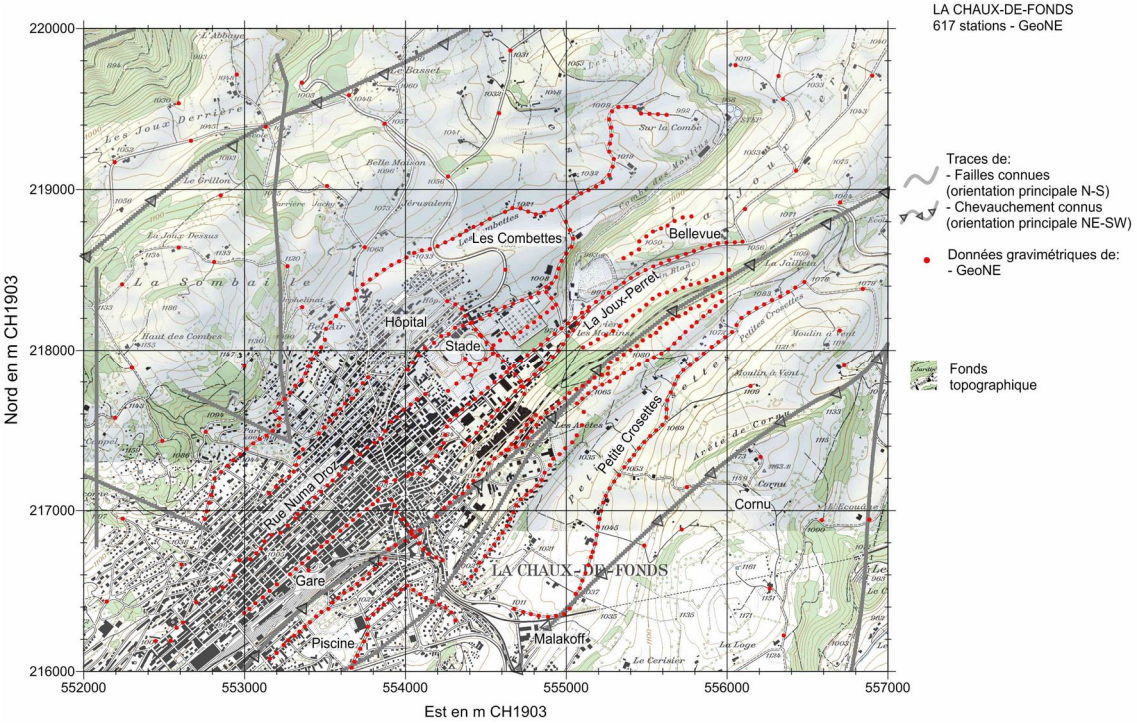



*Figure II - 12. Carte des stations gravimétriques sur la région de La Chaux-de-Fonds (617 stations de mesures sur 20 km$^2$). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

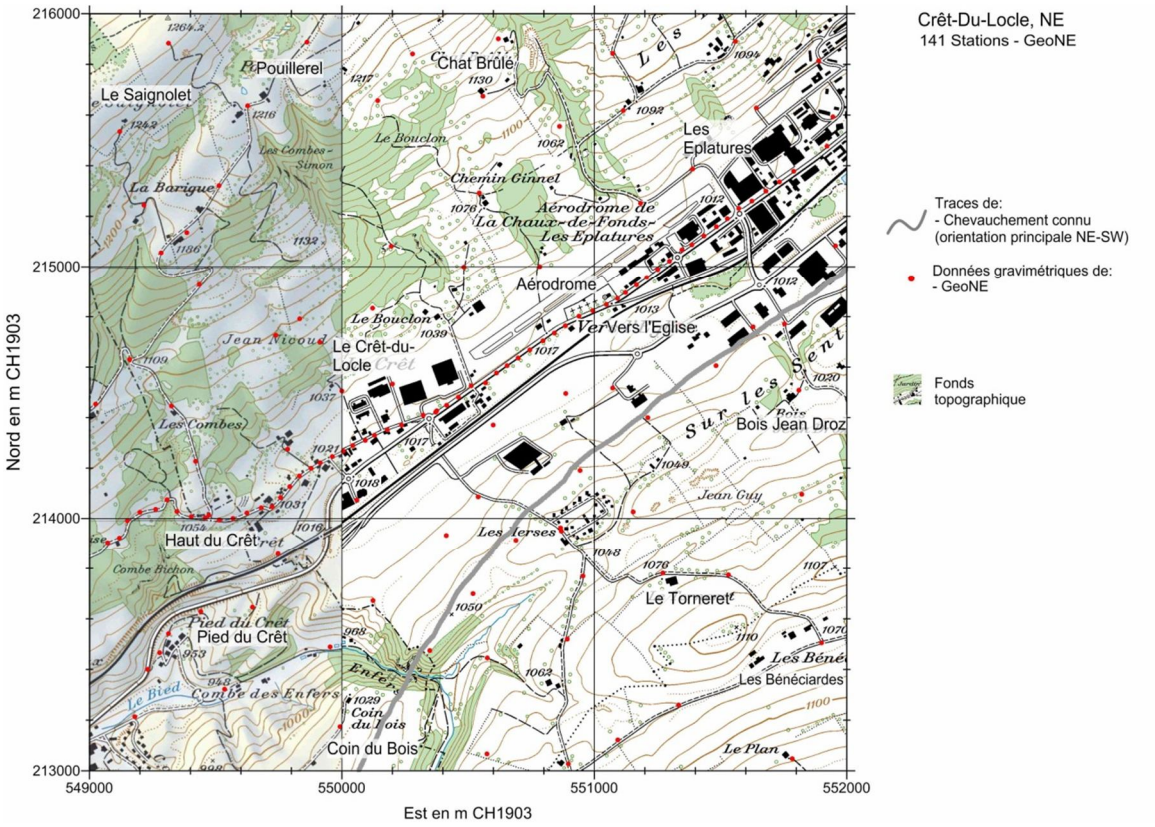



*Figure II - 13. Carte des stations gravimétriques sur la région du Crêt-du-Locle (141 stations de mesures sur 9 km$^2$).*

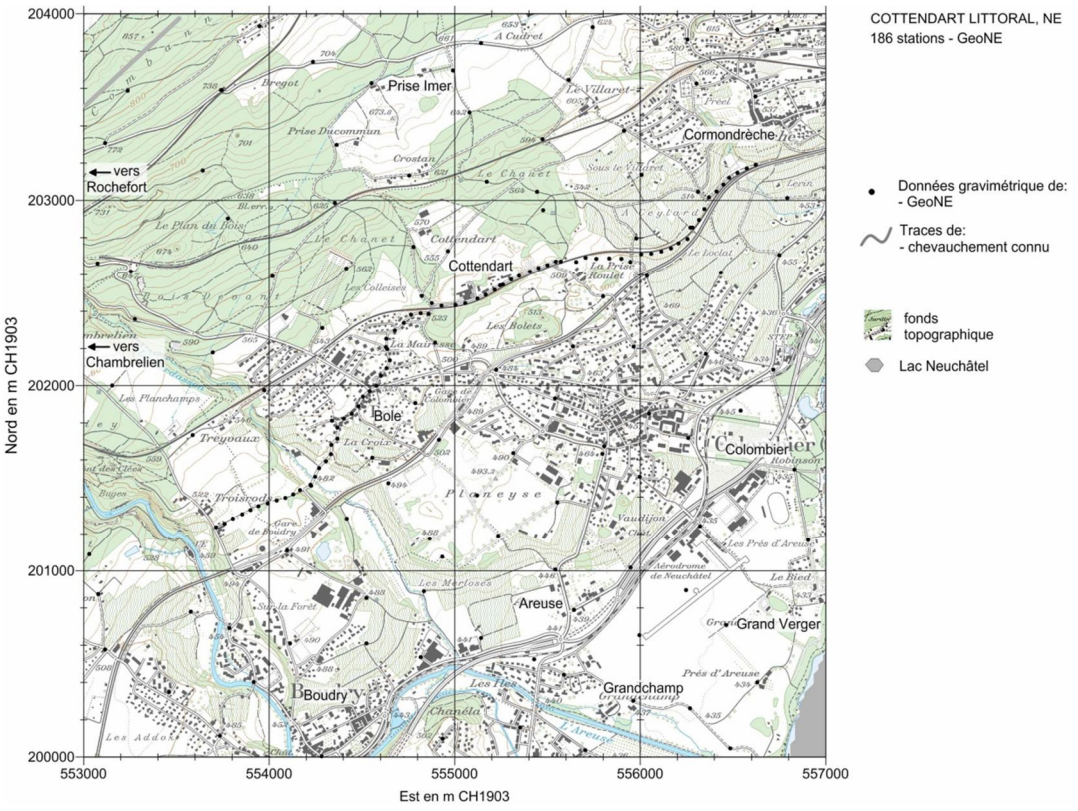



*Figure II - 14. Carte des stations gravimétriques sur la région de Bôle et Cottendart (186 stations de mesures sur 16 km$^2$). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

En chaque point de mesures, l'effet gravimétrique enregistré correspond à l'ensemble des masses (géologique et hydrologique) présentes dans une région de 110 km de rayon. De manière à pouvoir isoler l'effet gravimétrique lié à la fracturation des roches, il est important de réaliser plusieurs types de corrections (correction de dérive instrumentale, marée terrestre, correction Bouguer), ainsi que soustraire les effets de grandes structures (effet gravimétrique du lac de Neuchâtel, effet gravimétrique régional, …) et les effets dus à l'activité humaine (effet gravimétrique des caves et des tunnels). L'incertitude liée à chaque type de correction est présentée dans le Tableau II - 3. Les corrections topographiques utilisent les MNT 25m du Canton de Neuchâtel (MNT,25V-Swisstopo 2011), le MNT haute résolution 0.5m. (Données cartographique du SITN©2011/Service de la Géomatique et du Registre Foncier).

*Tableau II - 3. Quantification des incertitudes sur les mesures gravimétriques.*

| **Type de correction** | **Incertitude en µGal** |
|---|---|
| Ecart type sur la mesure | 5 |
| Correction de marée terrestre | 4 |
| Correction de la dérive instrumentale | 20 |
| Incertitude sur la localisation GPS | 13 |
| Correction Bouguer (Plateau et topographie)<br>Zone proximale (<150) : 0.5m MNT<br>Zone intermédiaire (<25 km) : 25 m MNT<br>Zone distale (<110 km) : interpolation faite à partir du 25 m MNT. | 20 |
| Effet du Lac de Neuchâtel<br>(Bathymétrie de 2 5m) | 1 |
| G théorique basé sur le Système Géodésique Mondial 1984 | 10 |
| Incertitude due à l'activité humaine (gazoduc,..) | 50 |
| Total de l'incertitude | 65 |

## 4.2 Les corrections gravimétriques

Étant donné que la valeur de la gravité mesurée sur le terrain est une superposition de plusieurs effets, il est nécessaire d'enlever les effets non souhaités qui sont considérés comme du bruit. La valeur de la pesanteur est fortement affectée par l'altitude, il faut, par conséquence, ramener les valeurs mesurées sur un même plan référentiel afin de pouvoir les comparer. D'autre part, il est nécessaire d'enlever l'effet des structures connues comme la topographie et les autres effets visibles en surface, comme par exemple l'effet gravifique des Lacs (e.g. Lac de Neuchâtel). Pour pouvoir achever toute ces corrections, qui sont indispensable pour l'interprétation des résultats, un code de calcul automatique a été développé et est nommé GraviFor3D. Ce code est un sujet de publication scientifique.

### 4.2.1 Principe de GraviFor3D code

Le code permet de faire les corrections suivantes : Altitude, Latitude, plateau et topographique, ainsi que de faire les calculs directes pour obtenir l'effet gravifique d'un modèle géologique 3D et de calculs inverses pour déterminer la densité des formations géologiques.

## CORRECTION D'ALTITUDE

Une mesure faite à une altitude h peut être ramenée au niveau du géoïde (exemple, au niveau de la mer où h=0) ou à n'importe quel autre niveau de référence parallèle au géoïde (h=constante). C'est l'étape connue sous le nom de la correction d'altitude ou la réduction à l'air libre. Cette correction ramène la valeur mesurée au niveau du référentiel choisi en utilisant la valeur du gradient de la pesanteur terrestre, qui est de 0.3086 $mGal.m^{-1}$. Cette étape ne tient pas en compte la masse rocheuse qui existe ou qui peut exister entre le point de mesure et le géoïde (ou autre référentiel).

## CORRECTION DE LA LATITUDE

Cette correction consiste à réaliser un modèle homogène de référence qui prend en compte uniquement la position du site de mesure suivant sa Latitude. Cette étape est connue aussi sous le nom de la gravité théorique ou normale. La différence entre ce modèle homogène et les mesures pour un même point, donne par définition l'anomalie gravimétrique. La valeur de la pesanteur théorique est donnée par la Formule Gravimétrique International, qui est défini par l'Association International de Géodésie pour une terre en forme ellipsoïdale. GraviFor3D code permet de choisir entre deux références ; GRS80 ou GRS67.

## CORRECTION DU PLATEAU ET DE LA TOPOGRAPHIE

La tâche la plus ardue à réaliser, parmi les autres corrections, est la correction topographique. Cette dernière revient à prendre en compte l'effet gravifique de la masse rocheuse qui peut exister entre l'altitude de mesure et l'altitude du référentiel (correction de plateau) et l'effet gravifique de toute la topographie au tour du site de mesure sur une distance minimale de 50 km (correction topographique). Le but est donc d'arriver à reproduire la surface topographique de la région d'étude, de choisir une densité moyenne des roches représentant au mieux la géologie, puis de calculer son effet gravimétrique. GraviFor3D code est développé spécialement pour achever cette étape qui demande beaucoup d'effort de calcul numérique.

Autrefois, la correction topographique était réalisée à l'aide des abaques concentriques superposés sur la carte topographique de la région (connues sous le nom des abaques de Hammer ; Reynolds, 2011). Ensuite, l'effet gravifique de celle-ci est calculé par une formule suivant l'emplacement du site de mesure sur l'abaque. Par contre à l'heure actuel et avec l'émergence de moyen de calcul informatique beaucoup plus puissant, on utilise des calculs numériques. L'objectif est de reconstruire la topographie de toute la région et de ces alentours (jusqu'à 100 km de distance) à partir des modèles numériques de terrain (MNT). Les plus souvent deux MNT suffisent pour obtenir une résolution suffisante pour les corrections topographiques. Pour la zone très proche il est nécessaire d'avoir un MNT de haute résolution, tandis que pour les autres zones, un second MNT de moindre résolution est suffisant. La combinaison de ces deux MNT permet de définir la région d'étude, qui doit s'étendre au minimum sur plus de 100 km de part et d'autre de la région d'étude et est décomposée en quatre zones : très proche (0-150 m), proche (généralement entre 150 m et 50 km), intermédiaire (>50 km) et lointaine (<167 km). Pour des facilités de calcul, ces deux MNT sont d'abord transformés en prismes de taille adaptée à chaque zone, puis l'effet gravifique de chaque prisme est calculé. Dans les deux premières zones l'effet gravifique est calculé par la formule exacte du prisme appliqué au MNT de haute résolution (pour la zone très proche) et au second MNT, pour la zone proche. Dans la zone intermédiaire, l'effet gravifique est approximé en supposant que l'effet gravimétrique est concentré au centre du prisme. Le calcule est effectué sur le deuxième MNT (généralement 25 m de résolution). Un nouveau MNT d'une résolution de 1x1 km est créé dans la zone lointaine permettant ainsi d'approximer l'effet gravifique jusqu'à la limite souhaitée. Ces deux approximations sont surtout nécessaires pour optimiser le temps de calcul qui peut se compter en plusieurs heures. A la fin du traitement de donnée, GraviFor3D fournit l'anomalie de Bouguer complète calculée avec quatre différentes densités de roche et qui est prête pour l'interprétation.

GraviFor3D code possède plusieurs options lui permettant d'être flexible pour traiter les données. Les plus importantes de ces options sont :

- choisir d'utiliser soit un ou deux MNT,
- redéfinir facilement les rayons qui délimitent les quatre zones décrites ci-dessus,
- choisir le format d'entré des données de ces MNT,
- pouvoir modifier les quatre densités de calcule utiliser dans la correction topographique,
- choisir entre le référentiel GRS80 ou GRS67,
- choisir l'altitude de référence (0 m ou autre altitude).

De plus, le code permet de calculer la réponse gravimétrique d'un modèle géologique tridimensionnelle en voxel. Cela va nous permettre, entre autre, de faire du stripping, calculer l'effet gravifique des Lacs, etc. Plusieurs options existent aussi pour le calcul direct (Forward modelling) de la réponse gravimétrique qui est utilisée durant le projet GeoNe.

## 4.2.2 Effets du lac de Neuchâtel

L'effet gravimétrique du lac de Neuchâtel (surface de 217,8 km$^2$ et volume de 14 km$^3$) a été calculé à partir de la modélisation 3D, qui se base sur la bathymétrie du Lac de Neuchâtel. Cette opération a permis de souligner plus nettement les anomalies gravimétriques du sous-sol le long du littoral neuchâtelois.

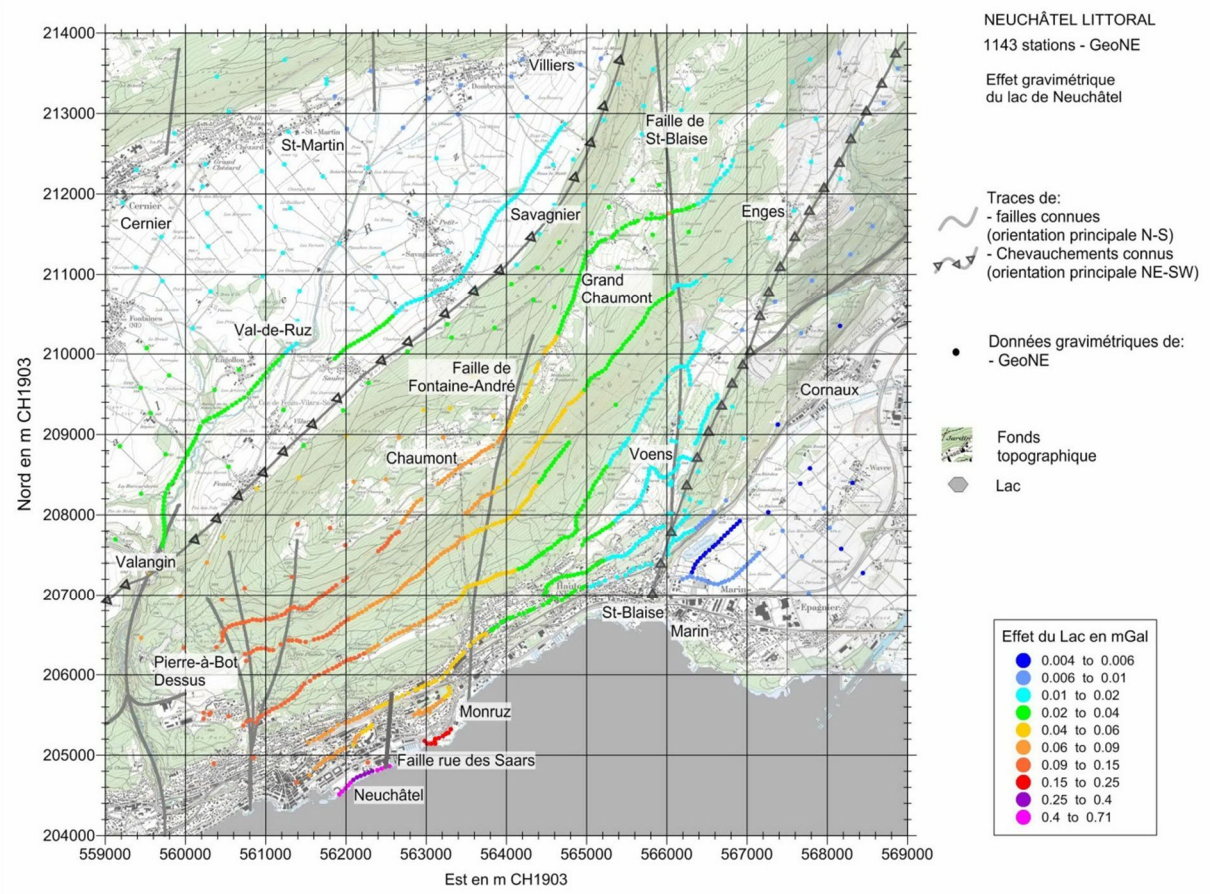



*Figure II - 15. Carte des effets du Lac de Neuchâtel sur la région de Neuchâtel – St-Blaise. La densité de l'eau du lac a été fixée à 1.00 g.cm$^{-3}$ (voir texte pour le détail). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

De manière à pouvoir modéliser l'effet du lac de Neuchâtel en tout point de chaque région d'étude, le lac a d'abord été modélisé en 3D en se basant sur les données de bathymétrie (Bathymétrie 25 m, SITN ©2011), ainsi que sur le niveau du lac mesuré par GPS différentiel au cours de l'automne et de l'hiver 2011.

La modélisation a été faite en combinant les résultats de modélisation 3D à partir du logiciel 3D GeoModeller avec le calcul gravimétrique à l'aide du code Gravfor3Dcode. La densité de l'eau du lac de Neuchâtel a été prise à 1.00 g.cm$^{-3}$.

Le résultat de la modélisation a permis de rééquilibrer la carte gravimétrique de Neuchâtel et de Bôle - Cottendart, puisque l'effet du lac est le plus fort au sud-ouest de chaque région d'étude (ville de Neuchâtel, Figure II - 15 ; village de Bôle, Figure II - 16).

Depuis le bord du lac, dans la région de Neuchâtel – St-Blaise, l'effet gravimétrique diminue lorsque l'on se dirige vers Marin à l'est. Cette diminution de l'effet du lac est constante avec la diminution de la profondeur du lac en se dirigeant vers sa rive Est. L'effet gravimétrique diminue aussi avec l'éloignement au lac en rentrant dans les terres.

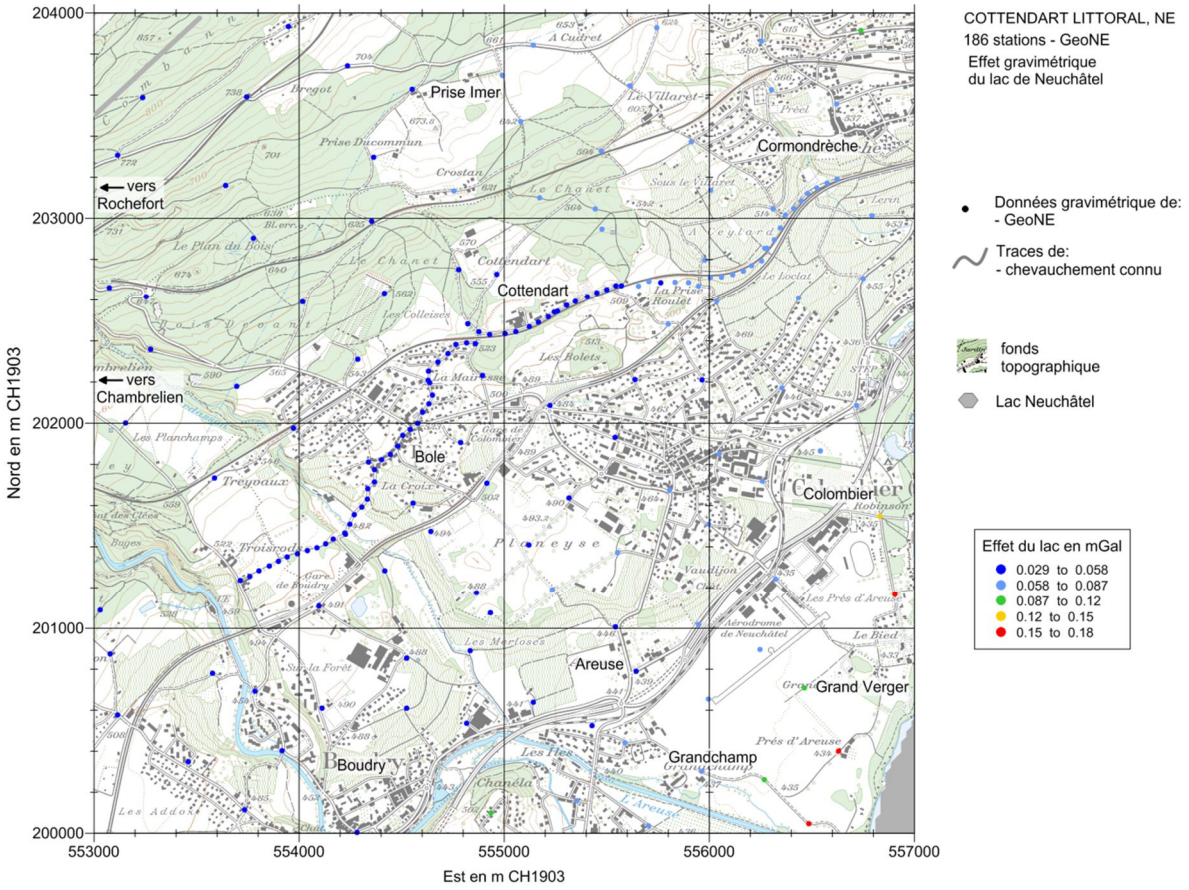



*Figure II - 16. Carte des effets du Lac de Neuchâtel sur la région d'Auvernier - Boudry. La densité de l'eau du lac a été fixée à 1.00 g.cm$^{-3}$ (Voir texte pour le détail). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 4.2.3 Effets des caves

En milieu urbain, à proximité des points de mesure, les caves peuvent avoir un effet gravimétrique non-négligeable, allant de quelques microGal à quelques centaines de microGal (Radogna et al., 2003a, 2003b, 2004; Altwegg, 2006). Les effets des caves sur les mesures gravimétriques pour chacune des régions d'étude ont pu être corrigés au mieux en utilisant les données GIS d'urbanisme

fournies par le service du Système d'Information du Territoire Neuchâtelois (SITN) (Données cartographiques du SITN©2011/Service de la Géomatique et du Registre Foncier). Bien que l'existence d'une cave, ainsi que la profondeur de celle-ci dépendent du type du bâtiment, il n'était pas possible de calculer le volume exact de chacune des caves des milliers de bâtiments présents sur chaque région d'étude. C'est pourquoi, il a été considéré une hauteur approximative correspondant à une cave de bâtiment «standard», qui aurait une hauteur de 2.5 m. Pour chaque bâtiment, référencé sur les données GIS d'urbanisme, l'élévation minimum au sol du bâtiment a été calculée à partir des modèles numériques de terrain (MNT) de haute résolution (0.5 m MNT) (NELidar2010-SITN).

Les valeurs d'élévation au sol de chaque bâtiment ont alors été corrigées d'une profondeur de 2.5 m et finalement combinées dans des MNT de haute résolution. Les MNT de hautes résolutions corrigées des caves ont ensuite été utilisés pour calculer la carte des anomalies topographiques Bouguer en utilisant le code Gravfor3Dcode. La réponse gravimétrique des caves est ensuite déterminée de façon précise en calculant la différence entre la carte Bouguer du MNT non-corrigé et la carte Bouguer du MNT corrigé. L'effet des caves pour la région Neuchâtel – St-Blaise est présenté en Figure II - 17. Les autres régions sont présentées en annexe avec la région de La Chaux-de-Fonds en figure A01, celle du Crêt-du-Locle en figure A02 et celle de la région d'Auvernier – Boudry en figure A03.

L'effet gravimétrique des caves est le plus fort là où les rues sont les plus étroites et lorsque la densité des bâtiments est la plus forte. Les valeurs de corrections deviennent négatives lorsque les stations de mesure se situent en contrebas sur les flancs d'une colline sur laquelle sont construits des bâtiments.

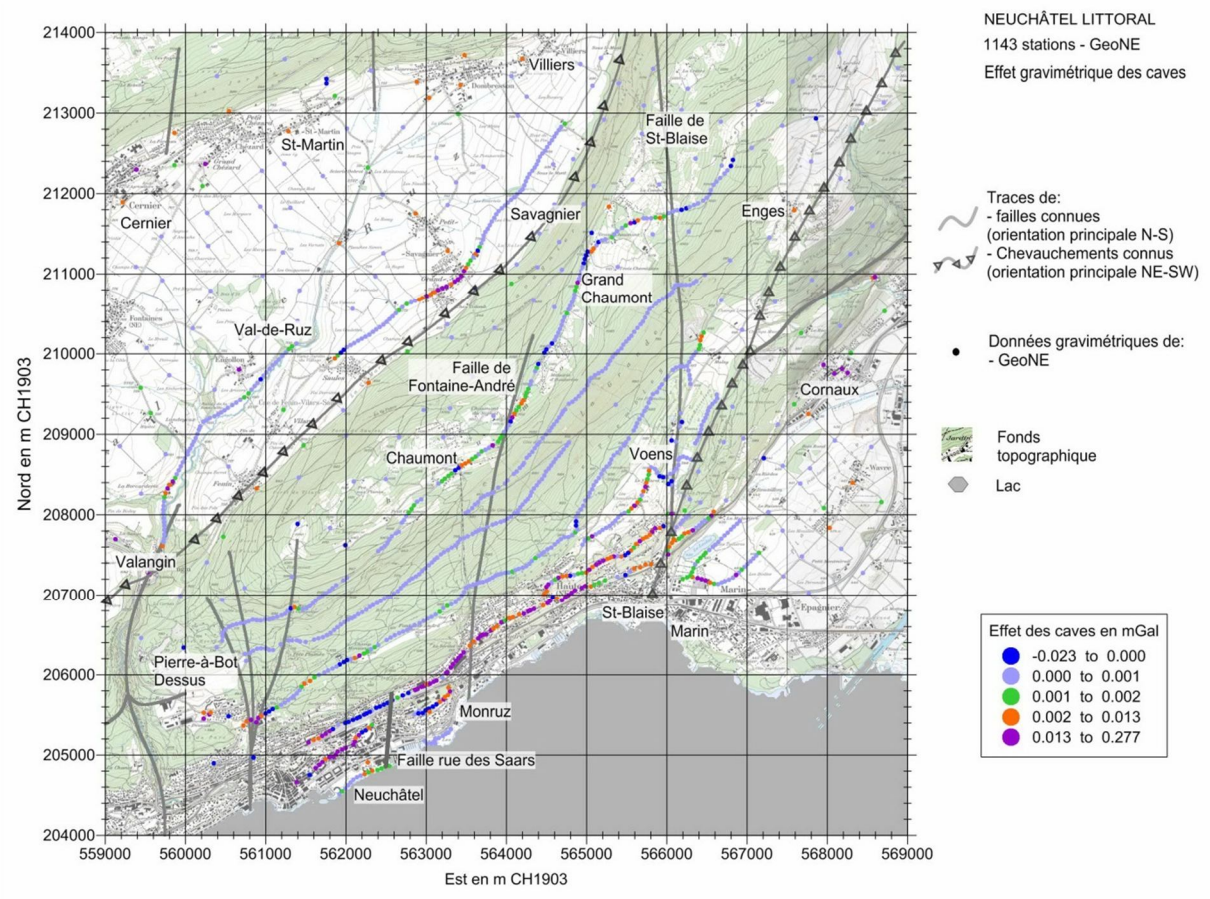



*Figure II - 17. Cartes des effets des caves sur la région de Neuchâtel – St-Blaise (voir texte pour le détail). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

# 4.3 Carte d'anomalies Bouguer et description des cartes d'anomalies résiduelles

## 4.3.1 Cartes d'anomalies Bouguer et de résiduelles pour le canton de Neuchâtel

De manière à pouvoir obtenir la carte d'anomalie résiduelle présentée en Figure II - 18, les données gravimétriques GeoNE ont été corrigées des effets gravimétriques suivants : effet de la marée terrestre, effet de la dérive instrumentale, effet de la latitude, effet de l'altitude, correction de Bouguer, correction des tendances régionales, effet du Lac de Neuchâtel et effet de caves. Pour chacune des stations gravimétriques GeoNE, l'incertitude globale calculée est inférieure à 0.070 mGal. Une telle incertitude sur les mesures corrigées permet de pouvoir caractériser des anomalies gravimétriques ayant des amplitudes de 0.150 mGal ou plus grandes. Les résultats de ces corrections sont des cartes d'anomalie de Bouguer, qui sont calculées pour différentes densités de références (2.30, 2.50, 2.67 et 2.72 g.cm$^{-3}$). Pour plus de clarté, seuls les résultats calculés pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$ sont présentés ici. Pour information, la carte régionale d'anomalie de Bouguer pour une densité de 2.50 g.cm$^{-3}$ est présentée en Annexe de ce rapport (Figure A05).

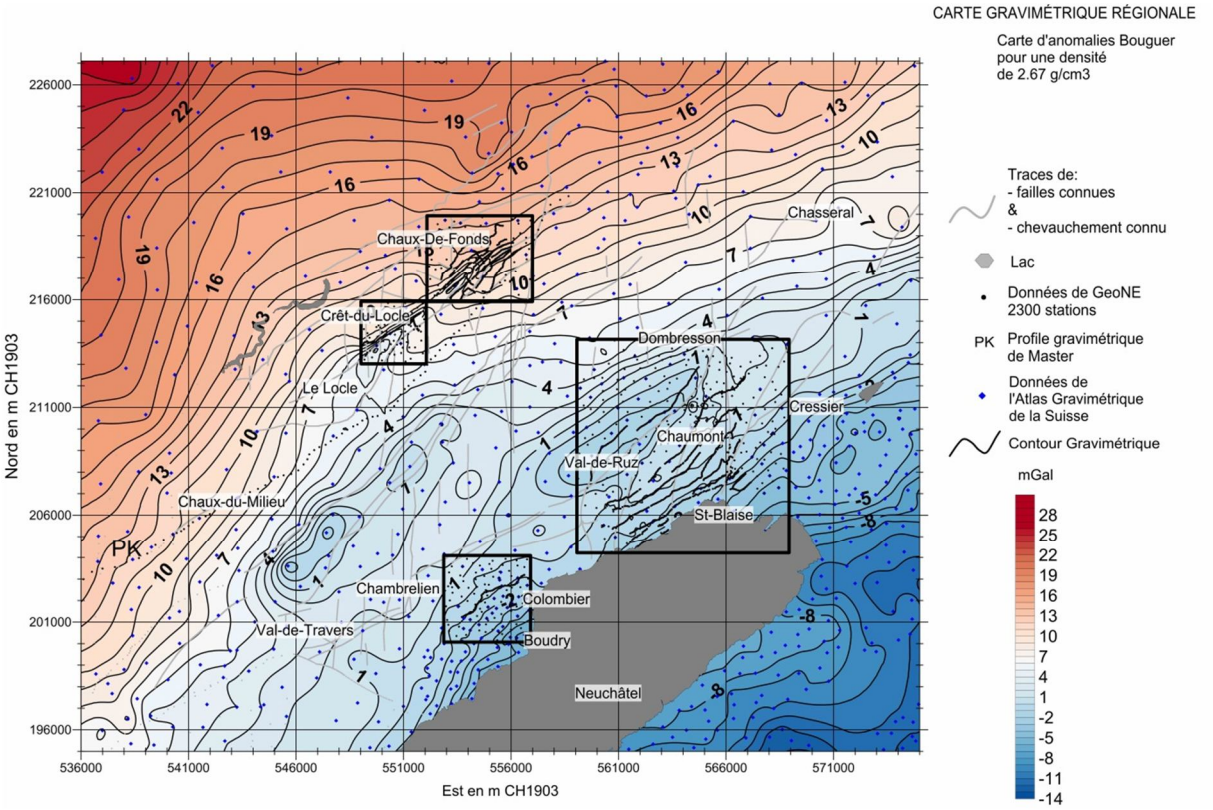



*Figure II - 18. Carte Bouguer régionale pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie (Klingele & Olivier, 1980) et des stations gravimétriques GeoNE. Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'étude (voir texte pour le détail).*

Pour pouvoir situer les anomalies gravimétriques de GeoNE dans le contexte régional Suisse, les données de GeoNE ont été combinées avec celles de l'Atlas Suisse de Gravimétrie (échelle de 1:100'000, référence: Grav100-Commission suisse de géophysique/2002) (Klingele & Olivier, 1980).

Les 140 km$^2$ de territoire neuchâtelois couvert par le projet GeoNE (soit 2100 stations) ont permis d'obtenir une carte d'anomalies Bouguer (à une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$) plus précise pour le canton de Neuchâtel que celle initialement présentée dans l'Atlas Suisse de Gravimétrie. Tandis que les données de l'Atlas Suisse de Gravimétrie permettent de caractériser l'existence de grandes structures gravimétriques (de taille plurikilométriques) dans le Canton de Neuchâtel, le projet GeoNE a permis de mieux définir les limites de ces grandes anomalies dans les régions étudiées, ainsi que de bien définir l'existence de petites structures gravimétriques (de taille kilométrique ou plus petites).

Dans le cadre du projet GeoNE, les structures géologiques ciblées sont les structures géologiques de petites tailles, telles que des failles, des chevauchements, des synclinaux ou des anticlinaux (de taille kilométrique ou plus petites). Pour pouvoir isoler les signatures gravimétriques de ces petites structures géologiques dans chacune des régions étudiées, il est nécessaire de soustraire les anomalies gravimétriques associées aux grandes structures. Pour ce faire, une carte des tendances gravimétriques régionales a été calculée sur la base de l'Atlas Suisse de Gravimétrie (Klingele & Olivier, 1980) sur une région de 45 km de côté. La carte des tendances gravimétriques régionales est présentée en annexe (Figure A04). Le résultat de cette soustraction des variations gravimétriques régionales est une carte d'anomalies gravimétriques résiduelles qui met clairement en évidence les variations gravimétriques associées aux petites structures géologiques (Figure II - 19).

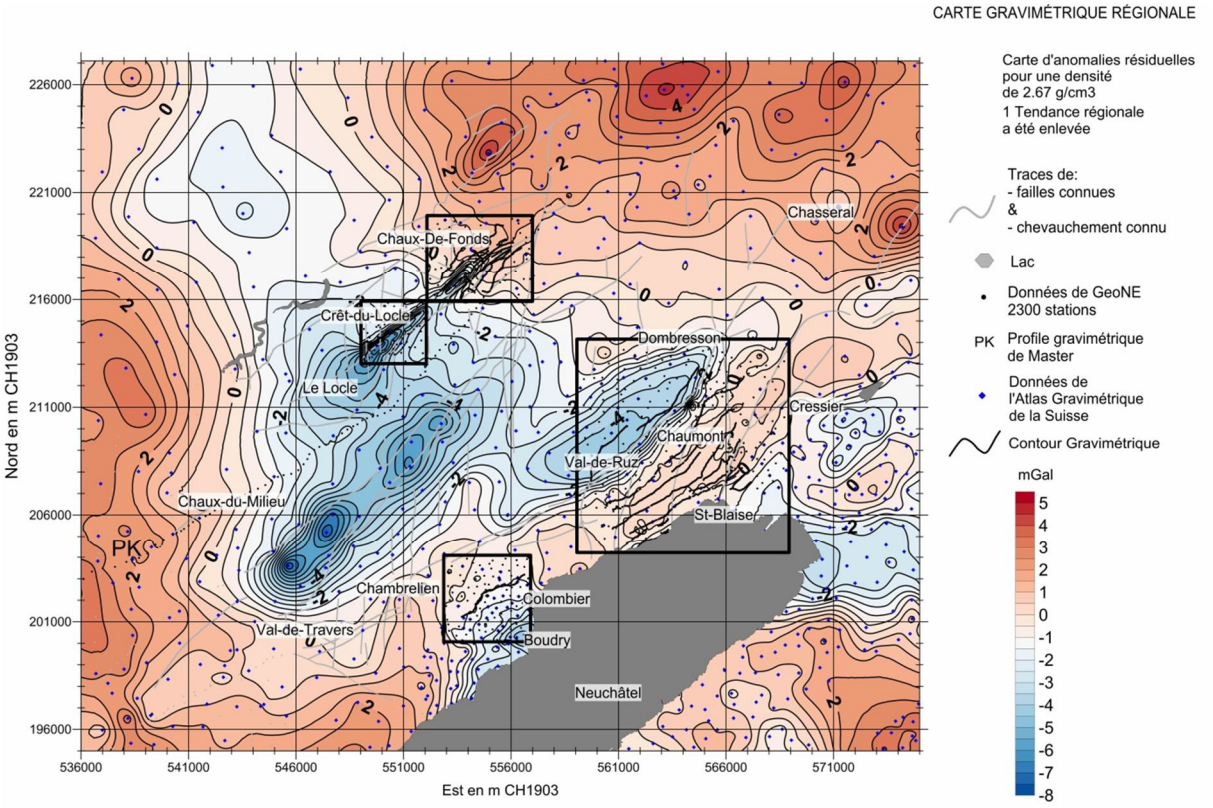



*Figure II - 19. Carte gravimétrique résiduelle régionale pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie et des stations gravimétriques GeoNE. La carte résiduelle est la carte Bouguer (Figure II - 18) à laquelle a été soustraite la tendance régionale (Annexe, Figure A04). Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'études (voir texte pour le détail).*

## 4.3.2 Exemple de cartes d'anomalies résiduelles

Les cartes d'anomalies gravimétriques résiduelles sont présentées et discutées dans les Chapitres suivants :

- Chapitre III : cartes d'anomalies gravimétriques résiduelles de la région de Neuchâtel – St Blaise,
- Chapitre IV : cartes d'anomalies gravimétriques résiduelles de la région de La Chaux-de-Fonds – Le Locle,
- Chapitre V : carte d'anomalies gravimétriques résiduelles de la région d'Auvernier – Boudry.

Comme exemple pour d'écrire ce que représente une carte d'anomalies gravimétriques résiduelles, le choix a été fait de prendre la région de Neuchâtel – St Blaise. Toutefois, pour une description et une interprétation complète, le lecteur est invité à lire le Chapitre III.

## REGION DE NEUCHATEL – ST-BLAISE

Réalisée entre octobre 2010 et avril 2012, la carte des anomalies gravimétriques résiduelles de la région Neuchâtel – St-Blaise permet de confirmer l'existence d'anomalies (Figure II - 20). Cette carte a été obtenue grâce aux données gravimétriques Bouguer effectuées dans le cadre de GeoNE (1148 stations gravimétrique GeoNE, Figure II - 18), qui ont été corrigées de la tendance régionale. Comme cela a été expliqué précédemment, les données gravimétriques GeoNE sont le résultat des corrections appliquées sur les données gravimétriques mesurées sur le terrain et auxquelles a été soustraite la tendance régionale. La carte d'anomalies résiduelles met en évidence l'existence d'anomalies gravimétriques liées :

- aux bassins sédimentaires post-mésozoïques dans le Val-de-Ruz, dans l'est de Marin et St-Blaise, ainsi que dans la vallée de St-Blaise à Enges ;
- aux failles dans la région Neuchâtel – St-Blaise. Ces failles sont d'orientation générale N-S et sont associées à la mise en place des différents anticlinaux chevauchants de Chaumont et du Bois des Prêtres (nord de Marin, Figure II - 20).

Les plus fortes diminutions sont associées aux bassins sédimentaires post-Mésozoïques, qui sont marqués par des anomalies allant de -1.5 à -4.5 mGal. Des diminutions gravimétriques locales d'amplitude 0.6 à 1 mGal sont aussi bien définies. La majorité de ces petites diminutions gravimétriques sont allongées et d'orientation N-S ou NO-SE et sont clairement associées aux failles (Figure II - 20). Les failles les mieux marquées en termes de signature gravimétrique sont les failles de St-Blaise et de Pierre-à-Bot, ainsi que celle de Fontaine-André. Les anomalies gravimétriques positives sont peu marquées (entre 0.5 à 0.7 mGal) et sont associées aux anticlinaux. Il est aussi à noter que les fronts de chevauchement sont à chaque fois clairement marqués par des contrastes de valeur gravimétrique.

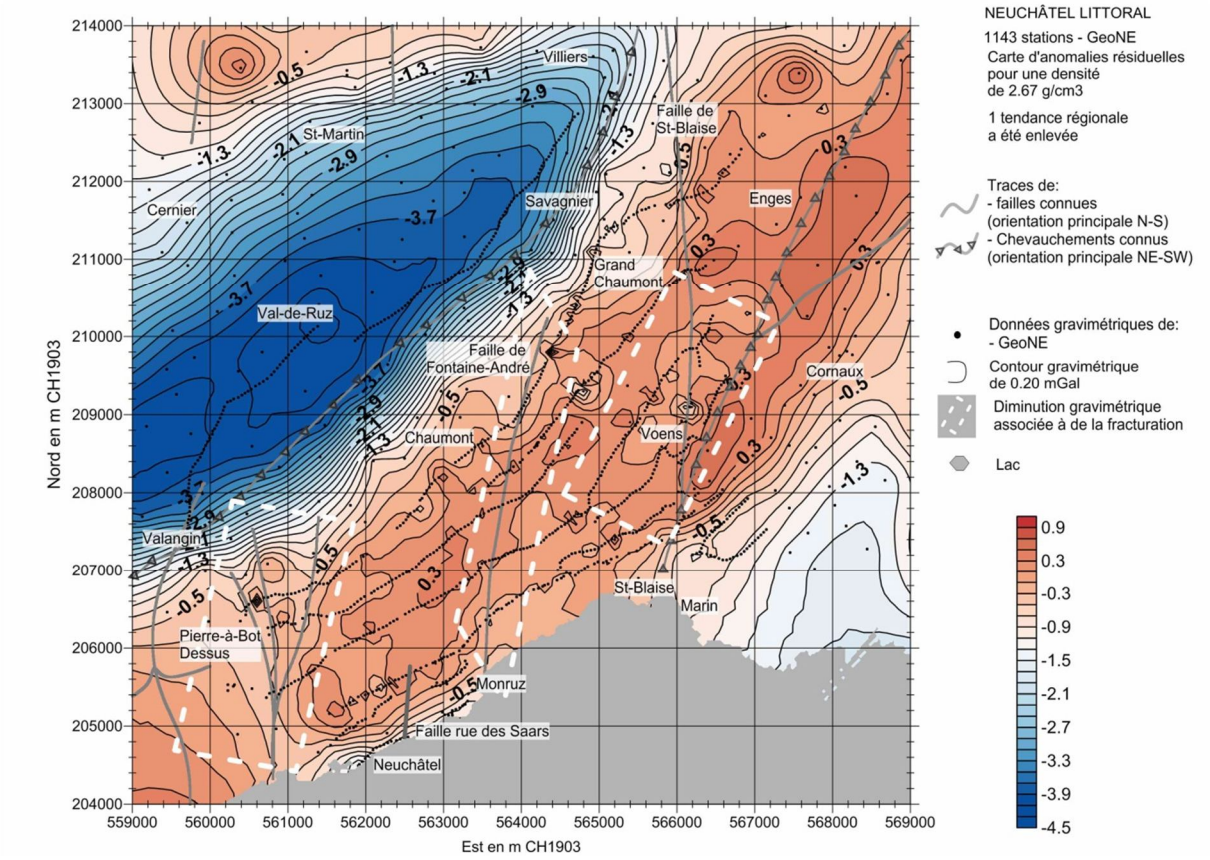



*Figure II - 20. Carte gravimétrique résiduelle de Neuchâtel – St-Blaise. Les lignes blanches en pointillés sont des anomalies gravimétriques qui sont supposées représenter des failles (Voir texte pour le détail).*

## 4.4 Modélisation directe

### 4.4.1 Présentation de la modélisation directe

On appelle modélisation directe la réponse gravimétrique théorique obtenue par calcul mathématique dans les trois dimensions, qui se base sur un modèle géologique 3D (Figure II - 6), ainsi que sur des valeurs de densité associées à chaque couche. Cette méthode permet de contrôler la qualité d'un modèle géologique 3D en comparant sa réponse gravimétrique avec la carte gravimétrique résiduelle mesurée. Dans le cas où le modèle géologique est considéré comme reflétant suffisamment bien la réalité, le modèle direct permet aussi d'estimer les variations de densité associées à des zones de fracturation. Cela est possible en cherchant par calcul itératif quelles sont les valeurs de densité pour des couches géologiques données, qui permettent de reproduire les anomalies gravimétriques associées à des zones de fracturations (p. ex. : zones de faille).

Dans le cadre du projet GeoNE, pour chacune des régions d'études, les modèles géologiques 3D (Figure II - 6 et Figure II - 7) ont été utilisés pour calculer leur réponse gravimétrique théorique (cf. Chapitres III, IV et V), qui a été ensuite comparée aux cartes gravimétriques résiduelles correspondantes (Figure II - 20). La validation de chaque modèle est discutée pour chaque région dans les chapitres suivants :

- Pour la région de Neuchâtel – St-Blaise au Chapitre III.
- Pour la région de Le Locle - La Chaux-de-Fonds au Chapitre IV.
- Pour la région d'Auvernier – Boudry au Chapitre V.

Les valeurs de densité présentées dans le Tableau 6 sont basées sur deux types d'informations : valeurs mesurées et valeurs prises de la littérature. Le groupe des valeurs de densité mesurées regroupe des valeurs de densités mesurées sur des roches calcaires des formations géologiques affleurantes dans le canton de Neuchâtel. Ces mesures ont été faites dans le cadre du projet IGS-NE. Ces valeurs de densité mesurées ont été obtenues sur des échantillons de roche calcaire, qui ne sont ni broyés, ni fracturés, ni karstifiés. Par conséquent, ces valeurs de densité sont considérées comme étant des valeurs maximales pour chacune des formations échantillonnées. Les effets de la fracturation, ainsi que de la karstification, sur la densité des roches calcaires, seront discutés spécifiquement pour chaque site d'étude dans les chapitres III, IV et V. Pour les autres formations rocheuses non affleurantes, les gammes de densités utilisées sont basées sur les données de littérature. Le Tableau II - 4présente un exemple de gamme de densité pour chacune des formations couramment présentes dans les modèles géologiques. Toutefois, les valeurs de chaque modèle sont présentées par région dans les Chapitres III, IV et V.

*Tableau II - 4. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région de Neuchâtel- St Blaise. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). *Mesurées dans le projet IGS-NE. # Valeurs de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. +Basées sur la littérature.*

| **Formation géologique** | **Type de roche** | **Source d'information** | **Valeurs de densité ($g.cm^{-3}$) ‡** |
|---|---|---|---|
| Post- Mésozoïque (Molasse d'eau douce supérieure, Moraine de fond, Autres dépôts tertiaires) | Marnes bigarrées et grès - gravier-marnes | Observation géologique | 2.60# – 2.89# |
| Crétacé (Albien-Barrémien-Valanginien-Hauterivien) | Calcaire | Observation géologique | 2.64* - 2.69* |
| Malm supérieur - Portlandien | Calcaire micritique-Calcaire oolithique - Marne (minoritaire) | Observation géologique | 2.65* – 2.71* |
| Malm supérieur - Kimméridgien | Calcaire micritique-Calcaire oolithique - Marne (minoritaire) | Observation géologique | 2.65* – 2.71* |
| Malm supérieur - Séquanien | Calcaire oolithique | Observation géologique | 2.65* – 2.71* |
| Malm-Argovien | Marne - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.57# |
| Dogger - Callovien | Calcaire spathique – Dalle Nacrée | Observation géologique | 2.61* – 2.67* |
| Dogger- Bathonien | Calcaire oolithique – Calcaire roux sableux - Marne | Observation géologique | 2.61* – 2.67* |
| Dogger- Bajocien | Calcaire oolithique - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.61* – 2.67* |
| Aalénien - Lias | Marne | Hypothèse | 2.12# – 2.60# |
| Keuper | Marne | Hypothèse | 2.10# – 2.73# |
| Muschelkalk supérieur | Calcaire | Hypothèse | 2.53# – 2.83# |
| Muschelkalk-Trias inférieur | Gypse | Hypothèse | 2.13# – 2.83# |
| Socle cristallin | Roche cristalline | Hypothèse | 2.60# – 2.83# |

## SOUSTRACTION DES EFFETS DU TERTIAIRE ET DU QUATERNAIRE

Les formations rocheuses et les dépôts sédimentaires des ères Tertiaire et Quaternaire, couramment appelés dépôts post-mésozoïques, sont souvent en cours de diagenèse, ce qui leur donne un aspect mal induré ou pas du tout consolidé. Ce faible niveau de maturité confère à ces dépôts une densité plus faible que les autres roches carbonatées matures du Mésozoïque. Ces différences de densité, qui peuvent être importantes entre les roches post-mésozoïques et les roches mésozoïques, créent des anomalies gravimétriques négatives importantes qui viennent cacher ou tout du moins atténuer les signatures gravimétriques des roches du Mésozoïque. Comme les aquifères profonds du Malm, du Dogger et du Muschelkalk font partie des formations géologiques du Mésozoïque, il est important d'éliminer au mieux les effets des dépôts post-mésozoïques, tels que molasse, moraine, sédiments lacustres et fluvioglaciaires (Tableau II - 5). Cette opération de soustraction de ces effets (stripping) permettra alors de mieux mettre en évidence les anomalies gravimétriques liées aux failles dans les roches mésozoïques. La méthode de stripping a été appliquée à chacune des cartes gravimétriques résiduelles (Figure II - 20) pour soustraire les effets gravimétriques dus à ces dépôts post-mésozoïques.

Dans ce but, la modélisation géologique 3D est utilisée pour modéliser la couche géologique post-mésozoïque (Tertiaire et Quaternaire), puis la réponse gravimétrique associée à cette couche est calculée en utilisant les densités estimées de ces dépôts sédimentaires avec le code Gravfor3Dcode (Tableau II - 5).

*Tableau II - 5. Quantification des densités des roches formant les dépôts sédimentaires post-Mésozoïques (Tertiaire & Quaternaire) Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de littérature.*

| **Formation Géologique** | **Type de roche** | **Source de l'information** | **Valeur de densité ($g.cm^{-3}$)** |
|---|---|---|---|
| Molasse d'eau douce inférieure | Marnes bigarrées et grès | Description carte géologique- | 2.30 – 2.57 |
| Molasse d'eau douce supérieure | Marnes et calcaires | Description carte géologique- | 2.30 – 2.57 |
| Moraine de fond | Gravier | Description carte géologique-hypothèse | 2.00 – 2.30 |
| Autres dépôts quaternaires | Graviers, sédiments lacustre, sédiments fluviaux et moraines, marnes, dépôts fluvioglaciaires | Description carte géologique-littérature | 1.8 – 2.5 |
| Autres dépôts tertiaires | Marnes | Description carte géologique-littérature-log de forage du Jura | 2.3 – 2.67 |

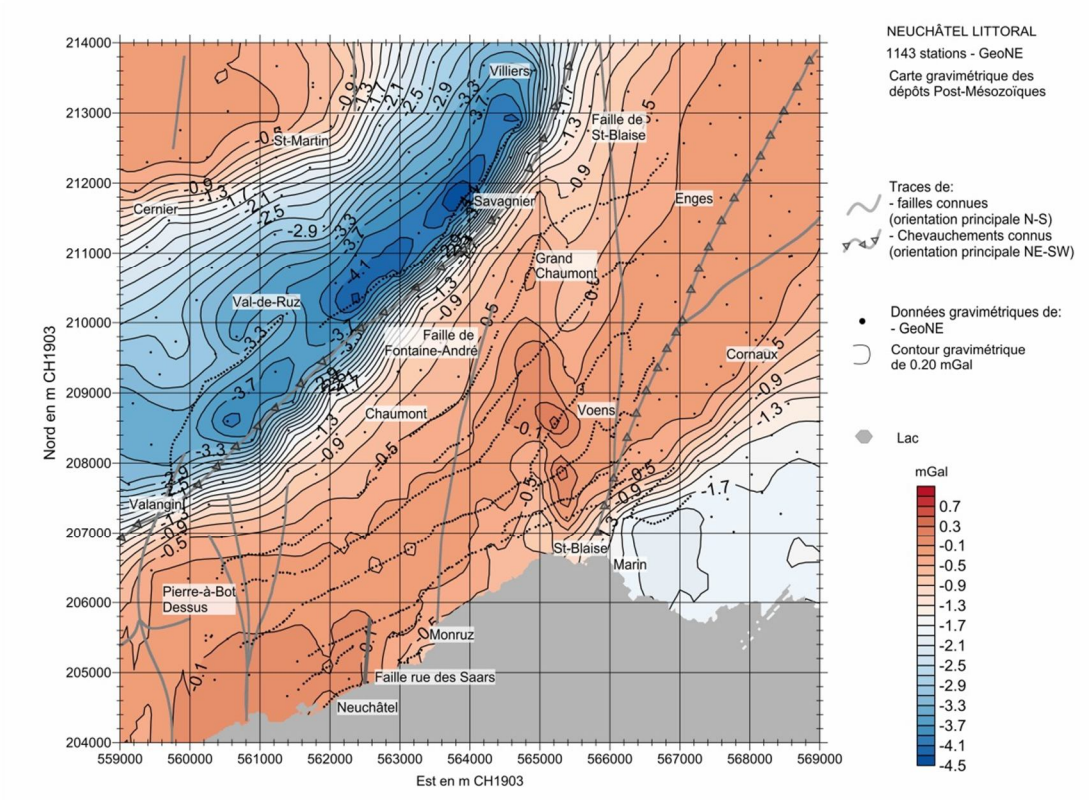



*Figure II - 21. Carte gravimétrique des effets des dépôts post-Mésozoïques pour la région de Neuchâtel – St-Blaise (voir texte pour le détail).*

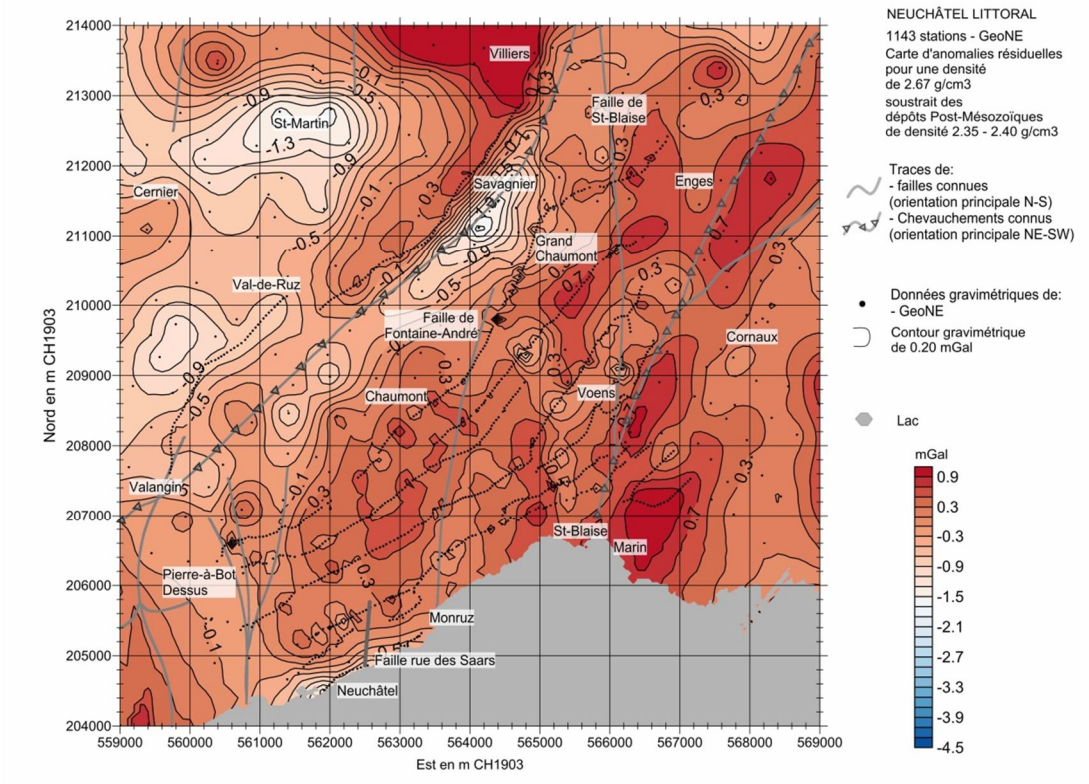



*Figure II - 22. Carte gravimétrique résiduelle après soustraction (stripping) dépôts post-Mésozoïques pour la région de Neuchâtel – St-Blaise (voir texte pour le détail).*

Les dépôts post-mésozoïques ont des niveaux de maturité variables et présentent ainsi des variations latérales de faciès (Suter and Lüthi, 1969 ; Meia and Becker, 1976), ce qui génère des variations latérales de densité. Sur la base de la littérature (Reynolds, 2011), ainsi que sur les types de dépôts indiqués sur les cartes géologiques (Suter and Lüthi, 1969 ; Meia and Becker, 1976), les densités associées à ces dépôts post-mésozoïques varient entre 2.0 et 2.57 $g.cm^{-3}$. De plus, en raison des faibles épaisseurs de ces couches, il n'est pas possible de modéliser exactement l'effet gravimétrique de ces dépôts post-mésozoïques. Par conséquence, plusieurs modèles ont été calculés avec des densités différentes pour s'approcher au plus près de la réalité (Figure II - 21). Une description des densités des dépôts post-mésozoïques présents dans le canton de Neuchâtel est présentée dans le Tableau II - 5.

Les cartes des effets gravimétriques des dépôts post-mésozoïques sont présentées pour information dans les annexes de ce rapport (Annexe, Figure A12 à A15), tandis que les cartes gravimétriques résiduelles après soustraction (« stripping ») des dépôts post-mésozoïques sont détaillées pour chaque région en Figure II - 22 et en annexe les Figures A11 à A16.

### *Région de Neuchâtel – St-Blaise*

Pour la région de Neuchâtel – St-Blaise, les épaisseurs des dépôts post-mésozoïques montrent de grandes différences entre ceux trouvés dans le Val-de-Ruz et ceux présents dans la zone de St-Blaise et Marin. De plus, les variations de lithologie entre chaque zone ont pour conséquence de créer une différence de densité pour ces dépôts post-mésozoïques. Ces différences dans les dépôts s'expriment clairement à travers des contrastes gravimétriques de 2.35 $gm.cm^{-3}$ pour le Val de Ruz et de 2.40 $g.cm^{-3}$ pour la zone du littoral (Tableau II - 5). Bien que chacune de ces deux zones sédimentaires post-mésozoïques soit composée à la fois de Molasse d'eau douce (marne bigarrée et grès) et de moraine, il apparaît que l'épaisseur des dépôts morainiques dans le Val-de-Ruz est bien plus importante que dans la zone de Marin. De plus, les mollasses d'eau douce, faites de marnes bigarrées et de grès, sont typiquement légèrement plus denses que les autres moraines. La correction de l'effet gravifique des dépôts post-mésozoïques permet de mettre en évidence les signatures gravimétriques des couches des formations mésozoïques (Figure II - 22).

## CONCLUSIONS SUR LA CARTOGRAPHIE GRAVIMETRIQUE

Collectés entre octobre 2010 et juin 2012, les 2300 points de mesure gravimétrique qui ont été réalisés dans le cadre du projet GeoNE, ont permis d'améliorer grandement la carte d'anomalies gravimétriques résiduelles de chacune des quatre zones étudiées dans le canton de Neuchâtel. Le levé systématique par GPS différentiel de chaque point de mesure gravimétrique, ainsi que la mise en place d'un protocole rigoureux lors des mesures gravimétriques, puis lors des corrections gravimétriques ont permis d'atteindre une grande confiance dans les résultats gravimétriques avec une incertitude estimée à 0.065 mGal. En comparaison, dans l'Atlas Suisse de Gravimétrie, les données gravimétriques suisses ont une incertitude de 0.200 mGal.

Le calcul systématique des effets gravifiques des caves et du lac de Neuchâtel a permis d'améliorer la résolution des cartes gravimétriques en ne gardant que les effets gravifiques provoqués par les structures géologiques.

La cartographie gravimétrique permet de mettre en évidence les zones de fracturation, qui sont le plus souvent associée à des failles. Dans le cas de faille dont le mouvement n'est pas suffisamment important pour créer des contrastes de densité lithologique de part et d'autre du plan de faille, ou lorsque la faille ne crée pas de fracturation suffisamment importante de la roche, alors dans ces deux cas, la faille ne sera pas détectable par la gravimétrie. Toutefois, pour des failles importantes, comme celles de Fontaine-André, de St-Blaise ou encore de Pierre-à-Bot (Figure II - 20), la fracturation de la roche causée par la faille est suffisamment importante pour créer des diminutions de densité des roches et donc des anomalies gravimétriques.

L'utilisation de modèles géologiques 3D pour le calcul de la réponse gravimétrique théorique (modélisation directe) permet d'extraire les couches sédimentaires les plus récentes (post-mésozoïques) et ainsi de mieux mettre en évidence la signature gravimétrique des couches du Mésozoïque, qui renferment les aquifères profonds (Malm, Dogger, Muschelkalk). De la même manière, la modélisation directe est utilisée pour valider les modèles géologiques 3D en comparant leurs réponses gravimétriques calculées avec les cartes d'anomalies gravimétriques résiduelles.

Chaque modèle gravimétrique, ainsi que leur implication dans la caractérisation des aquifères profonds et des zones de faille, sont présentés dans les chapitres III, IV et V.

## 4.5 Bibliographie

Altwegg P., 2012. Inventaire géothermique et structural du canton de Neuchâtel : IGS-NE, note d'avancement. Laboratoire de Géothermie-CREGE, Neuchâtel, 13 pp.

Altwegg P., 2006. Application de la microgravimétrie urbaine, SIG et modélisation 3D au métro M2 (Lausanne), Master en géologie de l'ingénieur, Université de Lausanne, 123 pp.

Klingele E. & Olivier R., 1980. La nouvelle carte gravimétrique de la Suisse (anomalie de Bouguer).

Mauri G., Abdelfettah Y., Negro F., Schill E. & Vuataz F.-D., 2011. Multi-disciplinary study for the exploration of deep low enthalpy geothermal reservoirs, Neuchâtel, Switzerland. AGU Fall Meet., Abstract H51C-1219.

Meia J. & Becker F., 1976. Atlas géologique de la Suisse, 1:25 000, Feuille 67 de l'Atlas, 64 Neuchâtel, Commission géologique de la Suisse.

Radogna P. V., Olivier R. & Logean P., 2004. Bedrock modelling in urban environment by microgravimetry : methodology for topographic correction, 2nd Swiss. Geos. Meet. Lausanne.

Radogna P. V., Olivier R. & Logean P., 2003a. Evaluation et calcul des effets des constructions en microgravimétrie urbaine, 4th Geofcan Meeting, Paris.

Radogna P. V., Olivier R., & Logean P., 2003b. Le Métro M2 de Lausanne: Site exemplaire d'une application de microgravimétrie urbaine, Université de Lausanne.

Reynolds J.M., 2011, An Introduction to applied and environmental geophysics, Second Edition, Wiley-Blackwell, ISBN: 978-0-471-48535-3.

Suter H. & Lüthi E., 1969. Atlas géologique de la Suisse, 1:25 000, Feuille 51 de l'Atlas, 1144 Val-de-Ruz, Commission géologique de la Suisse.

# 5. Introduction à la méthode de sismique réflexion

La sismique réflexion est une méthode géophysique non-destructive de prospection du sous-sol, qui permet de visualiser les structures géologiques en profondeur grâce à l'enregistrement en surface des échos d'ondes acoustiques traversant le sous-sol. Principalement utilisée dans l'exploration pétrolière, cette méthode est également adéquate pour tout type d'étude nécessitant des investigations structurales en profondeur, telles que pour la géothermie profonde (Brogi et al., 2003 ; Bujakowski et al., 2010 ; Casini et al., 2010), pour ne citer que quelques exemples. Principalement utilisée dans l'exploration pétrolière, cette dernière permet de visualiser les structures géologiques en profondeur grâce à l'enregistrement en surface des échos d'ondes acoustiques.

Générées artificiellement depuis la surface par des explosifs ou des camions vibreurs (Figure II - 23), ces ondes acoustiques se propagent en profondeur dans toutes les directions. Lorsqu'elles rencontrent un réflecteur sismique en profondeur, correspondant la plupart du temps à l'interface entre deux formations géologiques présentant un contraste de vitesse de propagation suffisant pour générer une réflexion du signal, une partie de ce dernier est réfléchi vers la surface et enregistré par des capteurs (géophones) alignés le long du profil à investiguer (Figure II - 24). Le reste du signal se propage plus en profondeur jusqu'au réflecteur suivant, où une partie est à nouveau réfléchie vers la surface et ainsi de suite jusqu'à ce que l'énergie sismique soit complètement dissipée ou devenue trop faible pour remonter à la surface et y être enregistrée. Les temps d'arrivée entre les signaux remontant des différents réflecteurs du sous-sol permettent, après traitement, de localiser ces derniers sur une échelle verticale en « temps double ». En connaissant la vitesse de propagation au sein des différentes couches géologiques traversées ainsi que l'épaisseur de ces dernières, cette échelle verticale en « temps double » peut être convertie en profondeur.

*Figure II - 23. Camion vibreur. A chaque point de tir, ces engins mettent le sol en résonance durant une vingtaine de secondes en couvrant une gamme de fréquence prédéfinie. Les vibrations sont transmises au sol par le biais d'une lourde plaque métallique située sous le camion, frappant le sol à la fréquence désirée (Source de l'image : www.dmp.wa.gov.au).*

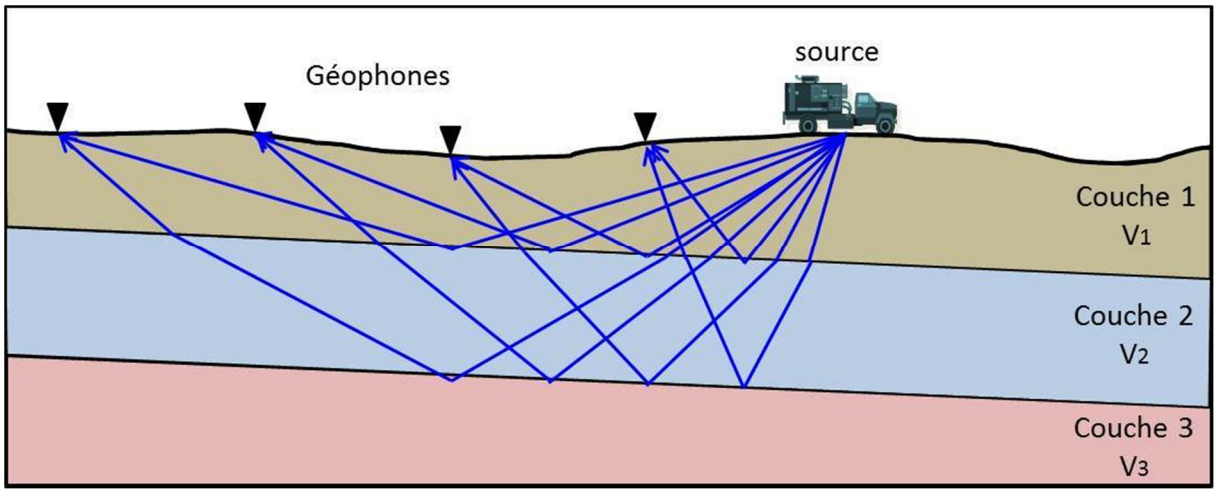



*Figure II - 24. Principe d'acquisition de sismique réflexion. Une onde acoustique est générée à partir d'une source (camions vibreur, explosifs). Lorsqu'elles rencontrent une interface entre deux couches géologiques présentant un contraste de vitesse de propagation suffisamment important ($V_1 \neq V_2 \neq V_3$) pour générer un réflecteur sismique, une partie du signal est renvoyé vers la surface où son temps d'arrivée est enregistré par des géophones placés le long de la ligne à investiguer. En connaissant les vitesses de propagation des différentes couches traversées (modèle de vitesse), ces temps d'arrivée (temps double) peuvent être convertis en profondeur, permettant de situer la position des différents réflecteurs dans le sous-sol.*

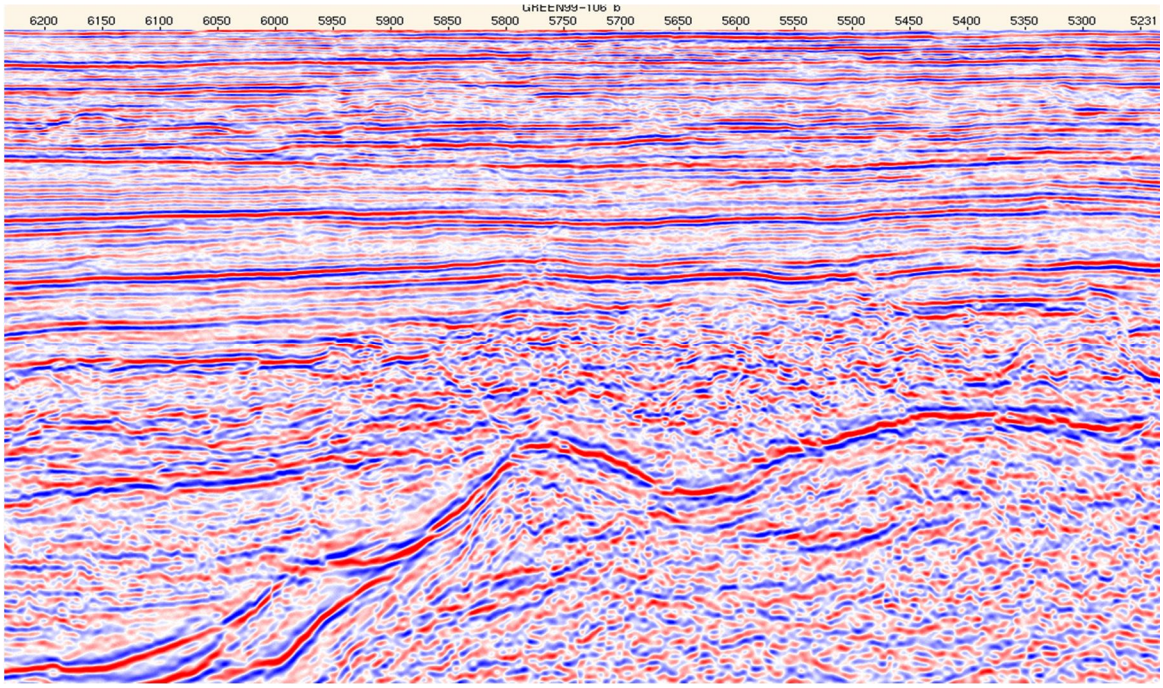



*Figure II - 25. Exemple d'une ligne sismique 2D mettant en évidence la géométrie et les profondeurs des différents réflecteurs correspondant aux principales limites de couches géologiques qui forment le sous-sol.*

Comme toutes les méthodes géophysiques, la sismique réflexion présente également ses limitations. En plus des difficultés d'accès que peuvent engendrer une acquisition en milieu urbain, il est également important que les différentes formations géologiques qui composent le sous-sol présentent entre elles des différences de vitesse (principalement liées à des différences de densité) suffisantes pour engendrer une réflexion des ondes sismiques. Il faut également définir avec soin les

fréquences à utiliser de manière à obtenir un signal qui puisse illuminer au mieux les réflecteurs aux profondeurs visées puisque, de par sa nature, le terrain tend à atténuer les hautes fréquences. Les hautes fréquences permettent donc une profondeur d'investigation limitée mais offrent une meilleure résolution alors que les basses fréquences pénètrent plus profondément dans le sous-sol, mais au détriment de la résolution verticale. Pour chaque campagne, il est donc nécessaire de trouver la gamme de fréquences d'acquisition la plus optimale pour atteindre les profondeurs requises, tout en y gardant la meilleure résolution possible. Un exemple de ligne sismique 2D est illustré à la Figure II - 25.

## 5.1 Planification d'une campagne sismique

Dans le canton de Neuchâtel, mise à part quelques lignes sismiques très anciennes (Sommaruga, 1997) dont la qualité et le niveau de détail en profondeur ne permettent pas de fournir les informations nécessaires au calage des modèles géologiques en profondeur, il n'existe pas de données géologiques profondes (sismique récente, forages profonds) permettant de fournir les renseignements requis aux profondeurs qui nous intéressent. Dans les modèles couvrant les différentes régions d'étude du canton, la géométrie des formations et structures en profondeur ne sont établies que par interpolation de données structurales observées en surface, couplée à une connaissance de la géologie locale. Pour réduire cette incertitude, il serait judicieux d'acquérir quelques lignes sismiques 2D afin de pouvoir mieux caler les modèles géologiques en profondeur et pouvoir ainsi améliorer la planification de futur forages géothermiques.

Une campagne d'acquisition sismique se décline en plusieurs phases successives, qui finalement, permettent d'obtenir des données utilisables pour une interprétation géologique en profondeur sous la forme de profils sismiques 2D tels que l'exemple de la Figure II - 25:

- Une phase de planification de la campagne, incluant le concept des lignes (tracés, longueurs, etc.) ainsi qu'une première sélection des paramètres d'acquisition (fréquence de tir, pas d'échantillonnage, longueur des flûtes sismiques, etc.) en fonction des cibles à investiguer et de leur profondeur présumée.
- Une phase de permittage qui consiste en l'obtention des autorisations de passage et de tirs (mise en vibration du sol par le biais de camions vibreurs) auprès des propriétaires des terrains qui devront être traversés durant la phase d'acquisition. Il peut être judicieux de joindre à cette étape une campagne d'information auprès du grand public.
- La phase d'acquisition à proprement parler, qui est aussi la plus lourde sur le plan logistique et financier, puisqu'elle implique la mobilisation du matériel et de l'équipe d'acquisition (camions vibreurs, flûtes de géophones).
- Une phase de traitement des données, qui par l'intermédiaire de différentes étapes successives permet de convertir les données d'acquisition brutes en données exploitables pour leur interprétation.
- Une phase de conversion temps – profondeur. Par le biais d'un modèle de vitesse établi soit sur la base de sondages existants, soit à partir d'une analyse particulière des résultats d'acquisition multitraces, les profils sismiques traités dont l'axe vertical est donné en « temps double » (temps d'aller-retour du signal entre la surface et son point de réflexion en profondeur) sont convertis en profondeur.

## 5.2 Profils sismiques synthétiques prévisionnels

Afin de poser les jalons pour la planification d'une future campagne d'acquisition sismiques sur les différentes régions d'étude du canton, différents profils sismiques synthétiques ont été générés à

partir des modèles géologiques actuels, pour mettre en évidence les structures profondes susceptibles d'être mises en évidences par cette méthode. Moyennant les incertitudes liées au modèle géologique, mais également au modèle de vitesse utilisé, ces profils sismiques synthétiques donnent un aperçu théorique de ce que devraient révéler les lignes sismiques 2D proposées. Pour cet exercice, des vitesses de propagation d'ondes sismiques ont été attribuées aux différentes formations géologiques du modèle sur la base de mesures acoustiques disponibles dans quelques forages de la région (Essertines, Vaud & Risoux, France) traversant les mêmes unités géologiques (Sommaruga, 1997). Ces vitesses sont résumées à la Tableau II - 6. Il est important de noter que les véritables vitesses sismiques au niveau des zones d'études pourront quelque peut différer de ces estimations régionales. Par ailleurs, ne disposant pas de mesures dans le socle cristallin, une vitesse théorique de 6300 $m.s^{-1}$ y est assignée.

*Tableau II - 6. Vitesse de propagation des ondes sismiques au sein des principales formations géologiques formant le sous-sol de la région, établies sur la base de mesures de puits dans les forages d'Essertines (VD) et du Risoux (France) (Sommaruga, 1997) et assignées aux modèles géologiques pour la génération des profils sismiques synthétiques.*

| **Formation** | **Vitesse [$m.s^{-1}$]** |
|---|---|
| Tertiaire | 3485 |
| Crétacé | 4486 |
| Portlandien, Kimméridgien, Séquanien | 4080 |
| Argovien | 3800 |
| Callovien, Bathonien, Bajocien | 4500 |
| Aalénien Lias | 3518 |
| Keuper | 4758 |
| Muschelkalk supérieur | 4884 |
| Muschelkalk Trias | 4884 |
| Socle | 6300 |

Par la génération de profils sismiques synthétiques, une analyse de sensibilité de différents paramètres d'acquisition a été effectuée de manière à définir de manière la plus optimale les principales variables rentrant en ligne de compte pour la planification, l'évaluation des coûts et la mise en œuvre d'une campagne d'acquisition sismique 2D sur les différentes régions concernées. Ces principaux paramètres sont : la gamme de fréquences utilisée pour les tirs, les paramètres liés à la géométrie de l'acquisition (espacements entre les points de tirs, espacements des géophones, etc.), ainsi que le taux d'échantillonnage qui intervient au niveau de la conversion du signal analogique (signal mesuré en continu par les récepteurs) en une série d'échantillons (signal numérique).

Les informations discutées dans les chapitres III, IV, V de ce rapport permettent de donner une idée de ce qu'impliquerait une campagne d'acquisition sismique dans le canton. Néanmoins, une analyse plus poussée de ces paramètres, une planification plus élaborée, ainsi qu'un chiffrage plus précis effectués par les experts des compagnies d'acquisition sismique mandatées sera évidemment nécessaire dans le cas où le canton de Neuchâtel venait à commander une telle étude.

## 5.3 Bibliographie

Brogi A., Lazzarotto A., Liotta D. & Ranalli G., 2003. Extensional shear zones as imaged by reflection seismic lines : the Larderello geothermal field (central italy). Tectonophysics, Volume 363, Issues 1-2 February 2003: 127-139.

Bujakowski W., Barbacki A., Czerwińska B., Pająk L., Pussak M., Stefaniuk M. & Trześniowski Z., 2010. Integrated seismic and magnetotelluric exploration of the Skierniewice, Poland, geothermal test site. Geothermics, Volume 39, Issue 1, March 2010: 78-93.

Casini M., Ciuffi S., Fiordelisi A., Mazzotti A. & Stucchi E., 2010. Results of a 3D seismic survey at the Travale (Italy) test site. Geothermics, Volume 39, Issue 1, March 2010: 4-12.

Sommaruga A, 1997. Geology of the central Jura and the molasse basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. Mémoire de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, tome XII. 176 pp.

# 6. Mesure des gaz dans les sols

## 6.1 Bases de la méthode

L'analyse des composés volatiles dans les sols est une technique largement employée pour la détection de gîtes métallifères et pour le suivi de contaminants, mais également pour la détection de failles actives (Reimer, 1980; Toutain & Baubron, 1999; Kennedy & van Soest, 2007) et de réservoirs géothermiques (Roberts et al., 1975) .

Les principaux gaz analysés dans les sols sont le dioxyde de carbone ($CO_2$), l'hélium (He) et le radon (Rn). Chacun de ces gaz a une source spécifique. Le $CO_2$ est un gaz majeur dans les sols et les eaux souterraines et sa source est principalement l'activité biologique et l'équilibre avec les minéraux carbonatés, même si une fraction de ce gaz peut également être issue du manteau terrestre. L'hélium provient de la croûte terrestre, de la désintégration radioactive dans la croûte et de l'atmosphère, où sa concentration est homogène, à 5.24 ppm.

On peut trouver des flux d'hélium importants dans deux types d'environnement principaux : dans les régions volcaniques, où l'He provient du dégazage de magma et est transporté avec le flux important de gaz magmatiques, ainsi que dans les zones de grande activité sismique. Les mouvements sismiques tendent à maintenir une perméabilité élevée dans les fractures actives, ces dernières jouant le rôle alors de conduits préférentiels pour les gaz piégés dans la croûte ou le manteau. Le flux important de gaz lié aux failles actives provoque des anomalies de concentration de ces gaz dans les sols dans les zones où ces failles intersectent la surface (Baubron et al., 2002).

L'hélium est également utilisé à des fins de prospection géothermique en mesurant sa concentration dans des fluides issus des sources et forages froids et géothermaux (voir par exemple : Hristov, 2000; Marty, 1987 et 1992). Il peut en outre être utilisé comme traceur dans des boues lors d'un suivi de forage, Vuataz et al. (1990) ayant montré une corrélation entre des anomalies positives d'He dans les boues de forages de deux sites géothermiques avec la présence de fractures perméables.

Dans le cadre du projet GeoNE, de nombreuses failles ont été détectées dans le canton grâce à la géologie de terrain et aux méthodes géophysiques. Cependant, aucune de ces méthodes ne donne d'information sur la perméabilité de ces structures, un paramètre primordial dans l'exploration d'aquifères géothermaux.

L'analyse de l'hélium et du dioxyde de carbone dans les gaz de sol peut potentiellement aider à déterminer quelles failles représentent des conduits connectant les parties profondes de la croûte avec la surface. La probabilité de mesurer une concentration significative de radon est faible, vu sa courte période de demi-vie et la longueur du chemin à parcourir dans l'environnement investigué. Ce gaz n'a par conséquent pas été considéré dans cette première campagne de mesures.

## 6.2 Mesures de $CO_2$ et He dans le canton

Les concentrations de $CO_2$ et d'hélium ont été mesurées sur trois profils perpendiculaires à des failles connues et se superposent à des profils de mesures gravimétriques, là où ces dernières ont pu confirmer la présence de failles (profils gravimétriques C, C2 et D). Un des profils passe sur la faille de Fontaine-André et deux autres considèrent la faille de St-Blaise. Ces zones ont été choisies pour être parmi les moins urbanisées autour de ces deux zones de failles de St-Blaise et de Fontaine-André, les remaniements du sol et le bâti souterrain pouvant avoir une grande influence sur le cheminement des gaz de sols. Les résultats des mesures de gaz ont été comparés aux résultats de gravimétrie afin

de déterminer s'ils corroborent ces derniers et si les gaz de sols peuvent être validés comme méthode d'exploration dans un environnement géologique comme celui du canton de Neuchâtel.

Nous avons utilisé la méthode décrite par Michel-le-pierres (2010). Les gaz de sol ont été échantillonnés dans des trous de 0.8 à 1 m de profondeur et de 1 cm de diamètre. Les trous ont été réalisés à l'aide d'une perceuse Hilti® équipée d'une mèche de 12 mm de diamètre. Le prélèvement a ensuite été effectué par une canne de cuivre de 10 mm de diamètre percé de quelques trous de 2 mm à sa base. Le gaz a été pompé au moyen de la pompe intégrée à un analyseur de gaz portable, mesurant également les concentrations dioxyde de carbone, de méthane et d'oxygène. Des échantillons de gaz ont été prélevés dans des sacs en Tedlar® connectés à la sortie de l'analyseur de gaz pour que l'hélium soit analysé à la fin de chaque demi-journée d'échantillonnage par spectrométrie de masse. L'échantillon a été prélevé lorsque les valeurs de $CO_2$, $CH_4$ et $O_2$ étaient stabilisées, soit généralement après 1 à 2 minutes. Les conditions météorologiques (pression, température, précipitations dans les derniers jours) ont également été consignées, sachant que la pression atmosphérique et l'humidité du sol peuvent significativement influencer les concentrations de gaz dans le sol (Hinkle, 1994). La Figure II - 26 montre le processus d'analyse et d'échantillonnage sur le terrain.

Les points d'échantillonnage sont séparés d'environ 10 m autour des zones de failles et sont plus espacés, jusqu'à 25–30 m, dans les zones où aucune faille n'est connue. L'espacement moyen est d'environ 20 m. Les coordonnées des points d'échantillonnage ont été mesurées au moyen d'un GPS différentiel assurant une précision de ± 4 cm en terrain découvert et pouvant baisser à environ 70 cm en milieu forestier dense. Cette précision a été jugée suffisante en relation avec l'espacement moyen des stations.

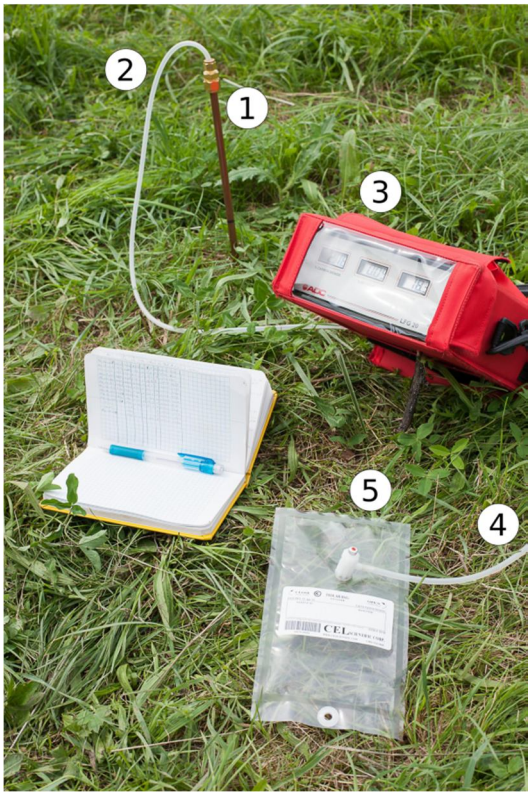



*Figure II - 26. Equipement d'échantillonnage et d'analyse des gaz de sols. (1) Tige de cuivre insérée à 80—100 cm de profondeur. (2) Tube de silicone reliant le tube de cuivre à l'analyseur. (3) Analyseur de $CO_2$, $CH_4$ et $O_2$. (4) Tube de silicone reliant la sortie de l'analyseur au sac d'échantillonnage. (5) Sac d'échantillonnage*

# 6.3 Analyses et traitement des données

## 6.3.1 Dioxyde de carbone, méthane et oxygène

Les mesures de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxygène ont été effectuées directement sur le terrain au moyen d'un analyseur de gaz portatif (modèle LFG20, ADC Gas Analysis Ltd.). Le $CO_2$ et CH4 sont analysés au moyen d'un détecteur infrarouge et l'oxygène par électrochimie.

Les mesures des trois gaz ont été étalonnées en utilisant l'air ambiant, où les concentrations respectives sont de 0.03 %, 0.00 % et 20.9 %, pour le $CO_2$, le $CH_4$ et l'$O_2$. La précision de mesure a été reprise du constructeur de l'instrument, soit ± 0.5 % pour le $CO_2$ et le $CH_4$ et ± 0.4 % pour l'$O_2$, en valeurs absolues.

## 6.3.2 Hélium

Les échantillons de gaz de sols ont été collectés dans des sacs en Tedlar® puis analysés dans les quatre heures suivant l'échantillonnage afin d'éviter toute dérive induite par la conservation des échantillons. L'analyse a été effectuée par spectrométrie de masse au moyen d'un détecteur de fuite de type Adixen ASM 102 S (Pfeiffer Vacuum GmbH).

Les analyses ont été étalonnées à l'aide d'un standard à 50.1 ppm et d'échantillons d'air prélevés sur le terrain (5.24 ppm). La réponse de l'instrument est donnée comme linéaire dans la plage 0—100 ppm. Les effets d'une éventuelle dérive instrumentale ont été compensés en calculant la différence entre une série d'analyse du standard en début et en fin de session d'analyse.

L'erreur analytique a été mesurée en calculant l'écart type sur toutes les analyses d'air effectuées, au nombre de 49, après correction de la dérive instrumentale selon la méthode décrite ci-dessus. La moyenne est de 5.24, ce qui témoigne d'une bonne justesse des mesures, et l'écart-type de 0.14. La précision relative retenue est donc de ± 3 %.

# 6.4 Bibliographie

Baubron J. C., Rigo A. & Toutain J.-P., 2002, Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). Earth and Planetary Science Letters 196, 69—81.

Hinkle M.E., 1994, Environmental conditions affecting concentrations of He, $CO_2$, $O_2$ and $N_2$ in soil gases. Applied Geochemistry 9: 53—63.

Hristov V., Bojadgieva K. & Benderev A., 2000, Dissolved Helium as Indicator for Geothermal Water Prospecting, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan: 1253—1258.

Kennedy B. M. & van Soest M. C., 2007, Flow of Mantle Fluids Through the Ductile Lower Crust: Helium Isotope Trends. Science 318 : 1433—1436.

Marty B., Brach M., Criaud A., Fouillac Ch. & Vuataz F.-D., 1987. Analyse de l'hélium par spectrométrie de masse légère dans les fluides d'intérêt géothermique. C. R. Acad. Sci. Paris 305 (II) : 969—974.

Marty B., O'Nions R.K., Oxburgh E.R., Martel D. & Lombardi S., 1992, Helium isotopes in Alpine regions. Tectonophysics 206: 71—78.

Michel-le-pierres K., Gal F., Brach M. & Guignat, S., 2010, Radon, helium and $CO_2$ measurements in soils overlying a former exploited oilfield, Pechelbronn district, Bas-Rhin, France. Journal of Environmental Radioactivity 101: 835—846.

Reimer G. M., 1980, Use of Soil-Gas Helium Concentrations for Earthquake Prediction: Limitations Imposed by Diurnal Variation. Journal of Geophysical Research 85 (B6): 3107—3114.

Roberts A. A., Friedman I., Donovan T. J. & Denton H., 1975, Helium survey, a possible technique for locating geothermal reservoirs. Geophysical Research Letters 2 (6): 209—210.

Toutain J.-P. & Baubron J.-C., 1999, Gas geochemistry and seismotectonics: a review. Tectonophysics 304: 1—27.

Vuataz F.-D., Brach M., Criaud A. & Fouillac Ch., 1990, Geochemical Monitoring of Drilling Fluids: A Powerful Tool to Forecast and Detect Formation Waters, SPE Formation Evaluation 5 (2): 177—184.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

## Rapport final de la Phase 1

## Chapitre III.
## Résultats de la prospection géothermique de la région Neuchâtel - St Blaise

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

CHAPITRE III. RESULTATS DE LA PROSPECTION GEOTHERMIQUE DE LA REGION NEUCHATEL – ST BLAISE 61

1. INTRODUCTION ..... 61

2. MODELISATION GEOLOGIQUE 3D DE LA REGION NEUCHATEL-ST BLAISE ..... 62

2.1 INTRODUCTION ..... 62

2.2 MODELE GENERAL DE LA REGION DE NEUCHATEL - ST BLAISE ..... 62

2.3 VALIDATION DU MODELE GEOLOGIQUE PAR LA GRAVIMETRIE ..... 64

2.4 MODELE DETAILLE DE LA REGION DE NEUCHATEL-ST BLAISE ..... 74

3. MODELISATION DES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ET ANALYSE DES ZONES DE FRACTURATION ..... 76

3.1 MODELISATION DANS LES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ..... 76

3.2 MODELE POUR LA ZONE NEUCHATEL ..... 76

3.3 MODELE POUR LA ZONE ST BLAISE ..... 82

3.4 PROSPECTION DES GAZ DE SOLS ..... 87

3.5 ETUDE DE SITES DE FORAGE POTENTIEL ..... 95

4. POTENTIEL GEOTHERMIQUE ..... 98

4.1 MODELE THERMIQUE REGIONAL ..... 98

4.2 MODÈLES THERMIQUES DE DÉTAIL ..... 102

5. POTENTIEL D'UTILISATION DE LA CHALEUR ..... 106

5.1 INTRODUCTION ..... 106

5.2 TRAVAUX REALISES ..... 106

5.3 MODES D'EXPLOITATION DE LA CHALEUR GEOTHERMIQUE ..... 107

5.4 POSSIBILITES DE VALORISATION A NEUCHATEL - MONRUZ ..... 109

5.5 POSSIBILITES DE VALORISATION A ST-BLAISE - MARIN ..... 109

5.6 REMARQUES FINALES ET CONCLUSIONS ..... 111

6. PROJET D'UNE CAMPAGNE SISMIQUE ..... 113

6.1 PROFILS SISMIQUES SYNTHETIQUES PREVISIONNELS ..... 113

6.2 PLANIFICATION D'UNE CAMPAGNE D'ACQUISITION DE MESURES SISMIQUES ..... 114

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS ..... 118

7.1 COMPARAISON DES ZONES DE MONRUZ ET ST BLAISE ..... 118

7.2 SELECTION D'UN SITE DE FORAGE ..... 119

7.3 RECOMMANDATIONS ..... 119

7.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 121

## LISTE DES FIGURES

Figure III - 1. Carte tectonique de la zone d'étude avec localisation des modèles 3D et des coupes utilisées (modifiée d'après PGN, 2008). ....62
Figure III - 2. Extrait du Modèle 1 montrant la géométrie de l'aquifère du Dogger ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km). ....63
Figure III - 3. Extrait du Modèle 1 montrant la géométrie de la base des différentes formations géologiques ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km). ....64
Figure III - 4. Carte gravimétrique résiduelle de la région de Neuchâtel-St Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée est présentée dans le Chapitre II. Méthodologie (Chapitre II, Figure 19). ....65
Figure III - 5. Carte gravimétrique calculée à partir du modèle géologique (modèle 1, Figure 3) et des paramètres de densité présentés dans le Tableau 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir (Chapitre II, Figure 19). ....67
Figure III - 6. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure 5) par la carte gravimétrique résiduelle de la région de Neuchâtel-St Blaise (Figure 4). Voir texte pour détails. ....69
Figure III - 7. Carte gravimétrique résiduelle de la zone de Monruz pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils Monruz A-B et Monruz C-D. La ligne blanche discontinue est la trace de faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure 4). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....70
Figure III - 8. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone de Monruz avec la coupe géologique (Figure 7). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure 3). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en Vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure 11. a* : Front du chevauchement dans le Val-de-Ruz et l'anticlinal de Chaumont. ....71
Figure III - 9. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure 4).montrant les anomalies résiduelles de la zone de St-Blaise pour une densité de

référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils A-B et C-D. La ligne blanche discontinue est la trace de la faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....72

Figure III - 10. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone de St-Blaise (Figure 4) avec la coupe géologique. En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure 3). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en Vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure 11 a* : Front du chevauchement en le Val-de-Ruz et L'anticlinal de Chaumont. b* : Front du chevauchement à l'Est de la Faille de St-Blaise. .....73

Figure III - 11. Comparaison des formations prises en comptes dans les modèles généraux et de détail. .....75

Figure III - 12. Extrait du modèle Détail 1 montrant la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km). .....75

Figure III - 13. Localisation des modèles détaillés pour les zones de forage potentielles Neuchâtel et St Blaise. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....76

Figure III - 14. Extrait du modèle Détail 1 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone Neuchâtel. Localisation sur la Figure 13. .....77

Figure III - 15. Photos illustrant la déformation à proximité de la faille de Fontaine André (Photos : G. Mauri). .....78

Figure III - 16. Carte gravimétrique théorique calculée à partir du modèle géologique (Figure 3) de la zone de Monruz pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils A-B et C-D. La ligne blanche discontinue, dans le coin NE de la figure, est la trace de la faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. La ligne blanche au-dessus de Neuchâtel représente le prolongement supposé de la faille traversant la ville. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure 5). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....79

Figure III - 17. Carte du Misfit pour la zone de St-Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte extraite à partir de la carte Misift de la région (Figure 6). Voir texte pour détails.....80

Figure III - 18. Comparaison du profil gravimétrique le long de la ligne A-B sur la zone de Monruz avec la coupe géologique (Figure 7). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure 3). Une description du log géologique est présentée dans le log du modèle 1 (Figure 11). .....81

Figure III - 19. Extraits du modèle Détail 1 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone St Blaise. Localisation sur la Figure 13. .....82

Figure III - 20. Photos illustrant la déformation à proximité de la faille de St Blaise (Photos : G. Mauri).....83

Figure III - 21. Carte gravimétrique théorique calculée à partir du modèle géologique (Figure 3) de la zone de St-Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils A-B et C-D. La ligne blanche discontinue est la trace de la faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure 5).....84

Figure III - 22. Carte du Misfit pour la zone de St-Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte extraite à partir de la carte Misift de la région (Figure 6). Voir texte pour détails.....85

Figure III - 23. Comparaison du profil gravimétrique le long de la ligne A-B sur la zone de St-Blaise avec la coupe géologique (Figure 9). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure 3). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en Jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure 11. Les traits rouges sur la coupe géologique représentent les plans de faille des rétro-chevauchements secondaires. .....86

Figure III - 24. Carte de situation des trois profils de mesure de gaz de sols dans la région Neuchâtel – St-Blaise. En bleu, le profil 1 sur la faille de Fontaine-André, en rouge et orange, respectivement les profils 2 et 3 situés sur la faille de St-Blaise. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....87

Figure III - 25. Concentrations de gaz mesurées sur le profil 2 du Villaret projetées sur une ligne est-ouest et carte du profil. Les triangles rouges représentent la déviation des mesures d'He par rapport à l'air (5.24 ppm, indiquée par la ligne noire à la valeur 0.0). Les cercles verts et losanges bleus représentent respectivement la concentration d'oxygène et de $CO_2$ en % v/v. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....89

Figure III - 26. Concentrations de gaz mesurées sur le profil 3 de Maley projetées sur une ligne est-ouest et carte du profil. Les triangles rouges représentent la déviation des mesures d'He par rapport à l'air (5.24 ppm, indiquée par la ligne noire à la valeur 0.0). Les cercles verts et losanges bleus représentent respectivement la concentration d'oxygène et de $CO_2$ en % v/v. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....91

Figure III - 27. Agrandissement de la zone proche du point CN 613 m sur le profil 3 de Maley. Les trois graphiques représentent, respectivement de haut en bas, les mesures à travers le champ cultivé le 5 juillet 2012, les mesures dans le champ cultivé le 25 juillet 2012 et les mesures à l'extérieur du champ le 25 juillet 2012. Les triangles et les disques représentent les mesures d'hélium, avec la même symbologie que sur la carte. Les cercles et les losanges représentent les analyses d'$O_2$ et de $CO_2$, respectivement. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).....93

Figure III - 28. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de Neuchâtel Monruz. (b) Colonne synthétique de forage. (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation sur la Figure 13. .....96

Figure III - 29. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de St Blaise-Marin (b) Colonne synthétique de forage (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure 13.....97

Figure III - 30. Modèle 3D régional de Neuchâtel – St Blaise, vue du sud-ouest. Système de coordonnées CH1903. .....98

Figure III - 31. Température à la surface définie pour le modèle régional de Neuchâtel – St Blaise ....99

Figure III - 32. Flux thermique défini à la base du modèle régional de Neuchâtel – St Blaise à 3 km sous le niveau de la mer.....99

Figure III - 33. Résultats de la calibration du modèle régional de Neuchâtel – St Blaise (coordonnées 570'000/203'000) ..... 100
Figure III - 34. Vue en 3D de la température calculée dans le modèle régional de Neuchâtel – St Blaise. ..... 100
Figure III - 35. Température calculée au toit du Malm (modèle régional Neuchâtel – St Blaise)..... 101
Figure III - 36. Température calculée au toit du Dogger (modèle régional Neuchâtel – St Blaise) ..... 101
Figure III - 37. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle régional Neuchâtel – St Blaise)..... 102
Figure III - 38. Température calculée au toit du Dogger (modèle détaillé Neuchâtel-St Blaise)..... 104
Figure III - 39. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle détaillé Neuchâtel-St Blaise). 104
Figure III - 40. Localisation des profils sismiques synthétiques sur la région de Neuchâtel – St Blaise ..... 113
Figure III - 41. Coupes et profils sismiques synthétiques correspondants sur la région Neuchâtel – St. Blaise issus du modèle géologique « Détail 1 » avec interprétation des principaux plans de chevauchement (en rouge) et des zones de faille principales (en bleu). (a) coupe DD' ; (b) profil sismique synthétique DD', (c) coupe EE' ; (d) profil sismique synthétique EE' ; (e) coupe FF' ; (f) profil sismique synthétique FF'. Se référer à la Figure 40 pour leur localisation et orientation. ..... 114
Figure III - 42. Localisation des lignes sismiques suggérées pour la région de Neuchâtel et St-Blaise. Le trait plein représente la portion des lignes sur laquelle le signal sera optimal. Pour obtenir cette couverture maximale sur la zone d'intérêt, il est nécessaire d'étendre l'acquisition sur environ 1 km à chaque extrémité des lignes (traits discontinus). Au total : NE_01 = 11.3 km et NE_02 = 6 km. ..... 116
Figure III - 43. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de St Blaise-Marin (b) Colonne synthétique de forage (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure 13. ..... 120

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau III - 1. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région de Neuchâtel- St Blaise. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). *Mesurées dans le projet IGS-NE. # Valeurs de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. †Basées sur la littérature. ‡Utilisées dans le modèle normal permettant de reproduire au mieux les anomalies gravimétriques mesurées. ..... 66

Tableau III - 2. Données d'une sélection de forages profonds dans le canton de Neuchâtel pour la zone littorale (d'après données PDGN, 2010 et Archives CHYN) ..... 103

Tableau III - 3. Paramètres utilisées pour les modèles thermiques détaillés de la région Neuchâtel – St Blaise. ..... 103

Tableau III - 4. Bilan des températures estimées pour sites de la région Neuchâtel – St Blaise. ..... 105

Tableau III - 5. Détail des scénarios. ..... 108

Tableau III - 6. Scénarios retenus pour la zone Neuchâtel – Monruz avec intégration de la géothermie au réseau de distribution de la chaleur du Chauffage Urbain de la Maladière(CUM). ..... 109

Tableau III - 7. Scénarios retenus pour la réalisation d'une centrale géothermique de production de chaleur avec distribution haute température par un nouveau réseau de distribution de chaleur dans la zone de St-Blaise – Marin. ..... 110

Tableau III - 8. Scénarios retenus pour la réalisation d'une centrale géothermique avec réseau de distribution à basse enthalpie et pompes à chaleur décentralisées dans la zone de St-Blaise – Marin. ..... 110

Tableau III - 9. Enumération non exhaustive des principales étapes d'une campagne d'acquisition sismique 2D avec leurs prix approximatifs par unité, puis calculés pour la campagne d'acquisition proposée pour la région de Neuchâtel – St. Blaise. ..... 117

# Chapitre III. Résultats de la prospection géothermique de la région Neuchâtel – St Blaise

## 1. Introduction

La région de Neuchâtel – St Blaise se situe sur le premier pli anticlinal du Jura neuchâtelois, qui vient chevaucher le synclinal du Val de Ruz. Ce pli constitue le relief de la montagne de Chaumont au Nord de la ville Neuchâtel. Deux grands accidents tectoniques décrochants recoupent ce pli : la faille de Fontaine André et la faille de St-Blaise. La zone d'étude s'étend du littoral jusqu'au Val-de-Ruz afin de mieux prendre en compte la structure régionale. Les zones et sites de forage potentiels sont quant à eux situés dans la zone de Neuchâtel Monruz et St Blaise-Marin.

Différentes études ont été réalisées pour la région de Neuchâtel – St Blaise :

- Modélisation de la structure géologique en 3D,
- Cartographie gravimétrique pour quantifier la précision des modèles géologiques,
- Analyse des zones de fracturation par la géologie et la gravimétrie pour déterminer l'extension des failles,
- Analyse des zones de fracturation par les gaz des sols pour déterminer de possible connections avec le socle cristallin,
- Estimation du potentiel géothermique,
- Étude du potentiel d'utilisation de la chaleur,
- Projet de campagne sismique.

La synthèse de l'ensemble de ces études permet de proposer un projet de forage sur le site réunissant les conditions les plus favorables à une exploitation géothermique.

# 2. Modélisation géologique 3D de la région Neuchâtel-St Blaise

## 2.1 Introduction

Différents modèles géologiques 3D ont été réalisés avec le logiciel 3D GeoModeller (BRGM, Intrepid geophysics) (Figure III - 1):

- Un modèle général pour la zone littorale entre Neuchâtel et St Blaise (Modèle 1)
- Un modèle détaillé dans la zone littorale entre Neuchâtel et St Blaise (Détail 1)
- Deux modèles détaillés affinés autour des zones de forage potentiel à Neuchâtel et à St Blaise
- Deux logs de forage synthétiques pour les sites de Neuchâtel - Monruz et St Blaise-Marin

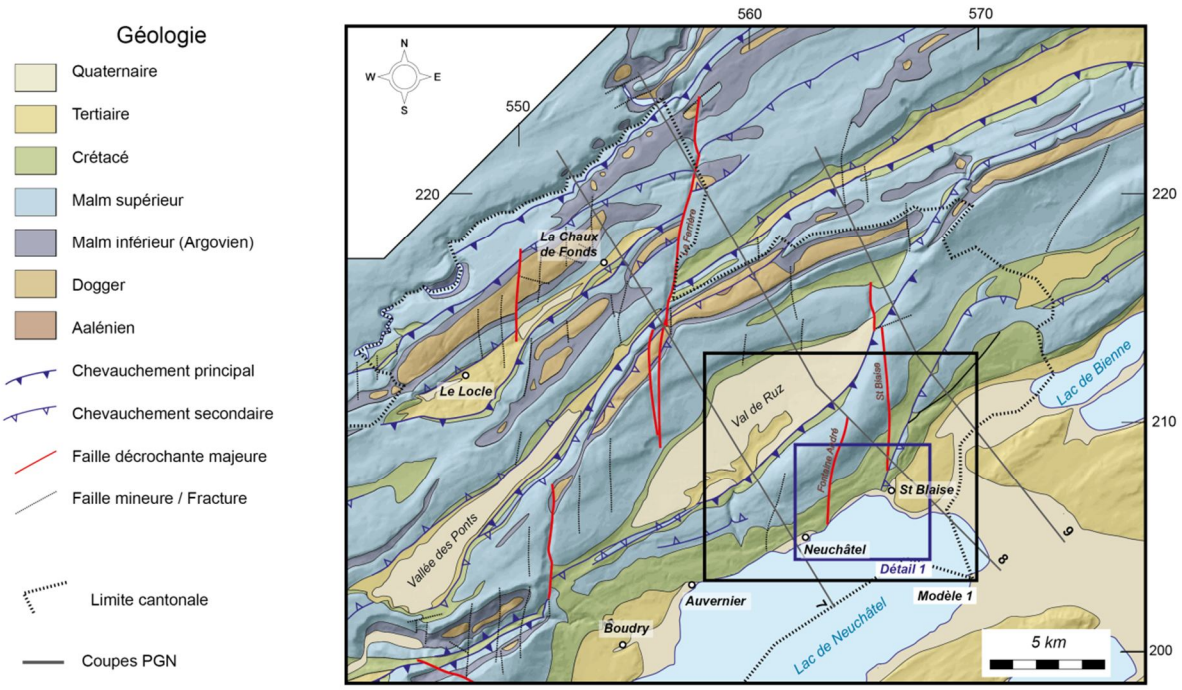



*Figure III - 1. Carte tectonique de la zone d'étude avec localisation des modèles 3D et des coupes utilisées (modifiée d'après PGN, 2008).*

## 2.2 Modèle général de la région de Neuchâtel - St Blaise

Le modèle 1 couvre une zone de 12x10 km qui s'étend du littoral jusqu'au Val-de-Ruz, et s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 3 km. Il a été réalisé à partir du modèle numérique de terrain à 25 m (MNT25) (MNT,25V-Swisstopo 2011) et des cartes géologiques au 1:25.000 de cette zone (Neuchâtel, Val-de-Ruz et Bieler See). La structure géologique en profondeur de cette zone a été modélisée à partir des coupes réalisées à l'échelle du canton dans le cadre de l'étude PGN en 2008 (coupes 7, 8 et 9 ; Figure III - 1) et les travaux de Sommaruga (1997). Une synthèse des études

structurales réalisées dans la zone couverte par le modèle a également été utilisée afin de compléter les données fournies par les cartes et les coupes (Schardt, 1900 ; Schaer, 1955 ; Kiraly, 1966). Des données complémentaires de terrain ont de plus été collectées autour des failles de Fontaine André et St Blaise et ont été intégrées au modèle. Le MNT à 1 m réalisé à partir des images LIDAR (Données du SITN) a également été utilisé pour contraindre la géométrie des failles décrochantes en surface. La résolution du modèle calculé est de 200 m horizontalement et de 50 m verticalement.

Les formations géologiques ont été regroupées en fonction de leurs caractéristiques hydrogéologiques afin d'obtenir la géométrie des trois aquifères potentiels pour une exploitation géothermique : le Malm, le Dogger et le Muschelkalk supérieur. L'ensemble des structures tectoniques a été intégré au modèle afin de mettre en évidence les zones de fracturation préférentielles favorables à une circulation de fluide. La Figure III - 2 montre un aperçu du modèle 1, avec la géométrie de l'aquifère du Dogger et ses relations géométriques avec les structures tectoniques. La Figure III - 3 montre la géométrie de l'ensemble des formations pour le Modèle 1.

Le Modèle 1 reproduit bien la géométrie du premier pli anticlinal du Jura. Il montre également bien que la zone de St Blaise correspond à une zone d'intersection de plusieurs chevauchements avec la faille décrochante de St Blaise (Figure III - 2). La précision de la géométrie du réseau de failles et ses relations avec les aquifères reste cependant faible, du fait de l'absence de données permettant de contraindre la structure en profondeur, notamment des données sismiques (cf. §6). L'interface socle-couverture n'a pas été modélisée en détail, et a été considérée comme une surface plane, également faute de données disponibles. Les surfaces calculées pour l'ensemble des formations géologiques (Figure III - 3) ont servi au calcul du modèle thermique (cf. §4)

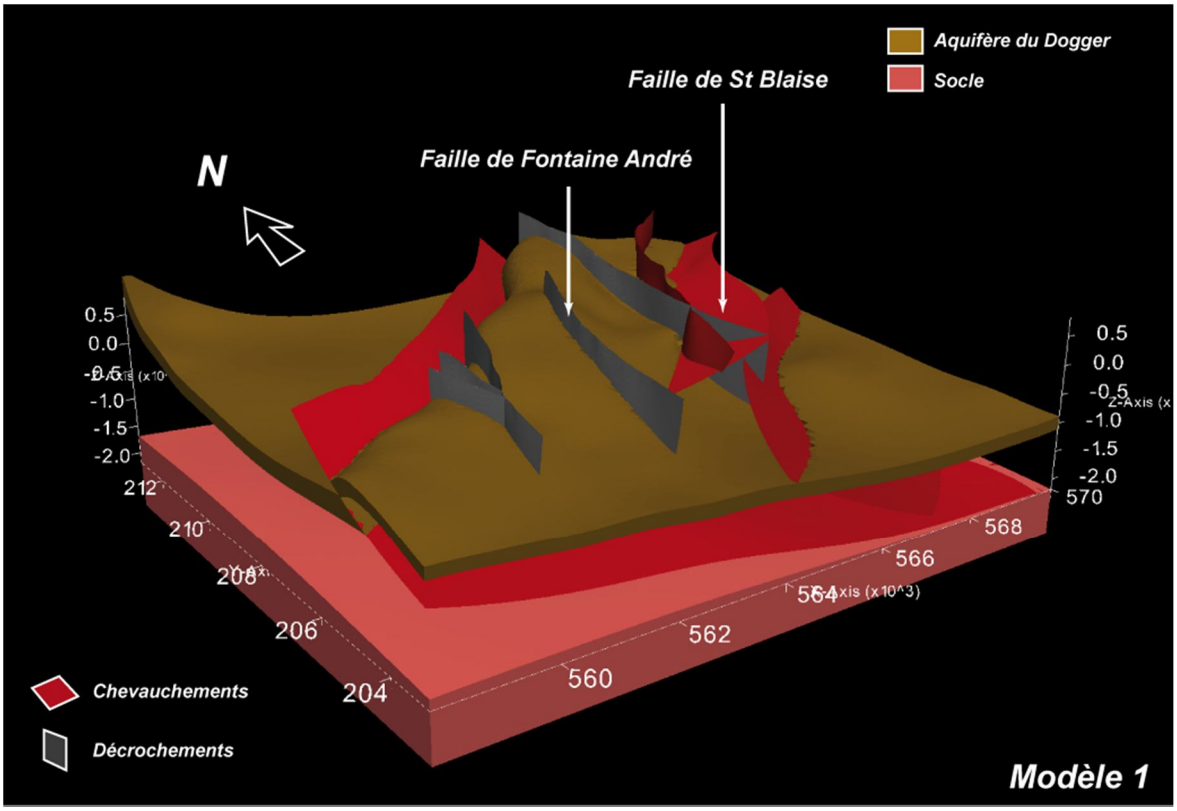



*Figure III - 2. Extrait du Modèle 1 montrant la géométrie de l'aquifère du Dogger ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km).*

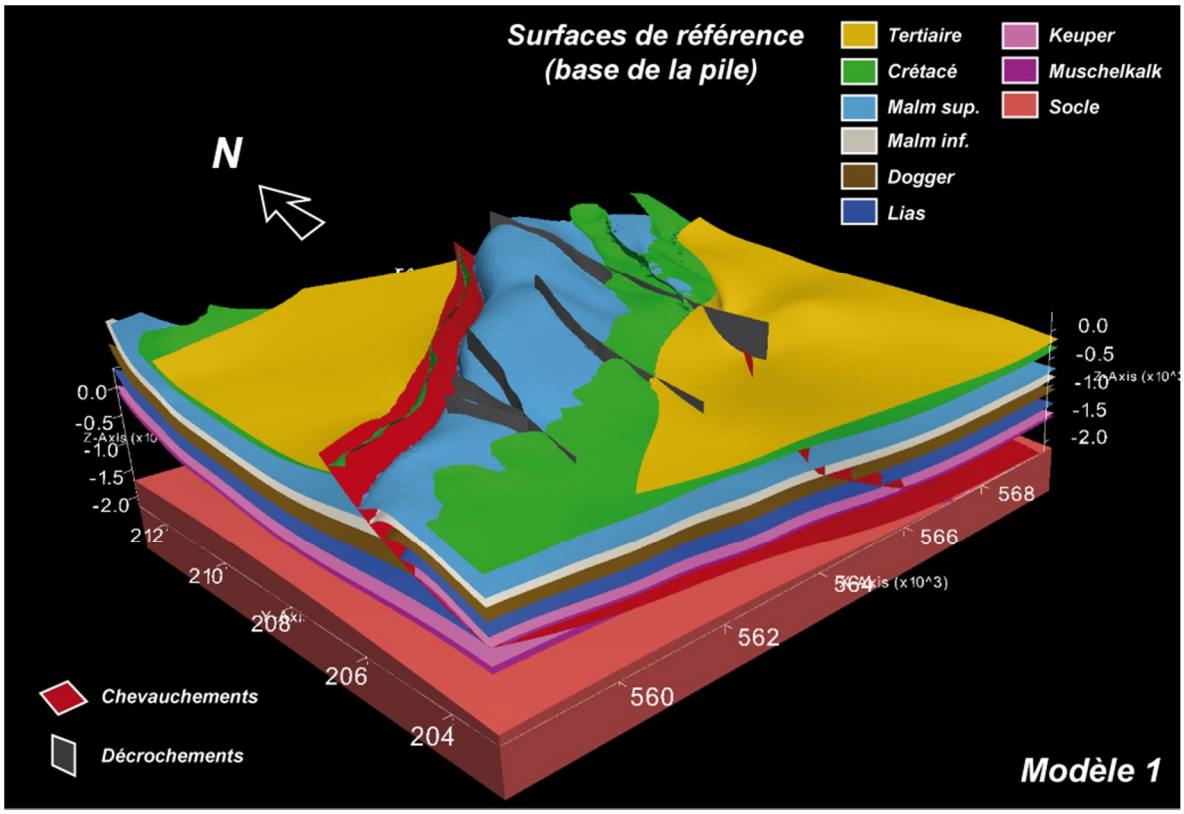



*Figure III - 3. Extrait du Modèle 1 montrant la géométrie de la base des différentes formations géologiques ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km).*

## 2.3 Validation du modèle géologique par la gravimétrie

Pour valider le modèle géologique de la région de Neuchâtel – St Blaise (Figure III - 3), une cartographie gravimétrique a été réalisée (cf. Chap. II) sur une surface de 10 km x 10 km (Figure III - 4). Une description complète de la cartographie gravimétrique réalisée dans le projet GeoNE, ainsi que une description des corrections et des incertitudes est décrite en Chapitre II. Les analyses et interprétations présentées ci-dessous sont toutes basées sur la carte d'anomalies gravimétriques résiduelles, telle que présentée dans le Chapitre II.

### 2.3.1 Anomalies gravimétriques résiduelles mesurées

Pour la région de Neuchâtel, les 100 km$^2$ couvert par la cartographie gravimétrique regroupe environ 1140 stations, qui permettent après correction et suppression de la tendance régionale (filtre à 35 km de longueur d'onde) de mettre en évidence l'existence de quatre types de sources géologiques pour les variations gravimétriques (Figure III - 4). Par ordre décroissant de l'effet gravimétrique de ces sources géologiques :

- De grandes et fortes diminutions gravimétriques (plurikilométriques et de plusieurs mGal d'amplitude) associées aux remplissages sédimentaires post- mésozoïques (Tableau III - 1), qui se localisent dans le Val-de-Ruz et sur la zone à l'est de la ville de Marin (Figure III - 4). Ces anomalies gravimétriques couvrent plusieurs kilomètres carrés, étendues sous forme de bassin et sont d'amplitude supérieure à 1 mGal.

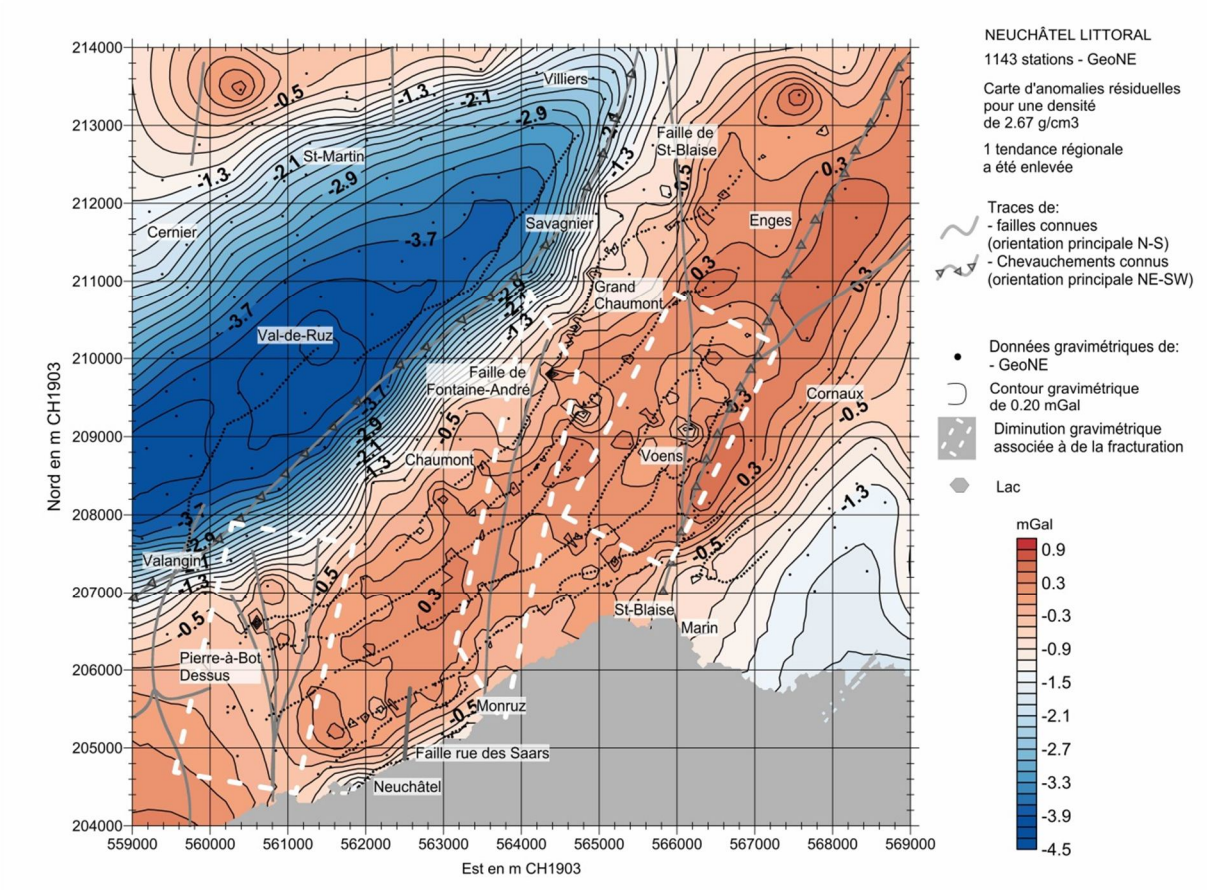



*Figure III - 4. Carte gravimétrique résiduelle de la région de Neuchâtel-St Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée est présentée dans le Chapitre II. Méthodologie (Chapitre II, Figure 19).*

- De brusques contrastes de gravimétrie dus à la présence de front de chevauchement. Le plus important étant le chevauchement de l'anticlinal de Chaumont, qui passe par les villages de Valangin et de Savagnier (Figure III - 4). Le second étant le petit chevauchement passant à l'est des villages de Voëns et Enges (Figure III - 4). Leurs anomalies gravimétriques associées sont longues de plusieurs kilomètres et sont restreintes à la bordure du front de leur chevauchement. En présence de forts contrastes de densité dus aux changements de lithologie de part et d'autre du front de chevauchement, comme pour le front de l'anticlinal de Chaumont avec le Val-de-Ruz, le contraste gravimétrique est de plusieurs mGal. À l'opposé, dans le cas du petit chevauchement passant à l'est des villages de Voëns et Enges, les lithologies de part est d'autre du front de chevauchement sont similaires ne créant qu'un léger contraste de gravimétrie allant de 0.2 à moins de 0.5 mGal.
- Des variations gravimétriques très locales (de taille kilométrique ou moins) et de faible amplitude (inférieure à 0.8 mGal), qui sont dues à la présence de failles. Ces failles ont toutes une composante principale décrochante, ce qui crée un décalage latéral lithologique plus ou moins important. De plus, elles peuvent être localement responsables d'un broyage plus ou moins important des formations. Cela crée localement des variations dans les contrastes de densité des roches autours des zones de failles, qui se traduisent par des petites variations gravimétriques. Dans la région de Neuchâtel – St Blaise, cela est particulièrement visible sur les failles de St-Blaise, de Pierre-à-Bot et de Fontaine-André (Figure III - 4). Marquée en ligne discontinue blanche, l'existence ou la prolongation d'autres failles peuvent être mises en évidence à partir de la cartographie gravimétrique.

- Des variations gravimétriques étendues sur plusieurs kilomètres plus ou moins continues et de très faible amplitude (inférieure à 0.3 mGal), qui sont dues à des variations latérales de lithologie et à des faibles variations de densité au sein d'une même lithologie (Figure III - 4).

### 2.3.2 Anomalies gravimétriques obtenues à partir du modèle géologique

Les couches sédimentaires du Mésozoïque (Figure III - 3, Tableau III - 1), qui forment les plissements et les chevauchements du Jura Neuchâtelois, sont faites d'alternance de formations rocheuses allant du calcaire massif aux marnes en passant par les formations marno-calcaires. Le bas de la pile géologique est quant à lui fait d'une couche de gypse. Par conséquent, comme indiqué dans le Tableau III - 1, les variations de densité entre les différentes formations rocheuses sont le plus souvent faibles. Cela se traduit par de faibles variations gravimétriques au sein des formations du Mésozoïque comme on le voit sur l'anticlinal de Chaumont (Figure III - 4). Ces faibles variations gravimétriques deviennent visibles sur l'ensemble de la région de Neuchâtel – St Blaise, lorsque les effets gravimétriques des sédiments post-mésozoïques sont soustraits (méthode du stripping) à la carte gravimétrique résiduelle (Cf. Figure II - 22 du Chapitre II). Cette méthode et ses résultats sont présentés dans le Chapitre II Méthodologie.

*Tableau III - 1. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région de Neuchâtel- St Blaise. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). *Mesurées dans le projet IGS-NE. # Valeurs de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. + Basées sur la littérature. ‡ Utilisées dans le modèle normal permettant de reproduire au mieux les anomalies gravimétriques mesurées.*

| **Formation géologique** | **Type de roche** | **Source d'information** | **Valeurs de densité ($g.cm^{-3}$)** | **Valeurs de densité utilisées dans le modèle ($g.cm^{-3}$) ‡** |
|---|---|---|---|---|
| Post-mésozoïque du Val-de-Ruz (Molasse d'eau douce inférieure, Moraine de fonds, Autres dépôts tertiaires) | Marnes bigarrées et grès - gravier-marnes | Observation géologique | 2.1 - 2.6+ | 2.35 |
| Post-mésozoïque du littoral (Molasse d'eau douce inférieure, Moraine de fonds, Autres dépôts tertiaire) | Marnes bigarrées et grès - gravier-marnes | Observation géologique | 2.60# - 2.89# | 2.55 |
| Crétacé (Albien- Berriasien - Valanginien- Hauterivien) | Calcaire | Observation géologique | 2.64* - 2.69* | 2.58 - 2.64 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Malm supérieur (Portlandien-Kimméridgien) | Calcaire micritique et Marne (minoritaire) | Observation géologique | 2.65* - 2.71* | 2.60 |
| Malm-Argovien | Marne - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.57# | 2.65 |
| Dogger (Callovien- Bathonien-Bajocien) | Calcaire spathique – Marne- Calcaire oolithique - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.61* - 2.67* | 2.66 |
| Aalenien-Lias | Marne | Hypothèse | 2.12# - 2.60# | 2.67 |
| Keuper | Marne | Hypothèse | 2.10# - 2.73# | 2.65 |
| Muschelkalk supérieur | Calcaire | Hypothèse | 2.53# - 2.83# | 2.67 |
| Muschelkalk-Trias inférieur | Gypse | Hypothèse | 2.13# - 2.83# | 2.60 |
| Socle cristallin | Granite | Hypothèse | 2.60# - 2.83# | 2.69 - 2.76 |

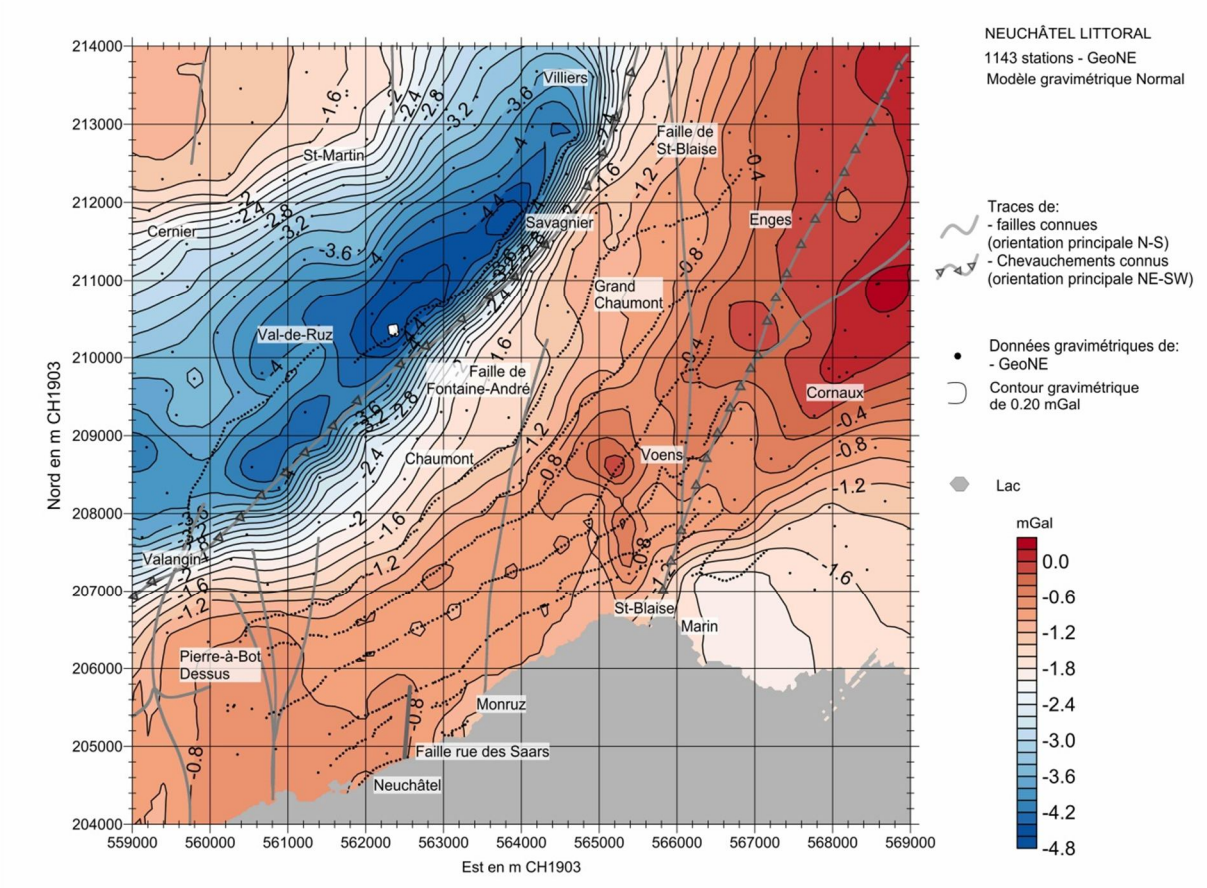



*Figure III - 5. Carte gravimétrique calculée à partir du modèle géologique (modèle 1,Figure III - 3) et des paramètres de densité présentés dans le Tableau III - 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir (Chapitre II, Figure II - 19).*

Pour pouvoir valider le modèle géologique 3D (Figure III - 3) à partir des anomalies gravimétriques résiduelles (Figure III - 4), il est nécessaire de calculer la réponse gravimétrique du modèle géologique 3D. Pour ce faire, plusieurs modélisations normales (Forward modelling) ont été réalisées en faisant varier les valeurs de densité des différentes formations géologiques (Tableau III - 1). Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le Chapitre Méthodologie II de ce rapport.

La réponse gravimétrique du modèle géologique 3D reproduisant aux mieux les variations gravimétriques mesurées est présentée en Figure III - 5 et les densités attribuées à chaque formation géologique sont présentées dans le Tableau III - 1.

## 2.3.3 Validation et limites de la modélisation géologique 3D

### AU NIVEAU SPATIAL

D'un point de vue spatial (pour une surface de 10 km x 10 km), la réponse gravimétrique calculée reproduit bien les grandes structures géologiques avec les bassins sédimentaires post-mésozoïques se trouvant dans le Val-de-Ruz et à l'est du village de Marin (Figure III - 5). De même, la réponse gravimétrique calculée est capable de bien reproduire les effets gravimétriques des structures de chevauchement et d'anticlinal, tel que celle de Chaumont et le chevauchement se trouvant à l'est des villages de Voëns et d'Enges (Figure III - 5).

D'un point de vue quantitatif, la dynamique des variations gravimétriques calculées est très similaire à celle de la carte des anomalies résiduelles mesurées avec une dynamique gravimétrique d'environ 5 mGal (Figure III - 4 et Figure III - 5). La carte de Misfit (carte montrant l'inadéquation des résultats) obtenu en soustrayant la carte gravimétrique calculée avec la carte gravimétrique résiduelle mesurée confirme la bonne correspondance du modèle (Figure III - 6). L'analyse du Misfit met en évidence que le model gravimétrique normal sous-estime un peu les valeurs gravimétriques sur la colline de Chaumont dans les zones non fracturées (Misfit de -0.8 à -1.4 mGal, Figure III - 6). Cela est dû au fait que le modèle normale ne peut pas tenir en compte les variations latéral de densité au sein de formations géologiques. Cela renforce le fait que les diminutions gravimétriques mesurées (Figure III - 4) le long des failles sont dû à une plus grande fracturation des roches.

De plus, les valeurs de densité des formations géologiques utilisées (Tableau III - 1) dans le modèle sont assez similaires aux valeurs de densité de ces types de roches trouvées dans la littérature, ainsi que celles mesurées (Projet IGS-NE). Il est à noter que les valeurs de densité mesurées (Projet IGS-NE) ont été faites sur des échantillons de roche non fracturée et non karstifiée, qui ont été prélevés dans la région de Neuchâtel et dans la région de la Chaux-de-Fonds – Le Locle. Par conséquent ces valeurs de densité mesurée sont considérées comme des valeurs maximales. Les données de la littérature proviennent essentiellement de logs de forage, qui ont été exécutés dans le Jura, ainsi que sur le plateau molassique. Pour chaque formation géologique, il peut exister de grandes variations de profondeur entre le contexte géologique du plateau molassique et celui du Jura dans le canton de Neuchâtel. De ce fait, les données de la littérature provenant des logs de forage ne peuvent être considérées que comme une information générale.

L'anticlinal de Chaumont, formant un relief topographique est connu pour être karstifié, toutefois, les structures karstifées sont généralement estimés dans la région de Neuchâtel à environ 2% du volume total de roche. Cette estimation du taux de karstification ne tient pas en considération les quelques gouffres ou cavernes qui existent dans le canton de Neuchâtel. À ce stade, cette étude ne peut pas mettre en évidence l'existence de gouffres ou cavernes, qui pourraient éventuellement être localisés dans l'anticlinal de Chaumont.

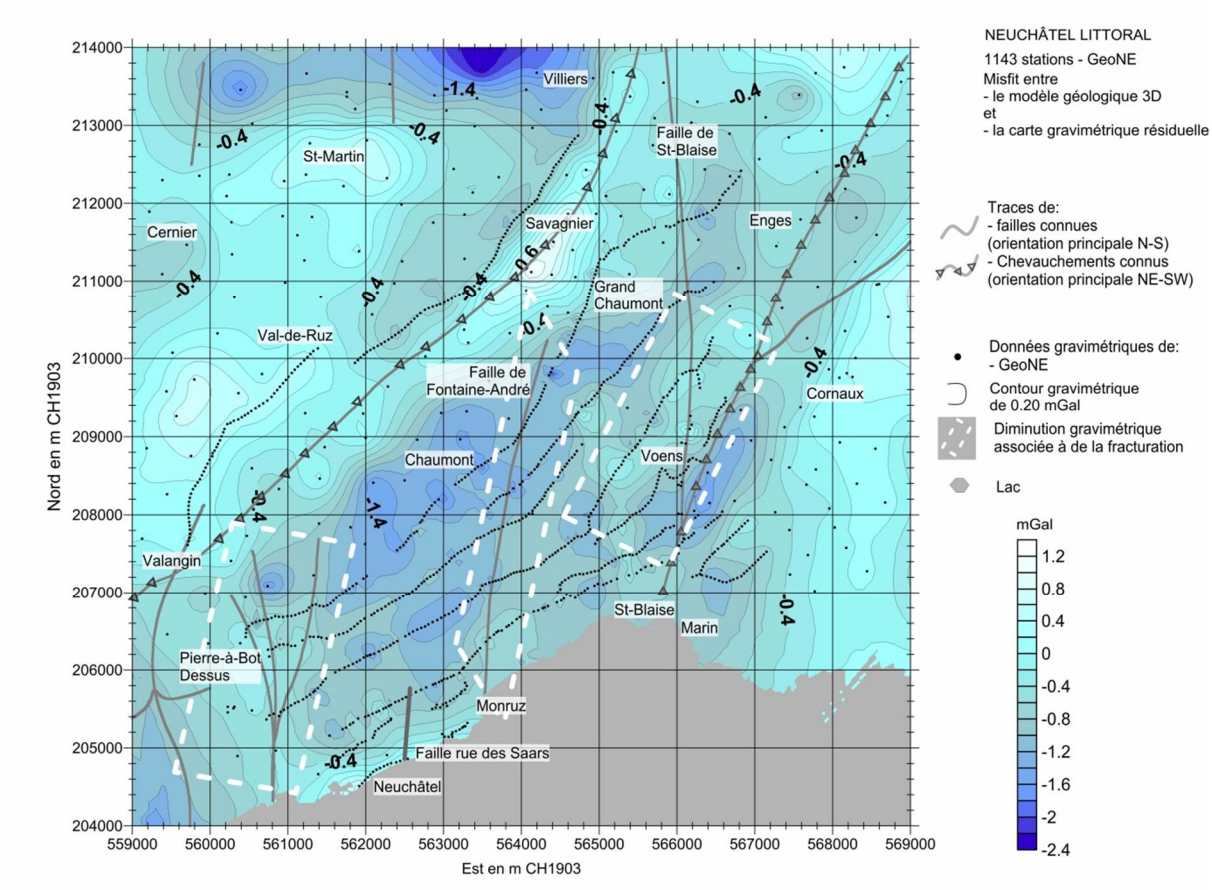



*Figure III - 6. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure III - 5) par la carte gravimétrique résiduelle de la région de Neuchâtel-St Blaise (Figure III - 4). Voir texte pour détails.*

Au niveau local, des différences gravimétriques importantes (supérieure à 1 mGal) apparaissent par endroit entre le modèle et la carte résiduelle, notamment dans la région de Savagnier, de Villiers et de St Martin (Figure III - 6). Ces différences sont vraisemblablement dues très localement au fait que le modèle géologique ne reproduit pas suffisamment bien la réalité géologique. Toutefois, ces différences sont très limitées spatialement et ne remettent pas en cause le modèle géologique dans son ensemble.

Pour pouvoir quantifier plus précisément la qualité du modèle géologique à reproduire les structures gravimétriques mesurées, plusieurs profils 2D ont été extraits de la carte gravimétrique résiduelle (Figure III - 4), de la carte gravimétrique calculée (Figure III - 5), ainsi que de leur différence (Figure III - 6).

## DANS LA ZONE DE MONRUZ

Situé dans la zone de Monruz (Figure III - 7), le premier profil (Monruz C-D, Figure III - 8) est perpendiculaire à l'anticlinal de Chaumont, ainsi que au front de chevauchement de Chaumont et recoupe la faille de Fontaine-André.

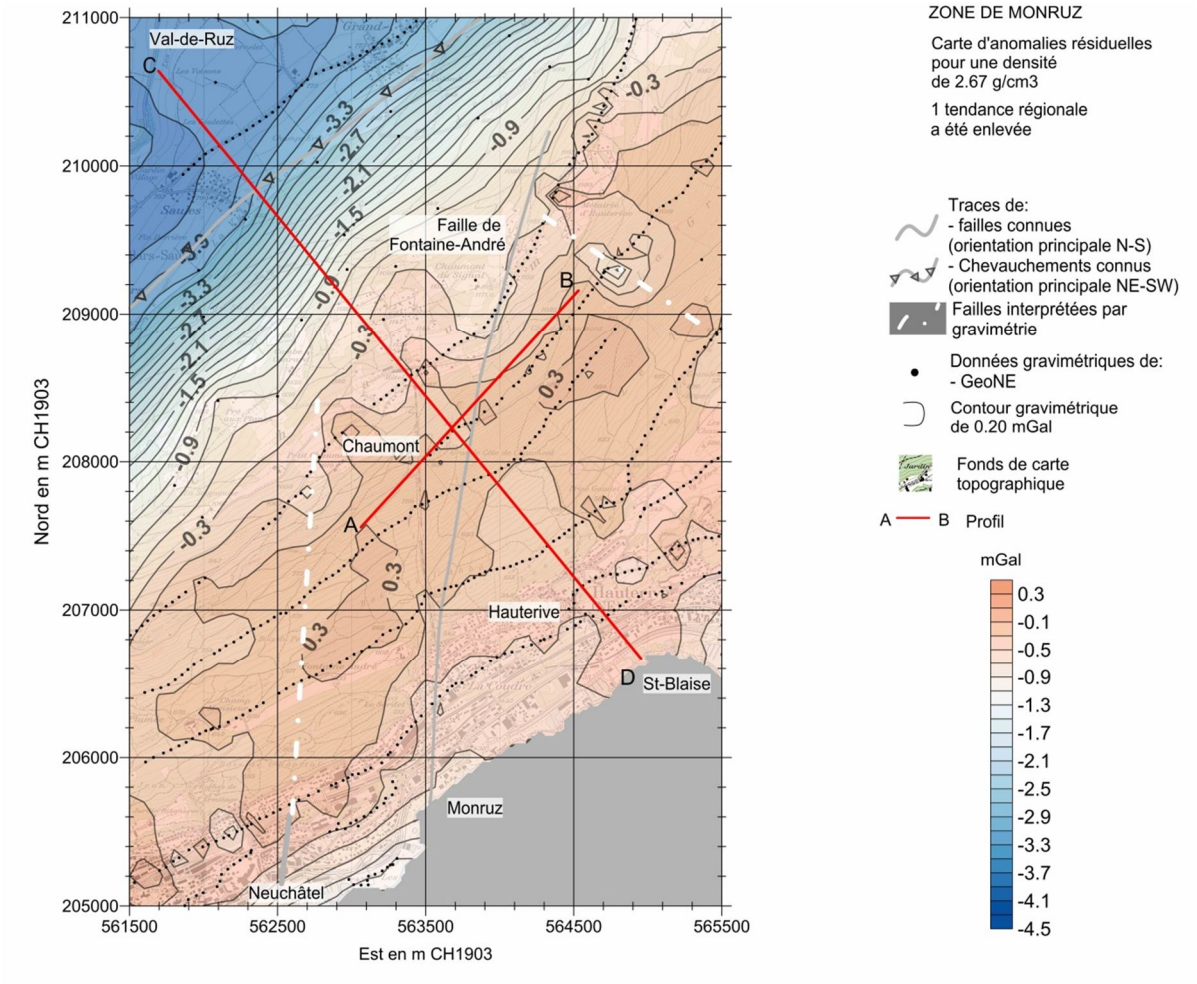



*Figure III - 7. Carte gravimétrique résiduelle de la zone de Monruz pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils Monruz A-B et Monruz C-D. La ligne blanche discontinue est la trace de faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure III - 4). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

La comparaison entre les valeurs gravimétriques résiduelles et celle du modèle sont très similaire en termes de taille et d'amplitude (Figure III - 8). Le front de chevauchement (zone grise appelée a*, Figure III - 8) est très nettement visible sur les deux courbes gravimétriques, ainsi que l'augmentation gravimétrique liée à l'anticlinal de Chaumont.

Au niveau local, il existe des différences. La plus importante est celle de la pente marquant le front de chevauchement. Cela est vraisemblablement due à l'inclinaison des formations géologique à l'extrémité du front de chevauchement, qui n'est pas exactement la même sur le modèle géologique que celle des formations géologiques dans la réalité.

Sur l'anticlinal de Chaumont, les petites variations gravimétriques (inférieure à 0.5 mGal) et de faible longueur (<500m) sont vraisemblablement dues à des petites variations géologiques locales (de quelques centaines de mètres de long), qui ne sont pas prises en compte dans le modèle, telles que des variations locales des épaisseurs lithologiques, des variations latérales de faciès lithologiques, ou encore de la fracturation associée à des failles.

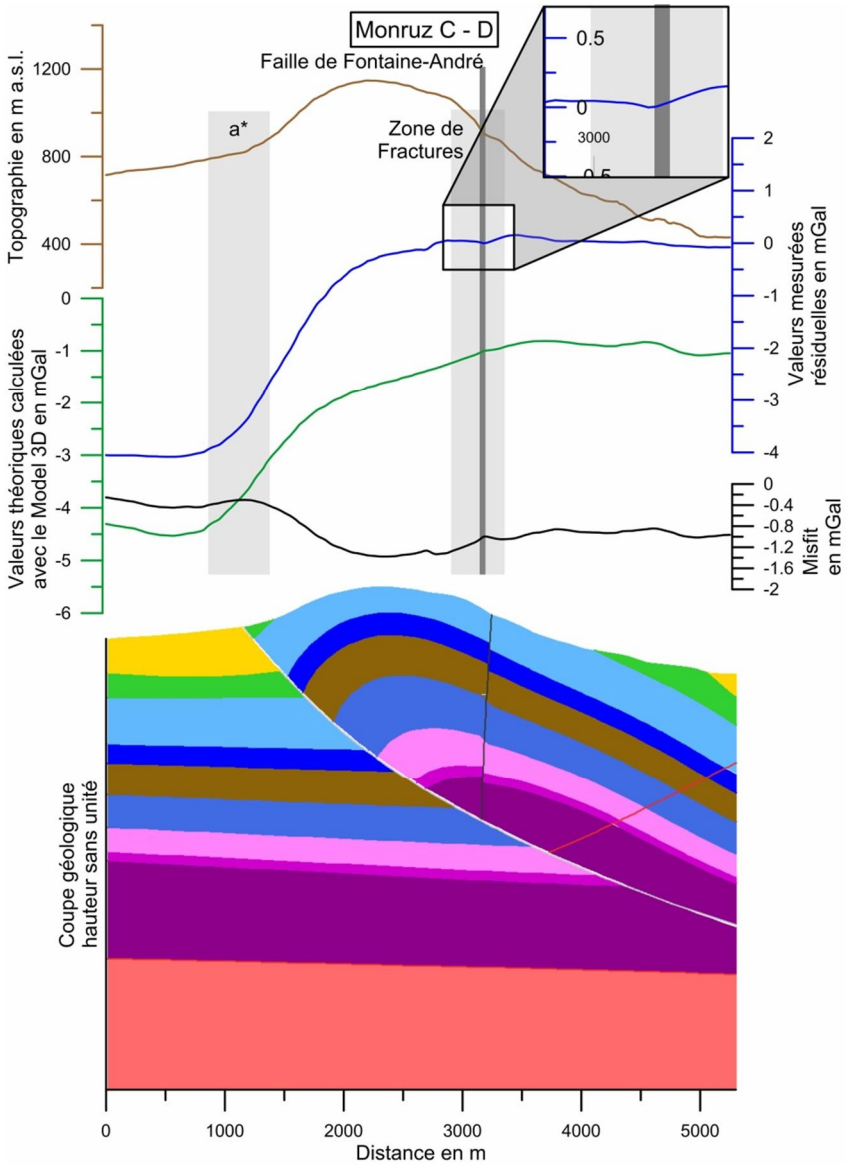



*Figure III - 8. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone de Monruz avec la coupe géologique (Figure III - 7). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure III - 3). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en Vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure III - 11. a* : Front du chevauchement dans le Val-de-Ruz et l'anticlinal de Chaumont.*

L'emplacement de la faille de Fontaine-André, indiqué par la fine bande noire (Figure III - 8), correspond à une diminution gravimétrique locale. Basé sur la longueur d'onde de cette anomalie gravimétrique, il est possible d'estimer approximativement la largeur de la zone de fracturation associée à cette faille. Cette diminution gravimétrique associée à la faille n'est pas reproduite par le modèle gravimétrique calculé, puisqu'au sein d'une même formation géologique, le modèle considère une valeur de densité homogène. Cela renforce le fait que cette anomalie gravimétrique mesurée au niveau de la faille de Fontaine-André est bien due à la faille.

Situé dans la zone de St-Blaise (Figure III - 9), le premier profil (St-Blaise C-D, Figure III - 10) est perpendiculaire à l'anticlinal de Chaumont, ainsi qu'au front de chevauchement de Chaumont, à celui du petit chevauchement à l'est de Voëns et recoupe la faille de St-Blaise.

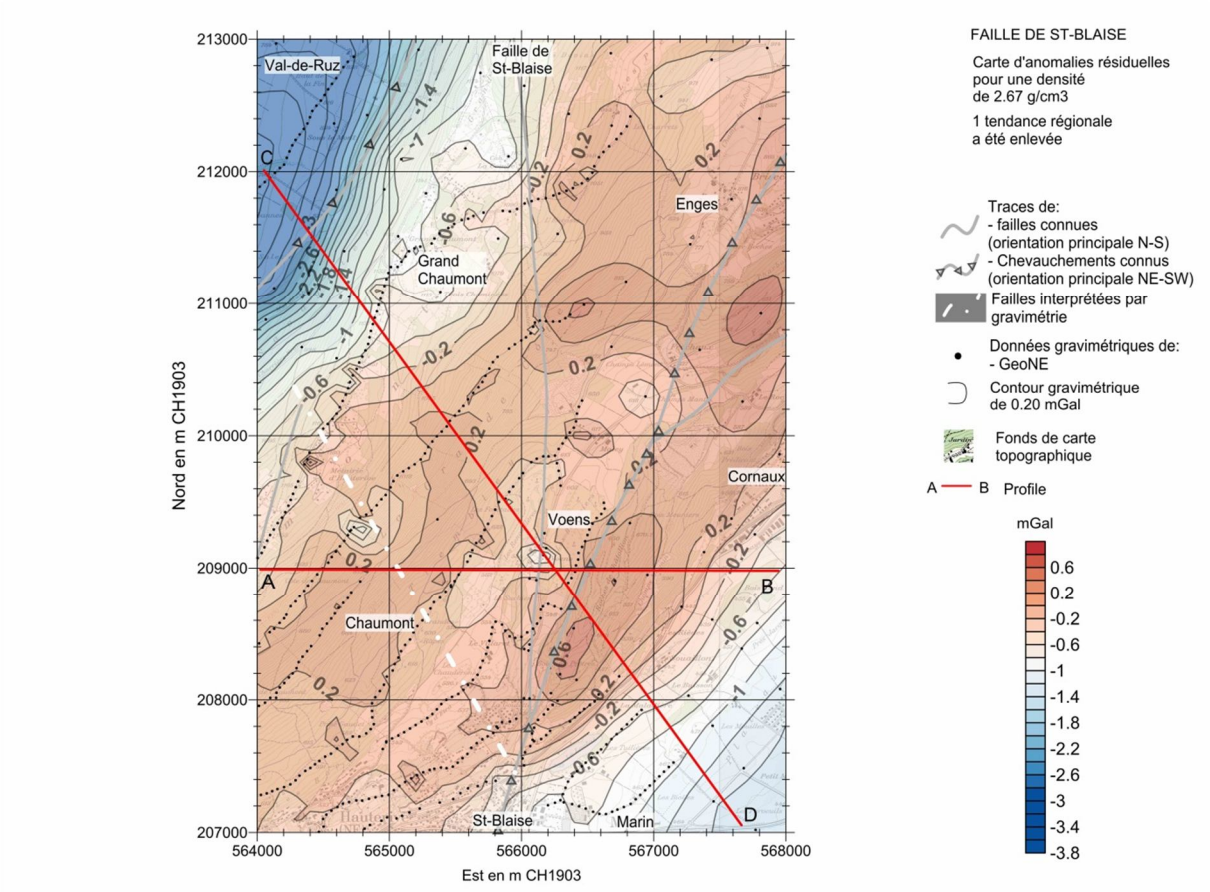



*Figure III - 9. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure III - 4).montrant les anomalies résiduelles de la zone de St-Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils A-B et C-D. La ligne blanche discontinue est la trace de la faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

La tendance générale du modèle est très similaire à celle de la carte résiduelle mesurée (Figure III - 10). Le front de chevauchement (zone grise appelée a*, Figure III - 8) est très nettement marquée sur les deux courbes gravimétriques. L'amplitude de l'anomalie gravimétrique modélisée qui est associée à l'anticlinal de Chaumont est plus importante (de près de 40%, courbes vertes, Figure III - 10) que celle de la carte résiduelle (courbe bleue). Cette différence est due au fait que les valeurs de densité utilisées pour les dépôts post-mésozoïques dans le Val-de-Ruz sont vraisemblablement plus basses que ce qu'elles devraient être. Une autre raison est aussi une différence dans l'angle de la géométrie des formations géologiques formant l'anticlinal de Chaumont. Cette géométrie est probablement plus prononcée dans le modèle géologique, que ce qu'elle est réellement dans la réalité.

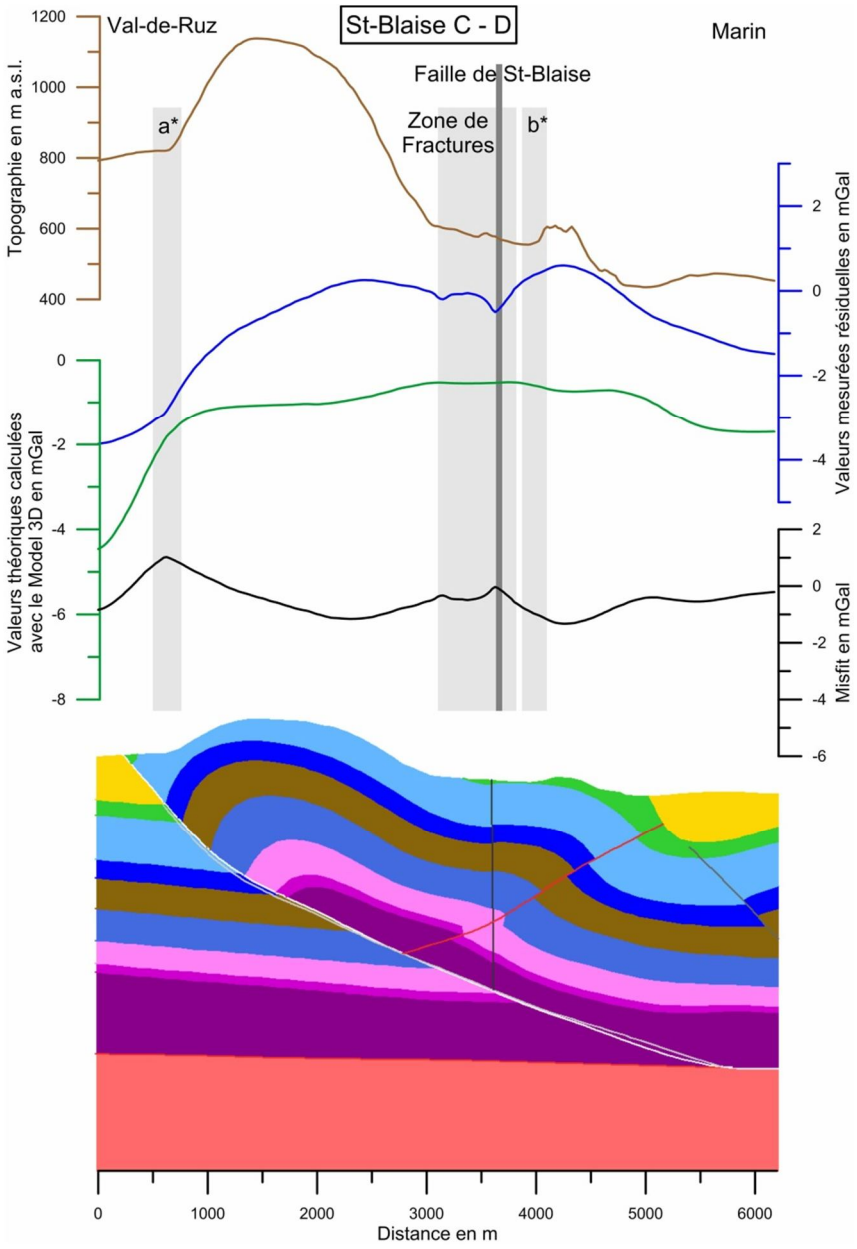



*Figure III - 10. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone de St-Blaise (Figure III - 4) avec la coupe géologique. En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure III - 3). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en Vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure III - 11. a*: Front du chevauchement en le Val-de-Ruz et L'anticlinal de Chaumont. b*: Front du chevauchement à l'Est de la Faille de St-Blaise.*

Le deuxième chevauchement, à l'est de Voëns (Figure III - 9), est d'amplitude et de longueur similaire sur la réponse gravimétrique du modèle (Figure III - 10) à l'anomalie mesurée. Du coté de Marin, la différence d'amplitude de l'anomalie gravimétrique est due à une densité trop faible des sédiments post-mésozoïques du modèle, par rapport à ce qu'elle devrait être.

Sur l'anticlinal de Chaumont, les petites variations gravimétriques (inférieure à 1 mGal) et de longueur kilométrique (<2 km) sont vraisemblablement dues à des petites variations géologiques locales (de quelques centaines de mètres de long), qui ne sont pas prises en compte dans le modèle, tel que des variations locales des épaisseurs lithologiques, des variations latérales de faciès lithologiques, ou encore à de la fracturation associé à des failles. L'emplacement de la faille de St-Blaise (fine bande noire, Figure III - 10) est associée à une diminution gravimétrique locale. Basé sur la longueur d'onde de cette anomalie gravimétrique il est possible d'estimer approximativement la largeur de la zone de fracturation associée à cette faille (bande grise appelée zone de fracture, Figure III - 10). Le modèle géologique considère une valeur de densité homogène au sein d'une même formation géologique, ce qui ne permet pas de reproduire l'effet de la faille. Cela est renforcé par le fait que ces variations gravimétriques mesurées, ne correspondent pas à des contrastes lithologiques latéraux importants dans la zone autour de la faille.

Pour la zone de St-Blaise, la structure globale des fronts de chevauchement et de celle de l'anticlinal du modèle géologique sont assez proches de la réalité pour permettre de reproduire suffisamment bien les signatures gravimétriques de ces structures géologiques (a* et b*, Figure III - 10).

Finalement, basé sur la comparaison de la réponse gravimétrique du modèle géologique avec la carte gravimétrique résiduelle, il apparait que la réponse gravimétrique reproduit bien les structures principales. Les différences, qui sont locales, correspondent principalement à de légères différences dans la géométrie des couches au niveau du front de chevauchement de Chaumont, ainsi qu'à l'existence de failles qui affectent localement la densité des roches.

Dans son ensemble le modèle géologique 3D (Figure III - 3) reproduit bien la structure stratigraphique, ainsi que les structures tectoniques (chevauchement, anticlinal) de la région de Neuchâtel – St Blaise.

## 2.4 Modèle détaillé de la région de Neuchâtel-St Blaise

Le modèle Détail 1 couvre une zone de 6 x 5 km dans la zone littorale entre Neuchâtel et St Blaise (Figure III - 1) de la surface jusqu'à une profondeur de 2.5 km. Il a été réalisé à partir du modèle numérique de terrain à 25 m (MNT25) et des cartes géologiques au 1:25'000 de cette zone (Neuchâtel, Val-de-Ruz et Bieler See). La stratigraphie a été prise en compte avec plus de détails par rapport au modèle 1 (Figure III - 11), ainsi que les accidents tectoniques secondaires dans la région de St-Blaise. Des données complémentaires ont été ajoutées à celles déjà utilisées pour le Modèle 1 : des pendages issus du travail de diplôme de V. Risse dans la zone de l'anticlinal de Chaumont, et de Kiraly (1966) dans la zone de St Blaise. Ces données ont permis d'affiner la structure géologique de cette zone. De plus le modèle a été calculé avec une résolution de 100 m horizontalement et 50 m verticalement, supérieure à celle du Modèle 1. La Figure III - 12 montre un aperçu du modèle Détail 1, avec la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk et leurs relations géométriques avec les structures tectoniques.

La géométrie des aquifères potentiels est ici définie avec plus de précision, grâce aux données de pendages supplémentaires et à l'augmentation du nombre de formations géologiques incluses dans le modèle. La zone de St-Blaise montre des conditions géologiques plus favorables avec une plus grande profondeur des aquifères du Dogger et du Muschelkalk, qui sont recoupés par le système de failles de St-Blaise (Figure III - 12). La faille de Fontaine André recoupe également l'ensemble des aquifères, cependant les données de surface ne permettent pas de révéler un réseau de failles associé en profondeur (Figure III - 12).

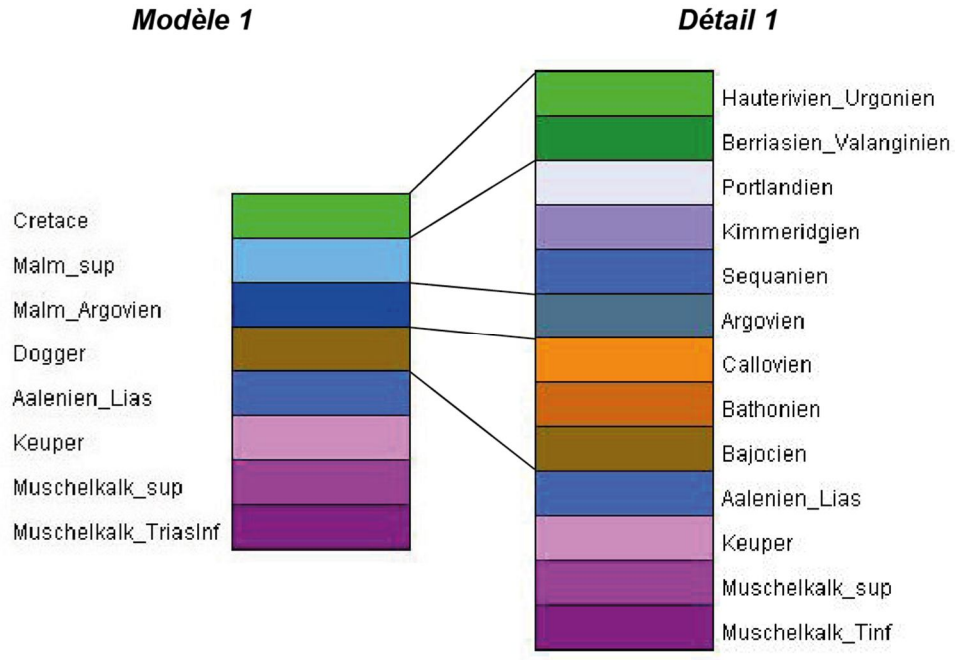



*Figure III - 11. Comparaison des formations prises en comptes dans les modèles généraux et de détail.*

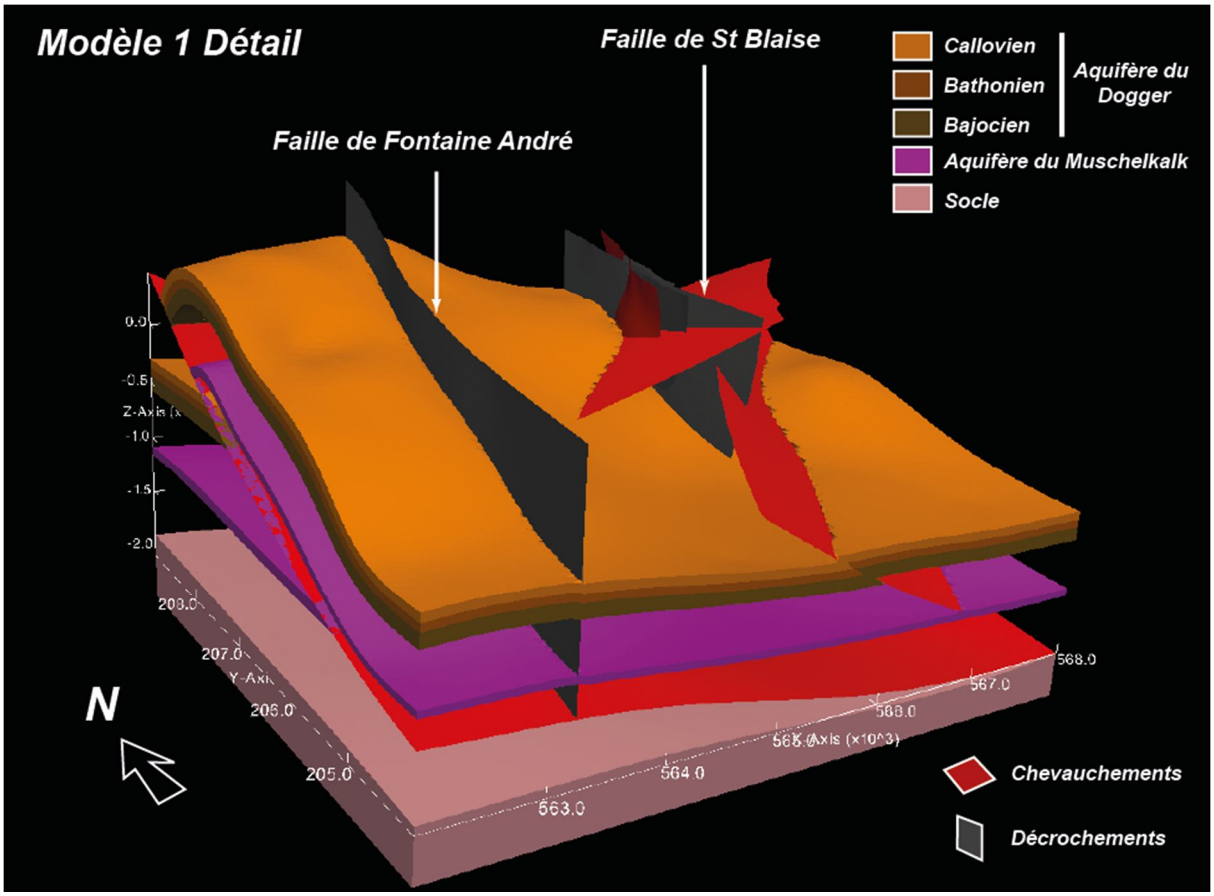



*Figure III - 12. Extrait du modèle Détail 1 montrant la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km).*

# 3. Modélisation des zones de forage potentielles et analyse des zones de fracturation

## 3.1 Modélisation dans les zones de forage potentielles

Un calcul plus fin, avec une résolution de 50 m horizontalement et verticalement, a également été effectué à l'intérieur du modèle Détail 1, autour des zones de forage potentielles sélectionnées dans le rapport PDGN à Neuchâtel et à St-Blaise. Ces modèles de 3 x 3 km, présentés sur la Figure III - 13, permettent de visualiser la géométrie des trois aquifères potentiels pour une exploitation géothermique dans ces zones. Des logs synthétiques ont également été réalisés sur des zones de 1 x 1 km (Figure III - 13) pour les sites de forage potentiels du rapport PDGN et des sites pris en compte dans l'étude du potentiel d'utilisation de la chaleur (cf. §5).

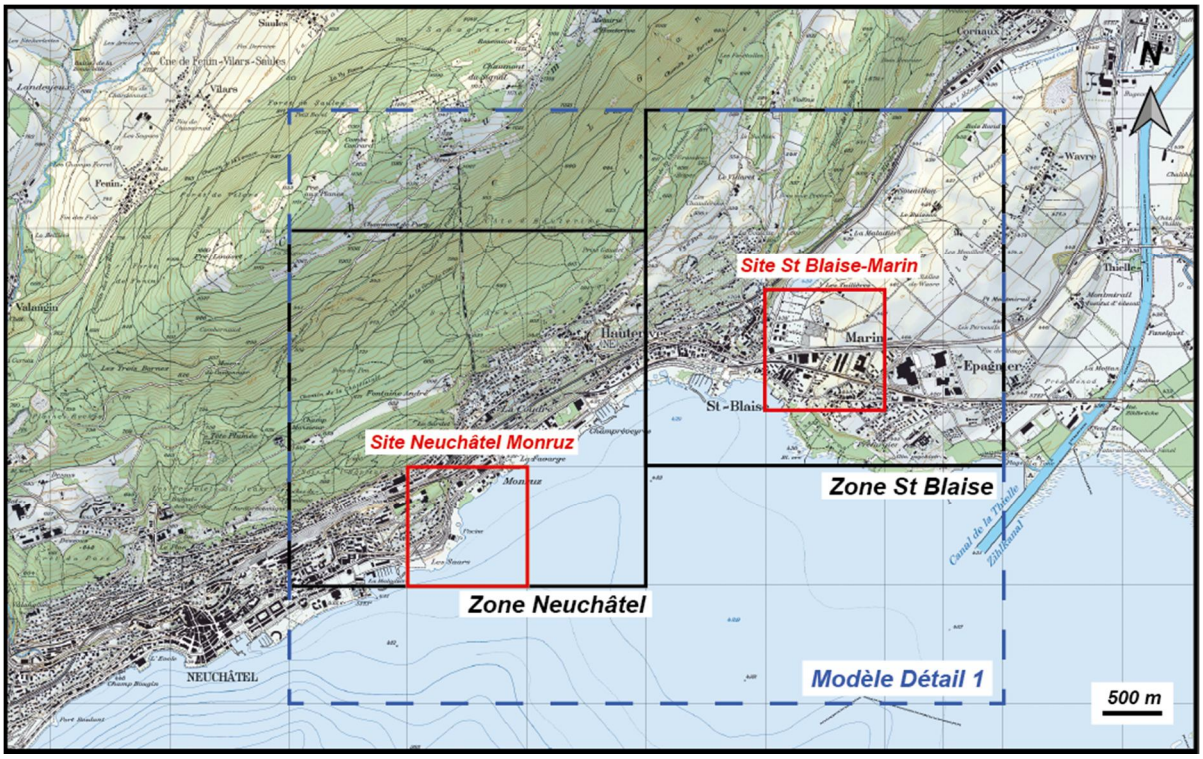



*Figure III - 13. Localisation des modèles détaillés pour les zones de forage potentielles Neuchâtel et St Blaise. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 3.2 Modèle pour la zone Neuchâtel

### 3.2.1 Modèle géologique 3D

Le modèle raffiné pour la zone de Neuchâtel a été centré autour de la faille décrochante de Fontaine André (Figure III - 14). Ce décrochement montre en effet un rejet horizontal de plusieurs centaines de mètres, et marque donc une zone plus fracturée. Au vu de son rejet, la faille semble affecter l'ensemble de la couverture sédimentaire jusqu'au plan de chevauchement inférieur. Elle affecterait donc les trois aquifères potentiels (Figure III - 14).

L'étude de terrain menée autour de la faille de Fontaine André montre que les calcaires du Malm sont caractérisés par une fracturation importante à proximité du plan de faille (Figure III - 15). La largeur de la zone de faille a été estimée à plusieurs mètres en surface, mais difficilement définissable du fait de la couverture végétale importante. Il est donc vraisemblable d'imaginer que les aquifères du Dogger et du Muschelkalk sont également plus fracturés en profondeur à proximité de cet accident.

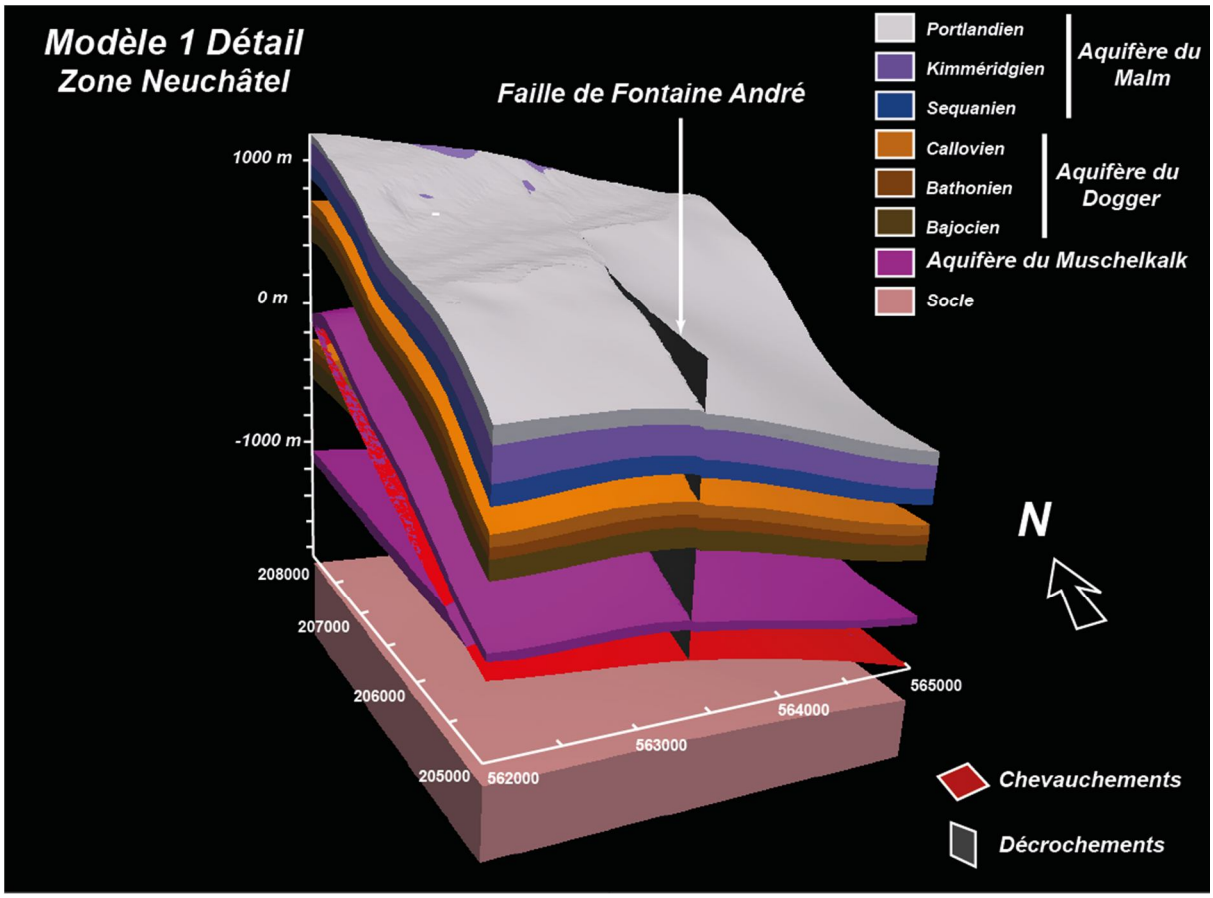



*Figure III - 14. Extrait du modèle Détail 1 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone Neuchâtel. Localisation sur la Figure III - 13.*

## 3.2.2 Effet gravimétrique des failles pour la zone Neuchâtel

Dans la région de Neuchâtel, la principale faille est celle de Fontaine-André (Figure III - 15), qui traverse Neuchâtel au niveau du Nid-du-Cro. Basé sur les études géologiques antérieures (Kiraly, 1966 ; Kiraly & Meia, 1967 ; Schaer, 1955 ; Schardt, 1900; Suter, 1920; Suter & Lüthi, 1969), les failles recoupant l'anticlinal de Chaumont sont contemporaines à la mise en place du chevauchement de Chaumont et leur mouvement décrochant a accommodé localement la déformation et la rotation du l'axe de l'anticlinal de Chaumont.

Comme présenté précédemment (Figure III - 7), des coupes gravimétriques ont été réalisées à travers la faille de Fontaine-André. Ces coupes regroupent les variations gravimétriques mesurées (à partir de la carte résiduelle,Figure III - 8), les valeurs modélisées (Figure III - 16), le Misfit (Figure III - 17), ainsi que la topographie obtenue à partir du MNT 25 m de la Suisse (MNT,25V-Swisstopo 2011).

La coupe Monruz A-B recoupe l'anticlinal de Chaumont dans sa longueur (Figure III - 18), tandis que la coupe Monruz C-D traverse l'anticlinal de Chaumont perpendiculairement à son axe (Figure III - 8). Ces deux coupes passent à travers la faille de Fontaine-André dans deux directions différentes.

*Figure III - 15. Photos illustrant la déformation à proximité de la faille de Fontaine André (Photos : G. Mauri).*

L'effet gravimétrique de la faille de Fontaine-André est la résultante de deux sources gravimétriques. La première source de l'anomalie gravimétrique mesurée (Figure III - 8, Figure III - 18) est due à un décalage des couches géologiques le long du plan de faille. Cela est clairement visible sur la réponse gravimétrique du modèle géologique (courbe verte, Figure III - 18). La deuxième source est une diminution gravimétrique, vraisemblablement due à une diminution de la densité des roches dans la zone de fracturation associée à la faille de Fontaine-André. L'effet gravifique total de la faille de Fontaine-André d'environ 0.25 mGal est clairement marqué sur les deux profils gravimétriques résiduels (courbe bleue, Figure III - 8, Figure III - 18). L'effet gravifique du décalage des couches géologiques est estimé à environ 0.2 mGal (courbe verte), mais de sens opposé à l'anomalie totale résiduelle mesurée. Par conséquent, l'effet gravifique dû à la diminution de densité des roches, qui est provoqué par la fracturation près de la faille, est plus important que l'anomalie totale résiduelle mesurée. Il n'est toutefois à ce stade pas possible de quantifier exactement la perte de masse rocheuse dans la zone fracturée. Seul un prélèvement d'échantillons dans un forage pourra définir exactement les densités des différentes formations géologiques dans la zone de fracturation associée à la Faille de Fontaine-André.

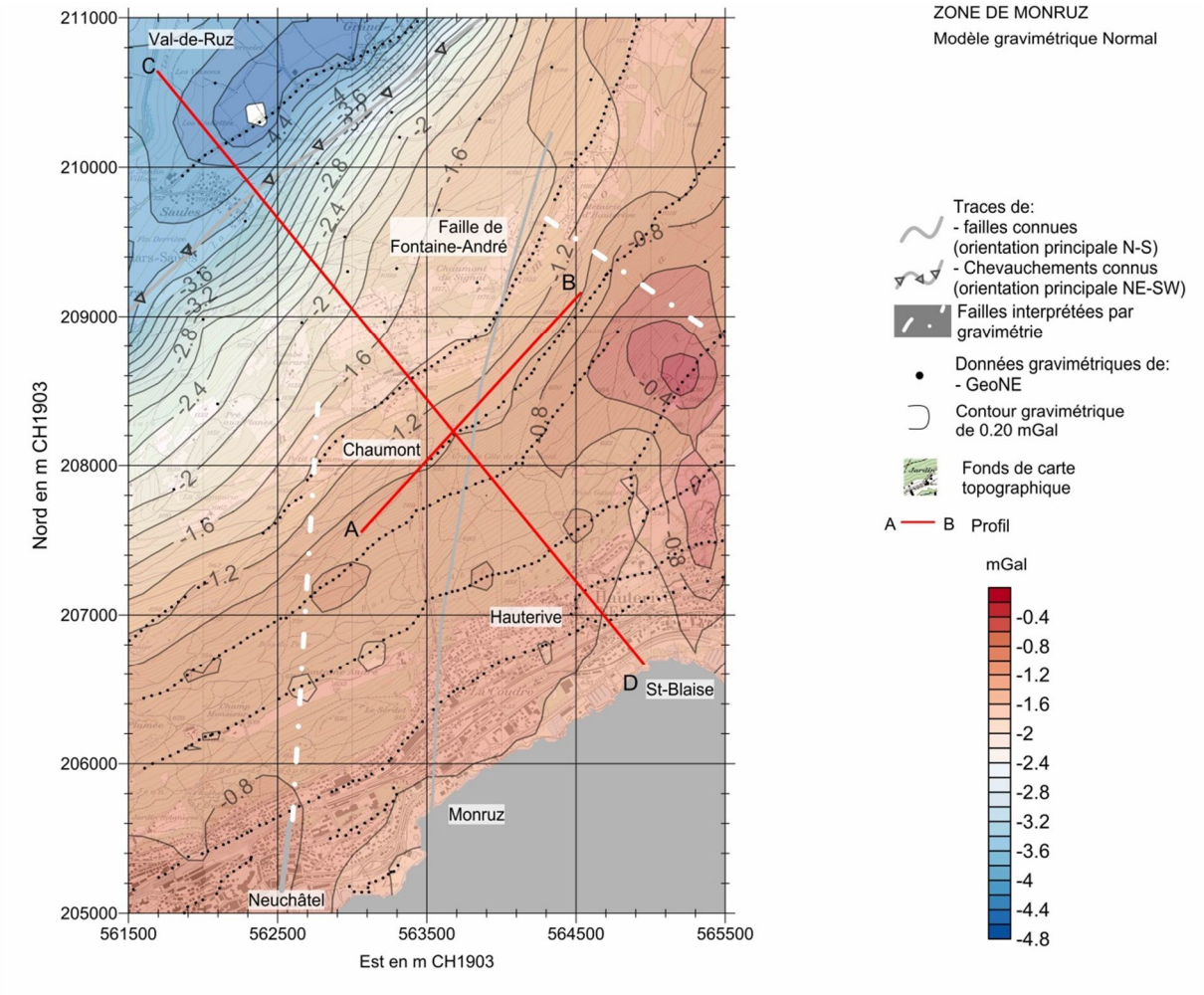



*Figure III - 16. Carte gravimétrique théorique calculée à partir du modèle géologique (Figure III - 3) de la zone de Monruz pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils A-B et C-D. La ligne blanche discontinue, dans le coin NE de la figure, est la trace de la faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. La ligne blanche au-dessus de Neuchâtel représente le prolongement supposé de la faille traversant la ville. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure III - 5). Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

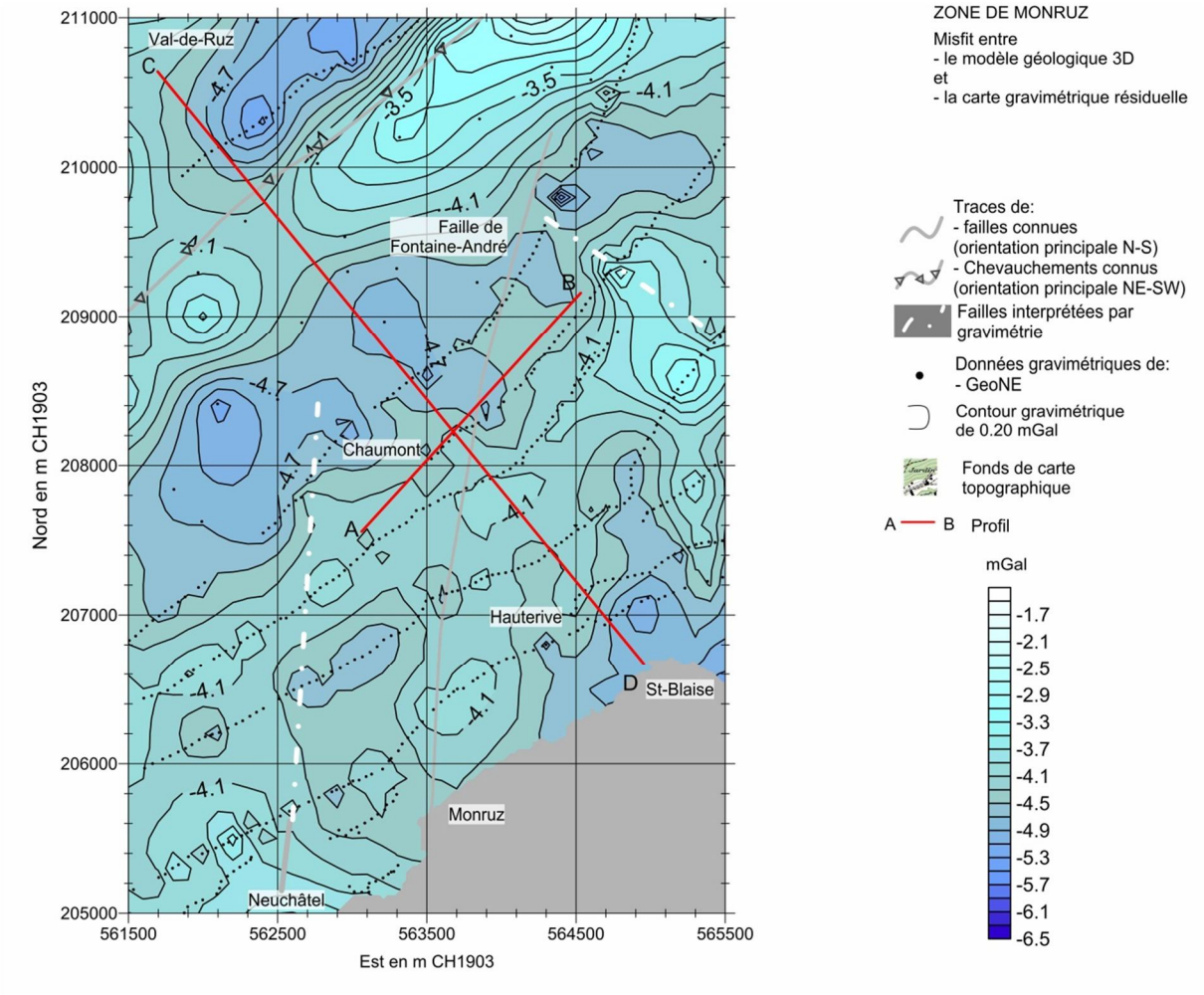



*Figure III - 17. Carte du Misfit pour la zone de St-Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte extraite à partir de la carte Misift de la région (Figure III - 6). Voir texte pour détails.*

Bien que seules deux failles puissent être clairement mises en évidence, dont la faille de Fontaine-André, il est probable que quelques autres anomalies gravimétriques de faible amplitude mesurée (juste à l'ouest de la faille a*, Figure III - 18) dans cette zone soient aussi l'expression de failles en profondeur. Toutefois de plus amples investigations sont nécessaires, telles que des campagnes d'acquisition de sismiques réflexion, pour vérifier leur existence.

Finalement, la zone de Monruz présente de bonnes indications que la roche soit fracturée suivant des orientations définies par des plans de failles, comme pour la faille de Fontaine-André et celle passant par la rue des Saars. Ces fracturations se traduisent principalement par une diminution de densité, qui s'exprime en surface par des anomalies gravimétriques de même orientation que les structures mentionnées.

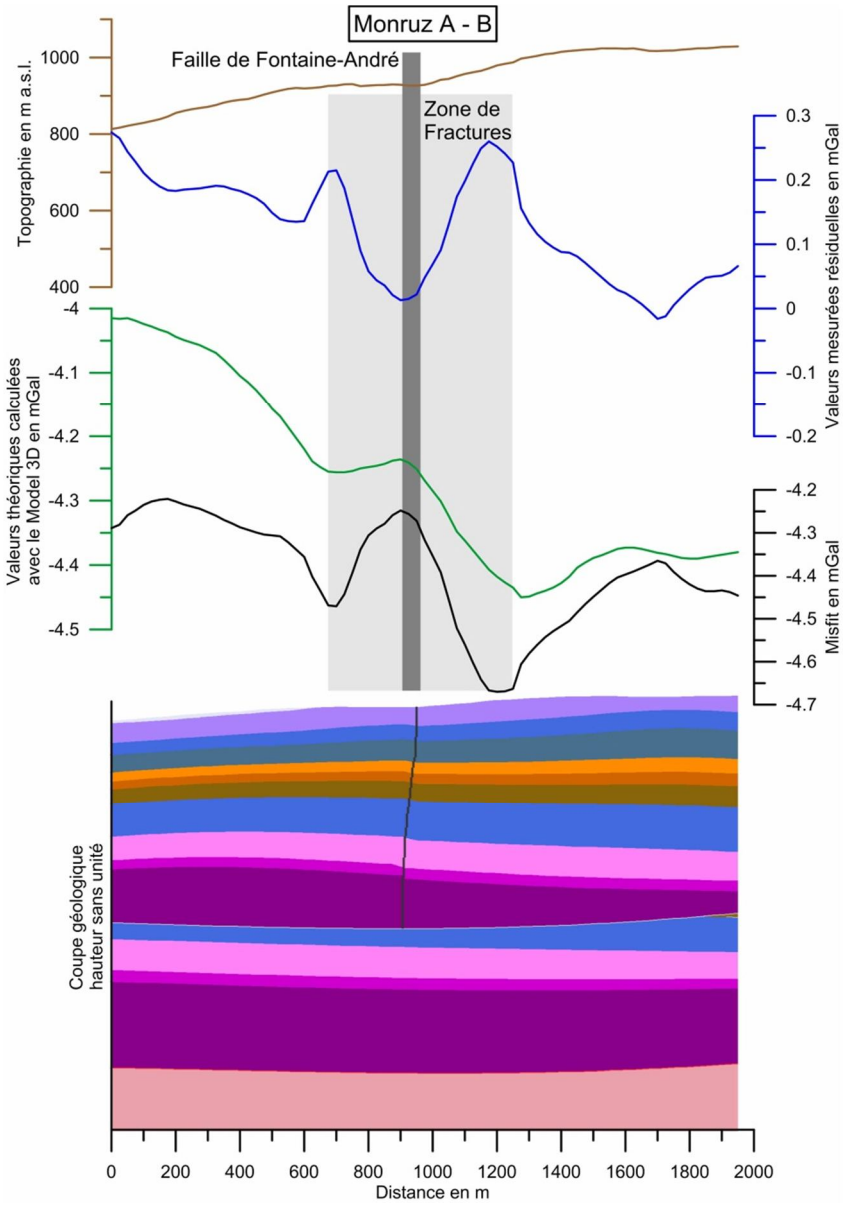



*Figure III - 18. Comparaison du profil gravimétrique le long de la ligne A-B sur la zone de Monruz avec la coupe géologique (Figure III - 7). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure III - 3). Une description du log géologique est présentée dans le log du modèle 1 (Figure III - 11).*

# 3.3 Modèle pour la zone St Blaise

## 3.3.1 Modèle géologique 3D

Le modèle pour la zone St Blaise a été centré autour de la faille décrochante de St Blaise (Figure III - 19). Ce décrochement montre en effet un rejet horizontal de plusieurs dizaines de mètres, et marque donc une zone plus fracturée. Il a été supposé, au vu de son rejet, que la faille affectait l'ensemble de la couverture sédimentaire jusqu'au plan de chevauchement inférieur. Elle affecterait donc les trois aquifères potentiels (Figure III - 19). De plus ces aquifères sont également recoupés par une série de chevauchements secondaires (Figure III - 19).

L'étude de terrain menée autour de la faille de St Blaise montre que les calcaires du Crétacé qui affleurent à proximité de la faille sont caractérisés par une fracturation importante. La zone du plan de faille, lorsqu'elle est visible, a une largeur de plusieurs dizaines de centimètres (Figure III - 19). La largeur de la zone fracturée est de plusieurs dizaines de mètres en surface, du fait de la présence de plusieurs failles décrochantes (Figure III - 19 et Figure III - 20).

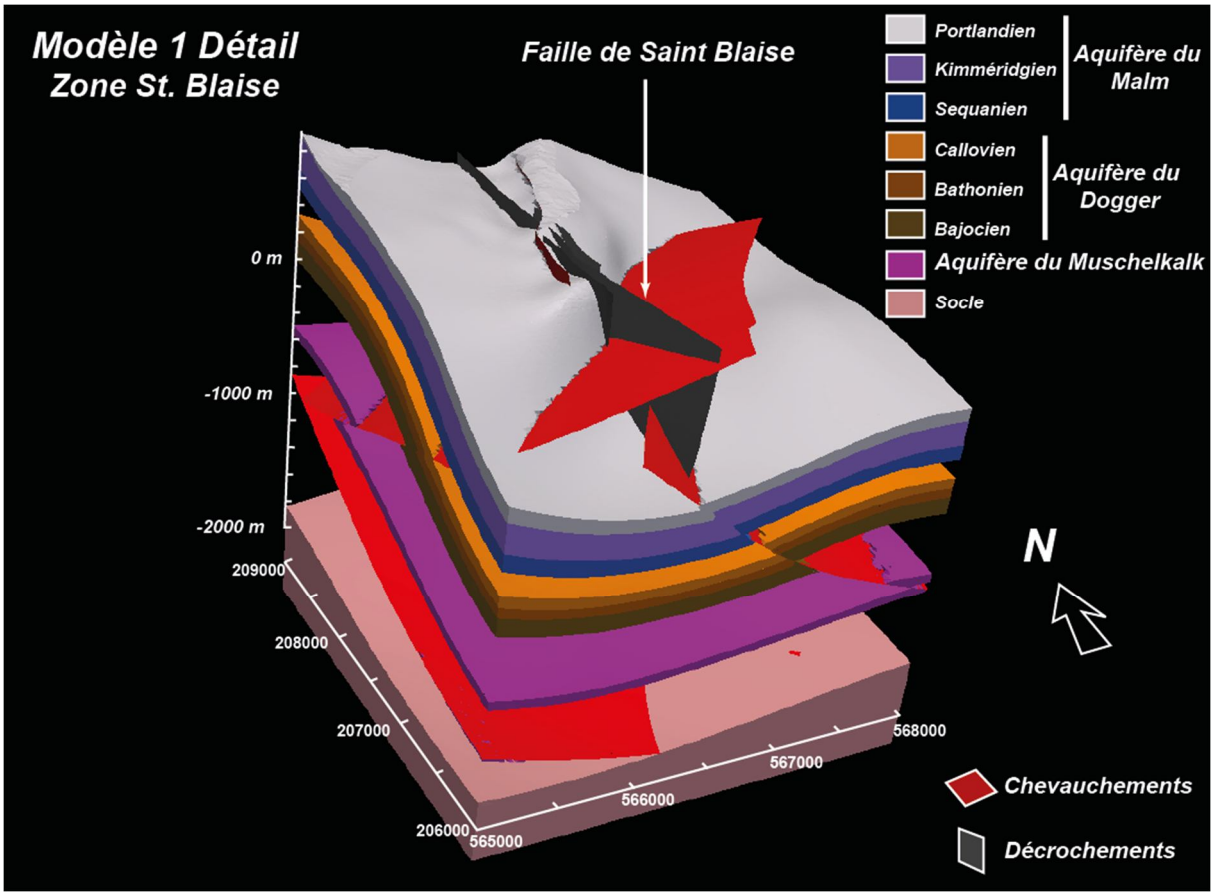



*Figure III - 19. Extraits du modèle Détail 1 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone St Blaise. Localisation sur la Figure III - 13.*

## 3.3.2 Effet gravimétrique des failles pour la zone St-Blaise

Dans la région de St Blaise, la principale faille est celle de St-Blaise. Basé sur les études géologiques antérieures (Kiraly, 1966 ; Kiraly & Meia, 1967 ; Schaer, 1955 ; Schardt, 1900; Suter, 1920; Suter & Lüthi, 1969), on note que la faille de St-Blaise représente en fait un système de faille (Figure III - 20) qui recoupe l'anticlinal de Chaumont. La formation de ce système de failles est contemporaine de la mise en place du chevauchement de Chaumont et le mouvement décrochant a accommodé localement la déformation en permettant la rotation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. La plupart des failles associées à ce système de failles sont très petites (inférieures au kilomètre) et n'ont que très peu décalé les formations géologiques. Par conséquent, seule les plus importantes failles, dont celle de St-Blaise est la plus grande (Figure III - 20), ont été incorporées dans le modèle géologique (Figure III - 19).

*Figure III - 20. Photos illustrant la déformation à proximité de la faille de St Blaise (Photos : G. Mauri).*

Comme présenté précédemment (Figure III - 9), des coupes gravimétriques ont été réalisées à travers la zone de St-Blaise (Figure III - 10). Ces coupes regroupent les variations gravimétriques mesurées (à partir de la carte résiduelle), modélisées (Figure III - 21) et le Misfit (Figure III - 22), ainsi que la topographie. La coupe St-Blaise A-B recoupe l'anticlinal de Chaumont dans sa longueur (Figure III - 21), tandis que la coupe Blaise C-D recoupe l'anticlinal de Chaumont perpendiculairement à son axe (Figure III - 9). Ces deux coupes traversent la faille de St-Blaise dans deux directions différentes (Figure III - 22).

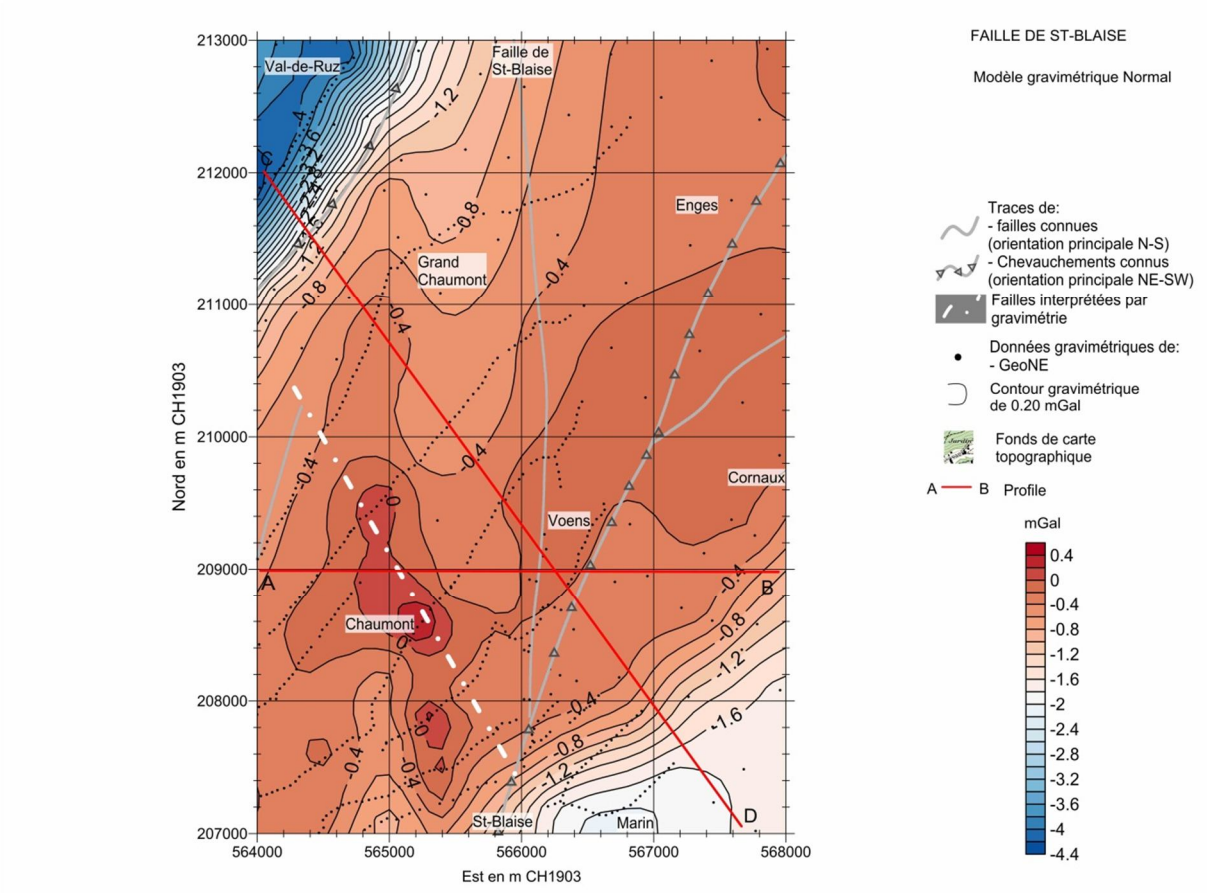



*Figure III - 21. Carte gravimétrique théorique calculée à partir du modèle géologique (Figure III - 3) de la zone de St-Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Les lignes continues rouges sont les profils A-B et C-D. La ligne blanche discontinue est la trace de la faille accommodant le changement d'orientation de l'axe de l'anticlinal de Chaumont. Carte extraite à partir de la carte gravimétrique résiduelle de la région (Figure III - 5).*

Tout comme pour la faille de Monruz, l'effet gravimétrique de la faille de St-Blaise est la résultante de deux sources gravimétriques. La première source de l'anomalie gravimétrique mesurée (Figure III - 9, Figure III - 23) est due à un faible décalage vertical des couches géologique le long du plan de faille. Sur la réponse gravimétrique du modèle géologique (courbe verte, Figure III - 23), l'effet de la faille est marqué par une amplitude d'environ 0.3 mGal. La deuxième source de variation gravimétrique est vraisemblablement due à une diminution de la densité des roches dans la zone de fracturation associée à la faille de St-Blaise. L'effet gravifique total de la faille de St-Blaise d'environ 0.3 mGal est clairement marqué sur les deux profils gravimétriques résiduels (courbe bleue, Figure III - 10, Figure III - 23). L'effet gravifique du décalage des couches géologiques est estimé à environ 0.1 mGal (courbe verte, Figure III - 23), et est lui aussi une décroissance gravimétrique. Par conséquent, l'effet gravifique dû à la diminution de densité des roches, provoqué par la fracturation près de la faille, est moins important que l'anomalie totale résiduelle mesurée. Tout comme pour la faille de Fontaine-André, à ce stade des connaissances, il n'est pas possible de quantifier exactement la perte de masse rocheuse dans la zone fracturée. En revanche, la faille de St-Blaise provoque un effet gravimétrique dans un rayon d'environ 500 m autour de son plan de faille. Seul un échantillonnage dans un forage pourra définir exactement les densités des différentes formations géologiques dans la zone de fracturation associée à la faille de Fontaine-André.

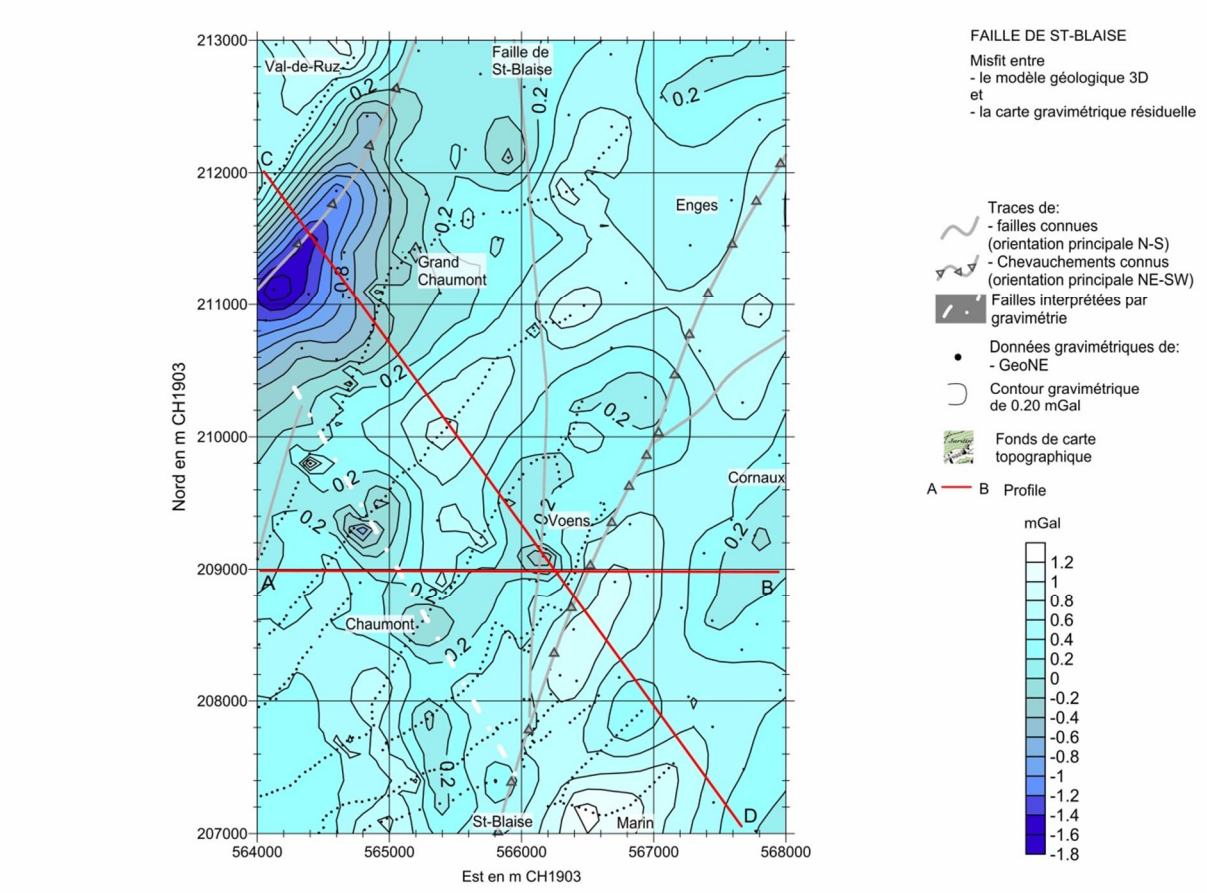



*Figure III - 22. Carte du Misfit pour la zone de St-Blaise pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. Carte extraite à partir de la carte Misift de la région (Figure III - 6). Voir texte pour détails*

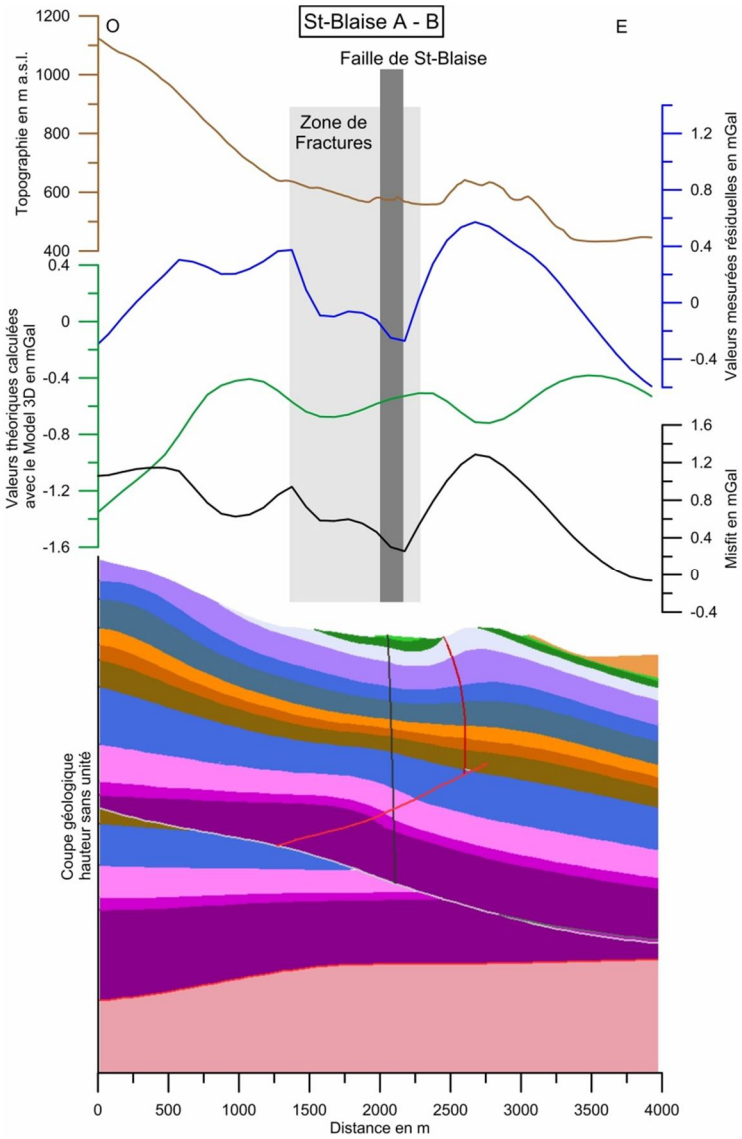



*Figure III - 23. Comparaison du profil gravimétrique le long de la ligne A-B sur la zone de St-Blaise avec la coupe géologique (Figure III - 9). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure III - 3). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en Jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure III - 11. Les traits rouges sur la coupe géologique représentent les plans de faille des rétro-chevauchements secondaires.*

Finalement, la zone de St-Blaise présente de bonnes indications que la roche soit fracturée suivant des orientations définies soit par un plan de faille, comme pour la faille de St-Blaise, soit par une fracturation diffuse due à la rotation de l'axe de l'anticlinal lors de sa formation. Ces fracturations se traduisent principalement par une diminution de densité, et qui s'exprime en surface par des anomalies gravimétriques de même orientation que les structures mentionnées.

# 3.4 Prospection des gaz de sols

## 3.4.1 Analyses des gaz de sols

Des échantillons de gaz de sols ont été prélevés le long de trois profils recoupant des failles ou des zones de failles connues (Figure III - 24). Le premier profil, situé dans le Bois de l'Abbé, au-dessus de La Coudre, a été réalisé le long d'une route forestière, à altitude plus ou moins constante, et recoupe la faille de Fontaine-André à hauteur du funiculaire de Chaumont. Les profils 2 et 3 recoupent la zone de faille de St-Blaise, respectivement dans la région du Villaret et au sud du hameau de Maley. Les résultats des mesures ont été projetés sur une droite est-ouest pour être représentés de manière graphique. Par conséquent, lorsqu'un graphique est accompagné d'une carte, les coordonnées est de cette dernière sont alignés et à la même échelle que l'abscisse du ou des graphiques.

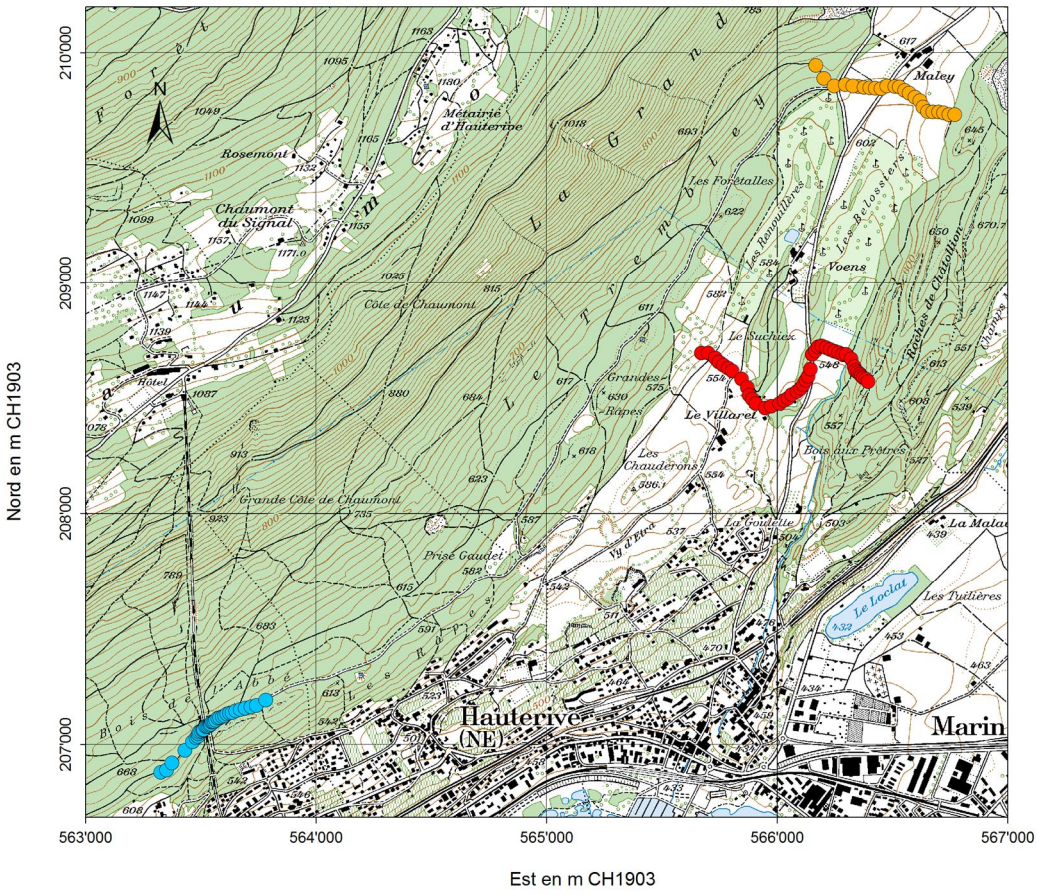



*Figure III - 24. Carte de situation des trois profils de mesure de gaz de sols dans la région Neuchâtel – St-Blaise. En bleu, le profil 1 sur la faille de Fontaine-André, en rouge et orange, respectivement les profils 2 et 3 situés sur la faille de St-Blaise. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 3.4.2 Profil 1, faille de Fontaine-André

Le premier profil réalisé s'étend le long de chemins forestiers sur le versant sud de la colline de Chaumont, perpendiculairement à la faille de Fontaine-André. Cette dernière suit plus ou moins le tracé du funiculaire de Chaumont à cet endroit.

Les résultats de ce premier profil ne sont pas inclus dans le présent rapport, leur qualité étant insuffisante. Plusieurs facteurs sont responsables de ces résultats. Le sol est constitué d'une couche d'humus recouvrant la roche en place. Les affleurements de roche sont nombreux et l'épaisseur de l'humus atteint rarement la profondeur souhaitée pour cette campagne d'échantillonnage, soit 90 cm. Dans la faible épaisseur de sol, de nombreux fragments de roche et racines rendent le perçage critique et l'étanchéité entre le haut des tiges de cuivre et le sol discutable.

En outre, la première station du profil avait été choisie comme station de référence. Un tube de cuivre équipé de son tuyau en silicone avait été laissé en place afin de pouvoir y prélever un échantillon au début et à la fin de chaque demi-journée de terrain. Malheureusement un rongeur s'est attaqué au tuyau de silicone probablement dès le premier jour, mais l'incident n'a été remarqué que plusieurs jours plus tard lorsque pratiquement l'entier du profil avait été mesuré. De cette manière, les données fluctuant entre les différentes sessions de mesures n'ont pas pu être corrigées ou interprétées à l'aide d'une station de référence.

Toutefois, malgré la piètre qualité des analyses, il ne semble pas y avoir d'anomalie visible au niveau de la faille de Fontaine-André, mais ceci nécessiterait confirmation par une nouvelle série de mesures.

### 3.4.3 Profil 2, faille de St-Blaise, Le Villaret

La Figure III - 25 montre les résultats des analyses d'hélium (He), dioxyde de carbone ($CO_2$) et oxygène ($O_2$) près du Villaret, sur la commune de St-Blaise. Les mesures ont été réalisées en quatre jours entre le 15 juin et le 4 juillet 2012, puis certaines parties du profil ont été remesurées les 13 et 14 juillet. Au total, 51 analyses sont présentées ici, projetées sur un axe est-ouest.

La partie ouest du profil, jusqu'au point CN 554 m, est située dans un pâturage en pente pour les deux premières stations, puis à la limite entre un chemin agricole (Chemin des Brouillets) et un champ cultivé. Cette section, excepté pour la dernière station, montre des anomalies négatives des valeurs d'hélium, jusqu'à -0.2 ppm par rapport à la concentration d'hélium dans l'air. Les valeurs de $CO_2$ et d'$O_2$ sont corrélées inversement, les hautes valeurs de $CO_2$ correspondant aux valeurs d'oxygène les plus basses. La station à laquelle la valeur maximale de $CO_2$ a été mesurée, soit 7.2 %v/v, est aussi celle où la mesure d'oxygène est la plus basse, avec 15.9 %v/v.

La suite du profil, jusqu'à deux stations à l'est de la coordonnée 566'000, ont été réalisées dans des sols très variés, allant du bord de route remanié à la prairie semée, en passant par un sol très peu épais dans une forêt dense. Cette variabilité des sols se traduit par une grande variabilité des données pour tous les gaz. Une corrélation inverse entre le dioxyde de carbone et l'oxygène est également observée à ces stations. Néanmoins, trois stations situées autour du coude de la route mesurent des valeurs d'hélium supérieures de plus de 0.09 ppm à la valeur de l'air. Cette anomalie positive, bien que très faible, pourrait être liée à la présence de la faille observée à l'affleurement dans les rochers situés juste au-dessous (Figure III - 20).

La continuation du profil vers l'est, située essentiellement en bordure de champs cultivés, ne montre pas d'anomalie d'hélium avant d'arriver en lisière de forêt ; le dioxyde de carbone et l'oxygène varient quant à eux probablement à cause de l'activité biologique dans le sol. A partir du début de la forêt, le terrain redevient très variable avec notamment des profondeurs de sols changeant nettement d'un point à un autre. De plus la topographie devient également très marquée et la roche en place est sub-affleurante. Deux stations montrent une assez forte anomalie d'hélium à cet endroit. Cependant, une certaine instabilité du spectromètre de masse pendant cette session de mesure résulte dans une marge d'erreur réelle supérieure à la marge d'erreur calculée pour l'ensemble des analyses. Par conséquent, aucune conclusion ne peut être tirée de ces deux points, avant qu'une nouvelle série de mesures ne soit réalisée.

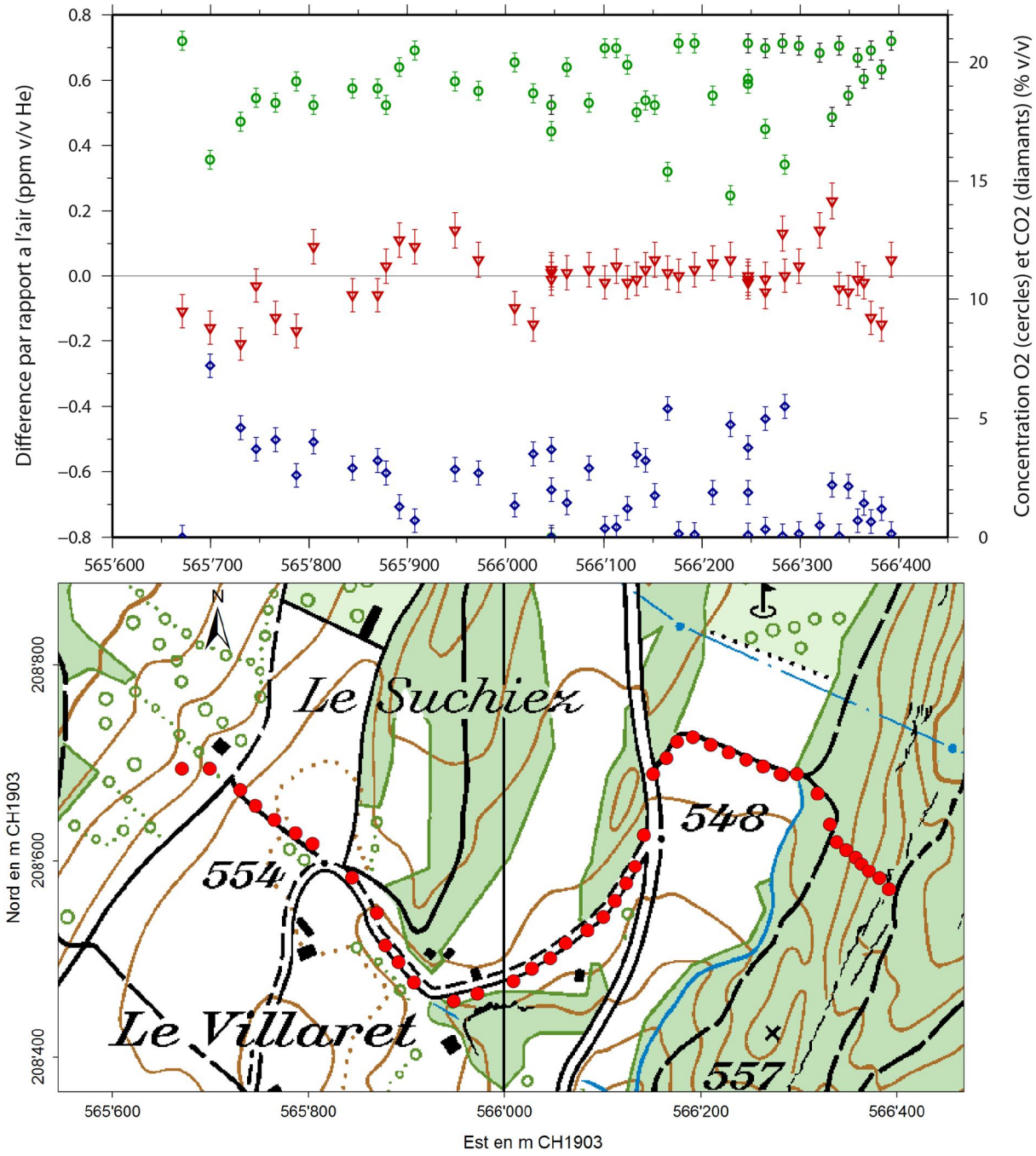



*Figure III - 25. Concentrations de gaz mesurées sur le profil 2 du Villaret projetées sur une ligne est-ouest et carte du profil. Les triangles rouges représentent la déviation des mesures d'He par rapport à l'air (5.24 ppm, indiquée par la ligne noire à la valeur 0.0). Les cercles verts et losanges bleus représentent respectivement la concentration d'oxygène et de $CO_2$ en % v/v. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 3.4.4 Profil 3, faille de St-Blaise, Maley

### RESULTAT DES ANALYSES ET ANOMALIES

Une première série d'analyses a été effectuée le 5 juillet 2012 sur un profil est-ouest en aval du manège de Maley, sur la commune de St-Blaise (Figure III - 26). Les deux premières stations à l'ouest du profil sont situées en terrain forestier et la troisième station en bordure de la route d'Enges. Les stations suivantes sont situées soit dans un champ de luzerne et graminées, soit dans du pâturage en rive gauche de la vallée, à l'exception de trois points en milieu de profil situés en bord de route ou de chemin agricole.

Ce profil a été effectué en un seul jour, ce qui limite grandement l'influence des variations météorologiques qui peuvent affecter les compositions des gaz de sols dans les autres profils. La station de référence du deuxième profil a tout-de-même été remesurée en début et en fin des deux sessions de mesure et confirment la bonne cohérence du jeu de donnée.

L'hélium montre deux anomalies, l'une de grande ampleur dans la partie ouest du profil et une seconde affectant deux stations dans la partie est du profil. L'anomalie ouest ne se caractérise pas par des teneurs extrêmes, la valeur d'hélium maximale mesurée atteint juste 5.44 ppm, mais par le nombre de stations concernées et la cohérence des valeurs entre elles. Toutes les stations formant cette anomalie ont été échantillonnées et analysée au cours d'une seule session et la qualité des analyses était excellente. Des échantillons d'air ont été intercalés entre les échantillons de gaz de sols et certains échantillons ont été mesurés à plusieurs reprises afin d'écarter tout aléa analytique.

Outre l'hélium, les valeurs de $CO_2$ et d'$O_2$ de ces stations sont les plus hautes, respectivement les plus basses, mesurées dans le cadre de cette campagne, mais ces deux gaz montrent une très forte variabilité de concentration, avec des valeurs pouvant changer d'un facteur 2 entre deux stations distantes d'une vingtaine de mètres. Une corrélation inverse entre les deux gaz est par contre également observée au niveau de cette anomalie, mais la corrélation positive entre l'hélium et le dioxyde de carbone est moins évidente, du fait de la grande variabilité de concentration de ce dernier.

Il est à noter que le sol dans lequel la majorité des points représentant l'anomalie positive ont été mesurés est celui d'une prairie semée, qui était précédée par une culture de céréale jusqu'en 2011, caractérisé par une activité biologique intensifiée artificiellement, un tassement provoqué par le passage des engins agricoles et une modification de la structure et de la chimie. Ces caractéristiques expliquent en tout cas en partie les concentrations de $CO_2$ et d'$O_2$ observées, l'activité biologique dans le sol consommant de l'oxygène et rejetant du dioxyde de carbone. La culture de ce champ n'explique cependant pas l'augmentation des teneurs en He des trois premières stations du profil.

A l'est de l'anomalie, le premier point en dehors du champ cultivé est aussi celui où les valeurs des trois gaz mesurés se rapprochent des concentrations dans l'air.

L'anomalie positive située dans la partie est du profil est d'ampleur et de concentration moins importante que la première. Les concentrations d'hélium sont corrélées positivement aux valeurs de $CO_2$ et négativement aux valeurs d'oxygène.

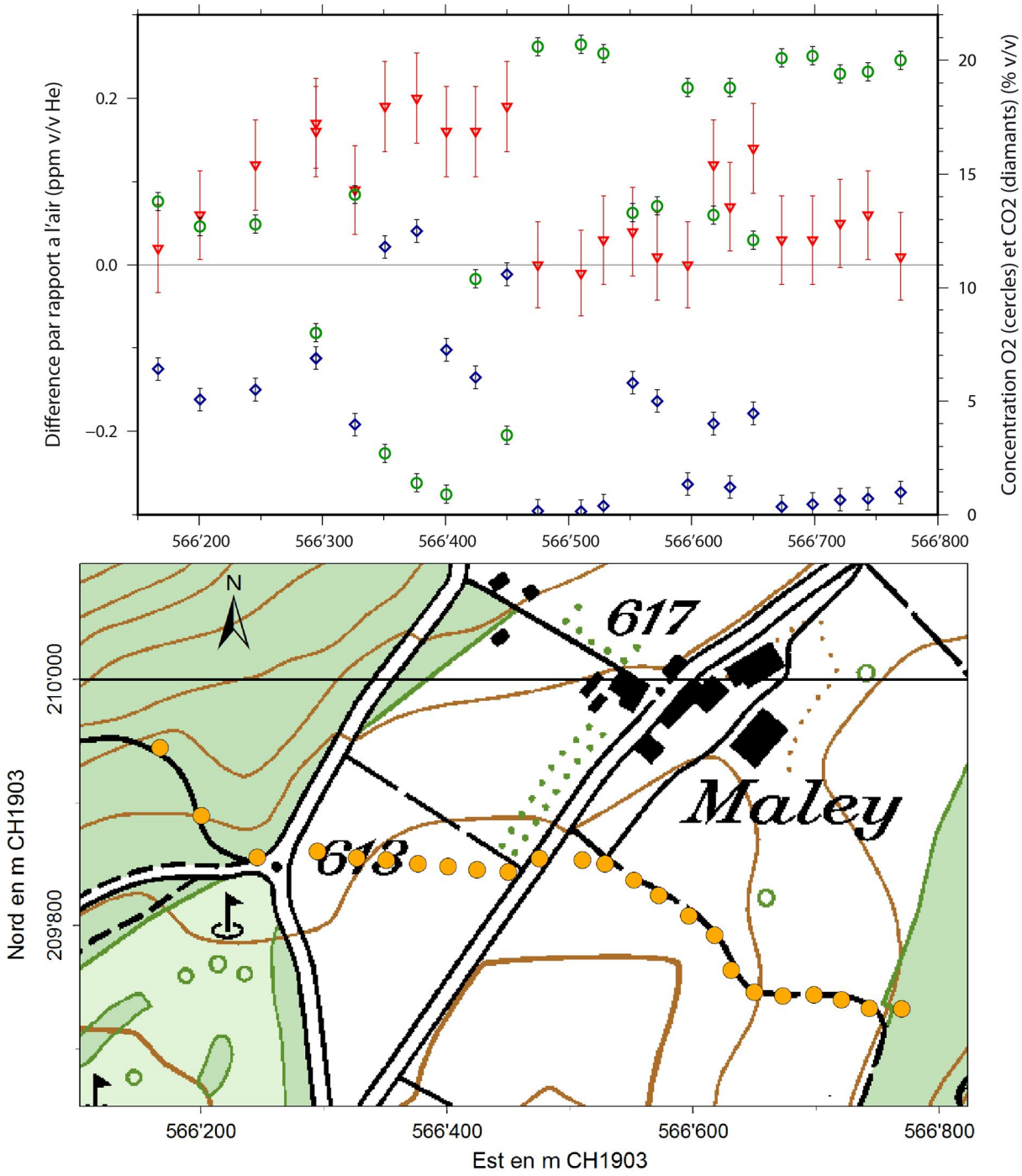



*Figure III - 26. Concentrations de gaz mesurées sur le profil 3 de Maley projetées sur une ligne est-ouest et carte du profil. Les triangles rouges représentent la déviation des mesures d'He par rapport à l'air (5.24 ppm, indiquée par la ligne noire à la valeur 0.0). Les cercles verts et losanges bleus représentent respectivement la concentration d'oxygène et de $CO_2$ en % v/v. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

Afin de mieux comprendre la plus grande des anomalies et d'obtenir davantage d'information sur ses causes, une série de nouvelles mesures et analyses a été effectuée le 25 juillet 2012 (Figure III - 27). Un court profil a été réalisé en travers du champ cultivé et plusieurs mesures ont été réalisées dans le pourtour du champ cultivé, à l'extérieur de celui-ci, afin de déterminer si l'anomalie mesurée le 5 juillet était uniquement liée à la nature du sol et à l'activité biologique inhérente aux cultures. Sur la Figure III - 27, le graphique supérieur représente un agrandissement de la partie ouest du profil de la

Figure III - 26. Les stations mesurées le 5 juillet sur ce profil sont représentées par les disques orange sur la carte. Le graphique au centre représente les mesures effectuées dans le champ cultivé, et juste à l'ouest de celui-ci, le 25 juillet (triangles rouges sur la carte). Le graphique inférieur représente les valeurs des stations mesurées à l'extérieur du champ cultivé (triangles inversés jaunes sur la carte).

Dans les résultats de cette nouvelle session d'échantillonnage, l'anomalie positive d'hélium observée le 5 juillet n'est pas observée, et les valeurs sont proches de la valeur de l'air. Les mesures de $CO_2$ et d'$O_2$ montrent toujours une variabilité assez élevée, mais les amplitudes sont bien moindres que le 5 juillet. Il est à noter aussi que les valeurs maximales de $CO_2$ ou d'$O_2$ du 25 juillet ne correspondent pas forcément à une valeur maximale du même gaz 20 jours plus tôt ; cette différence peut au moins en partie être due à la position différente des stations des deux sessions d'échantillonnage. Lors de l'échantillonnage du 25 juillet, il a été décidé de ne pas chercher à retrouver les emplacements précis de notre premier passage afin de piétiner le moins possible des cultures relativement avancées.

Les quatre points d'échantillonnage à l'extérieur du champ cultivé (triangles inversés jaunes sur la Figure III - 27) montrent des valeurs d'hélium très proches de la valeur atmosphérique. Les valeurs de dioxyde de carbone et d'oxygène sont en moyenne également plus proches des valeurs atmosphériques que celles mesurées à l'intérieur du champ cultivé, ceci étant vraisemblablement dû à l'activité biologique plus faible dans les sols forés pour ces quatre points.

## INTERPRETATION DES RESULTATS

Le fait le plus remarquable, dans les analyses réalisées le long de ce profil 3, est la présence d'une anomalie majeure lors d'une session d'échantillonnage et son absence complète lors d'une session d'échantillonnage sur le même site environ trois semaines plus tard.

Un des principaux paramètres externes pouvant affecter les concentrations de gaz dans les sols est lié aux conditions météorologiques, qui influencent directement l'humidité du sol. Or, les conditions étaient très différentes entre le 5 et le 25 juillet 2012. Lors de la première session de prélèvement, les précipitations au cours des jours et des semaines précédents avaient saturé le sol en eau, un niveau saturé ayant même été rencontré à 80 cm de profondeur quelques dizaines de mètres plus à l'est le long du même profil. Le 25 juillet faisait quant à lui suite à plusieurs jours de temps sec et chaud et de nombreuses fentes de dessiccation étaient visibles dans le champ cultivé. Ces observations sont confirmées par les données météorologiques enregistrées par Météosuisse.

Par conséquent, l'anomalie d'hélium observée le 5 juillet, de même que les grandes variations de concentration de $CO_2$ et d'$O_2$, peuvent être la conséquence d'un piégeage du gaz par un sol argileux rendu très imperméable par les précipitations abondantes. Le temps sec survenu par la suite a favorisé la reprise de la circulation des gaz dans le sol, équilibrant de fait les gaz de sols avec l'atmosphère sur les premières dizaines de centimètres. L'hélium piégé par le sol argileux imperméable peut avoir pour source un réseau de fractures perméables connectant le socle cristallin avec la surface. La faille de St-Blaise étant constituée d'une zone regroupant de nombreuses petites failles, il n'est pas impossible qu'une fracture perméable soit située plus ou moins à l'aplomb de l'anomalie mesurée, d'autant plus qu'une des fractures principales passe quelques dizaines de mètres plus à l'ouest.

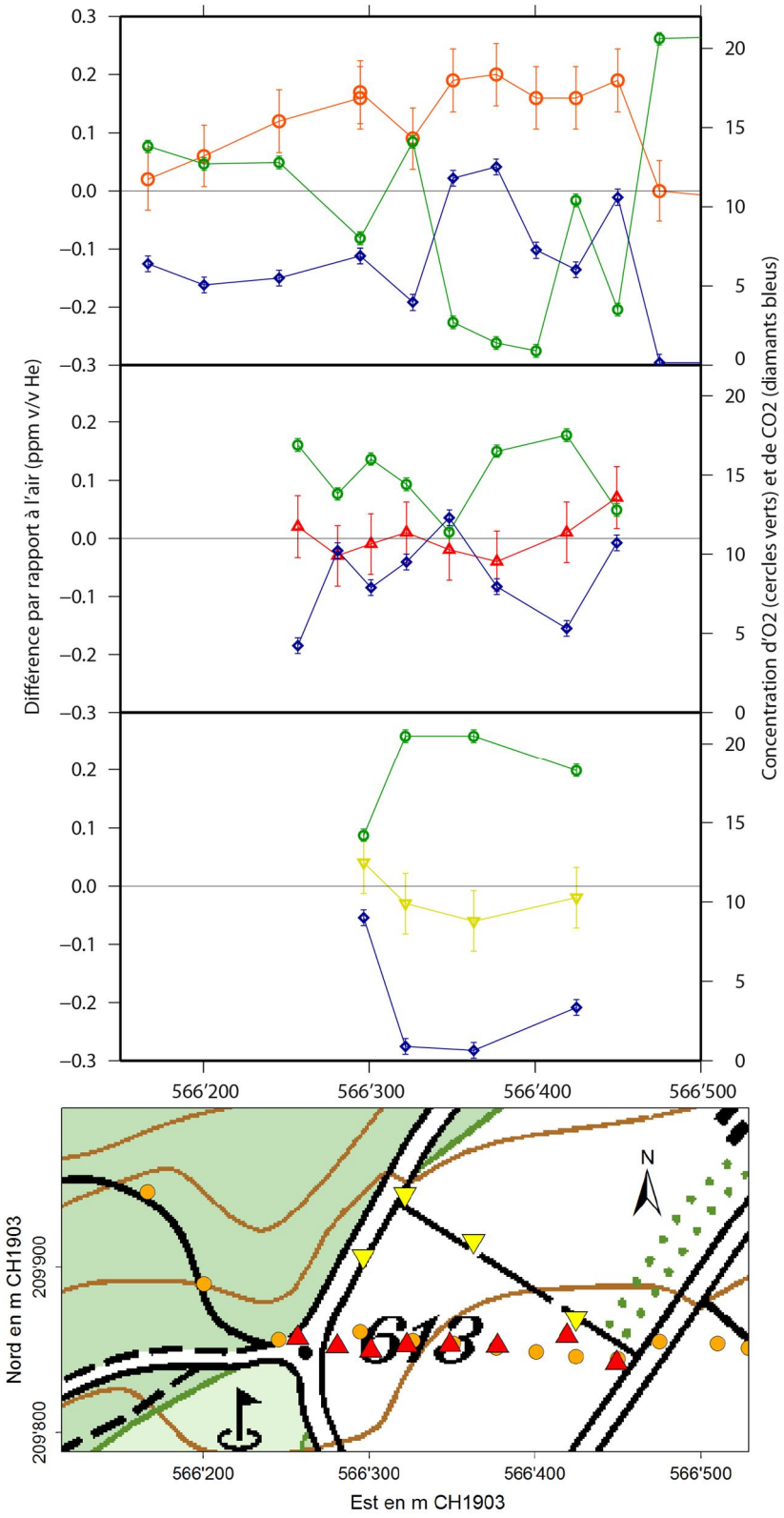



*Figure III - 27. Agrandissement de la zone proche du point CN 613 m sur le profil 3 de Maley. Les trois graphiques représentent, respectivement de haut en bas, les mesures à travers le champ cultivé le 5 juillet 2012, les mesures dans le champ cultivé le 25 juillet 2012 et les mesures à l'extérieur du champ le 25 juillet 2012. Les triangles et les disques représentent les mesures d'hélium, avec la même symbologie que sur la carte. Les cercles et les losanges représentent les analyses d'$O_2$ et de $CO_2$, respectivement. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 3.4.5 Discussion

La mesure de gaz de sols pour la détection de fractures perméables est encore une technique en développement, tant les phénomènes pouvant influencer les concentrations de gaz sont nombreux et complexes. Il est reconnu que les facteurs météorologiques, et plus particulièrement l'humidité du sol, jouent un très grand rôle dans les circulations de gaz dans le premier mètre sous la surface (Hinkle, 1994). Ces phénomènes semblent en effet avoir eu un impact important sur la campagne d'analyse effectuée dans le cadre de ce projet, ce qui est illustré avec les deux séries de mesures réalisées à trois semaines d'intervalle près du manège de Maley.

Dans l'ensemble, trois anomalies ressortent de cette campagne :

- Une anomalie le long du profil 2 du Villaret, d'amplitude réduite, mais située juste au-dessus d'une faille observée à l'affleurement.
- Une anomalie dans la partie est du profil 3 de Maley, d'amplitude réduite également, qui pourrait témoigner de la présence d'une faille perméable à cet endroit.
- Une anomalie particulière dans la partie ouest du profil 3 de Maley, mise en évidence par l'accumulation de gaz sous un sol argileux imperméable, mais non mesurée dans un sol plus aéré.

Ces trois anomalies mériteraient d'être étudiées plus complétement, en répétant les mesures dans des conditions météorologiques variées. La réalisation d'autres profils à courte distance des premiers permettrait également de mettre en évidence si ces anomalies, dans le cas où leur présence est confirmée par d'autres mesures, ont une certaine extension parallèlement aux failles investiguées.

Les résultats actuels, s'ils ne permettent pas d'affirmer avec certitude la présence d'une perméabilité significative connectant la surface avec des niveaux plus profonds de la croûte, semblent indiquer un lien entre anomalie positive d'hélium et la présence de certaines failles.

## 3.4.6 Remarques sur la méthodologie

Un des buts de cette campagne de mesure était également de caractériser le potentiel de la méthode des gaz de sols dans le cadre d'une campagne de prospection en géothermie profonde dans le contexte géologique du canton de Neuchâtel.

Les mesures des gaz de sols sont très dépendantes du contexte géologique, du type de sols rencontrés et du climat (Klussman, 1993). Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet montrent que cette méthode nécessite d'être davantage étudiée pour pouvoir être utilisée comme outil fiable dans un environnement tel que rencontré dans le canton de Neuchâtel.

La grande diversité des sols, principalement liée à la topographie, rend les interprétations difficiles lorsqu'un même profil rencontre plusieurs sols de types différents. D'autre part, les mesures devraient idéalement être effectuées par temps sec et stable, lorsque l'activité biologique est limitée. Plusieurs auteurs recommandent d'effectuer les mesures pendant différentes saisons suivant leur terrain d'étude. Dans le canton de Neuchâtel, l'automne ou l'hiver sont peut-être des périodes plus favorables que l'été, à condition de rencontrer une période de temps stable.

Selon les terrains, la réalisation de trous d'environ 1 m de profondeur et d'un centimètre de diamètre peut prendre plus ou moins de temps et d'effort. Mais dans l'ensemble, les mesures de terrain et de laboratoire sont très rapides et l'instrumentation est peu coûteuse, aussi bien à l'achat qu'à l'entretien. Avec un peu plus de développement pour l'adapter au contexte de la région, la mesure d'hélium et de $CO_2$ dans le sol peut potentiellement s'avérer être une technique très intéressante pour l'exploration en géothermie profonde dans une région comme le canton de Neuchâtel.

# 3.5 Etude de sites de forage potentiel

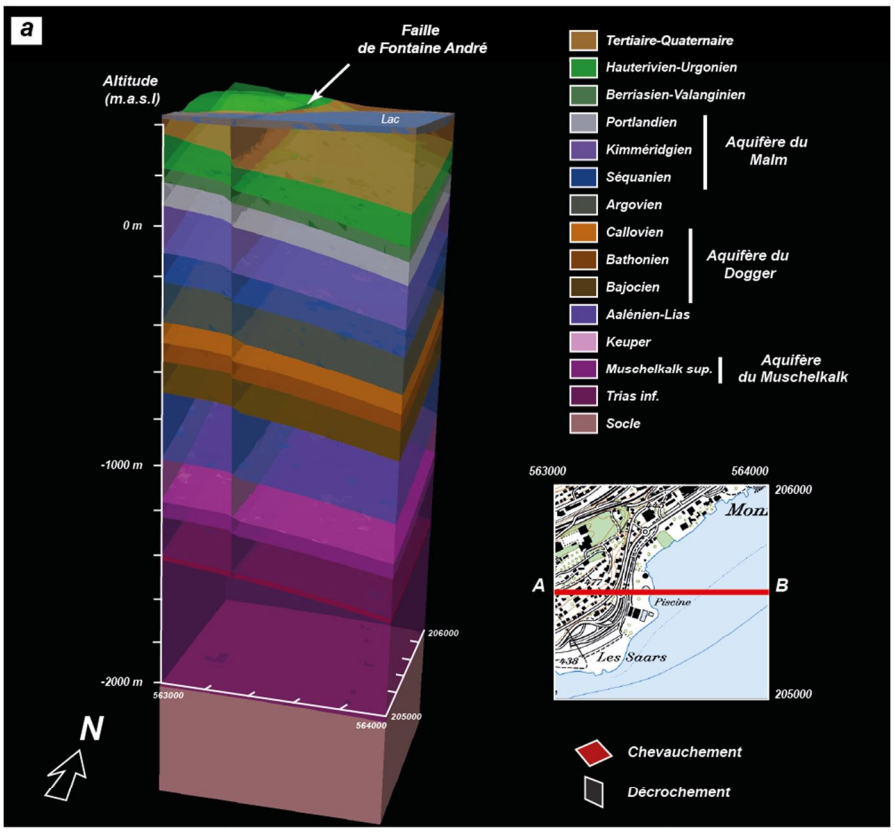
## 3.5.1 Modèle pour le site de Neuchâtel Monruz

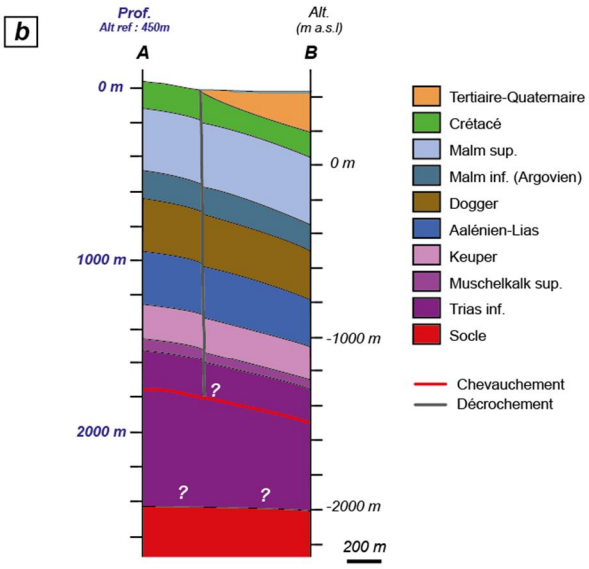
La localisation du modèle raffiné du site de Neuchâtel Monruz a été choisie en accord avec l'étude du potentiel d'utilisation de la chaleur (cf. §5). La zone de 1x1 km couvre une série de parcelles réunissant les conditions nécessaires à l'implantation d'un forage. La Figure III - 28a montre la géométrie de l'ensemble de la pile stratigraphique et ses relations avec la faille de Fontaine André. La Figure III - 28b correspond à un log de forage synthétique représentatif de la zone, et la Figure III - 28c donne la profondeur du toit des trois aquifères potentiels dans la zone sélectionnée. Les incertitudes sur les profondeurs sont estimées à partir de la variabilité des épaisseurs de chaque formation. L'intersection entre la faille de Fontaine André et le plan de chevauchement est hypothétique ainsi que l'interface entre le socle cristallin et la couverture sédimentaire (Figure III - 28b).

## 3.5.2 Modèle pour le site de St Blaise-Marin

La localisation du modèle raffiné du site de St Blaise-marin a été choisie en accord avec l'étude du potentiel d'utilisation de la chaleur (cf. §5). La zone de 1x1 km couvre une série de parcelles réunissant les conditions nécessaires à l'implantation d'un forage. La Figure III - 29a montre la géométrie de l'ensemble de la pile stratigraphique et ses relations avec la faille de St Blaise. La Figure III - 29b correspond à un log de forage synthétique représentatif de la zone, et la Figure III - 29c donne la profondeur du toit des trois aquifères potentiels dans la zone sélectionnée. Les incertitudes sur les profondeurs sont estimées à partir de la variabilité des épaisseurs de chaque formation. L'intersection entre la faille de St Blaise et le plan de chevauchement, la géométrie du réseau de failles en profondeur, ainsi que l'interface entre le socle cristallin et la couverture sédimentaires sont hypothétiques (Figure III - 29b).

**Site de forage potentiel de Neuchâtel Monruz**

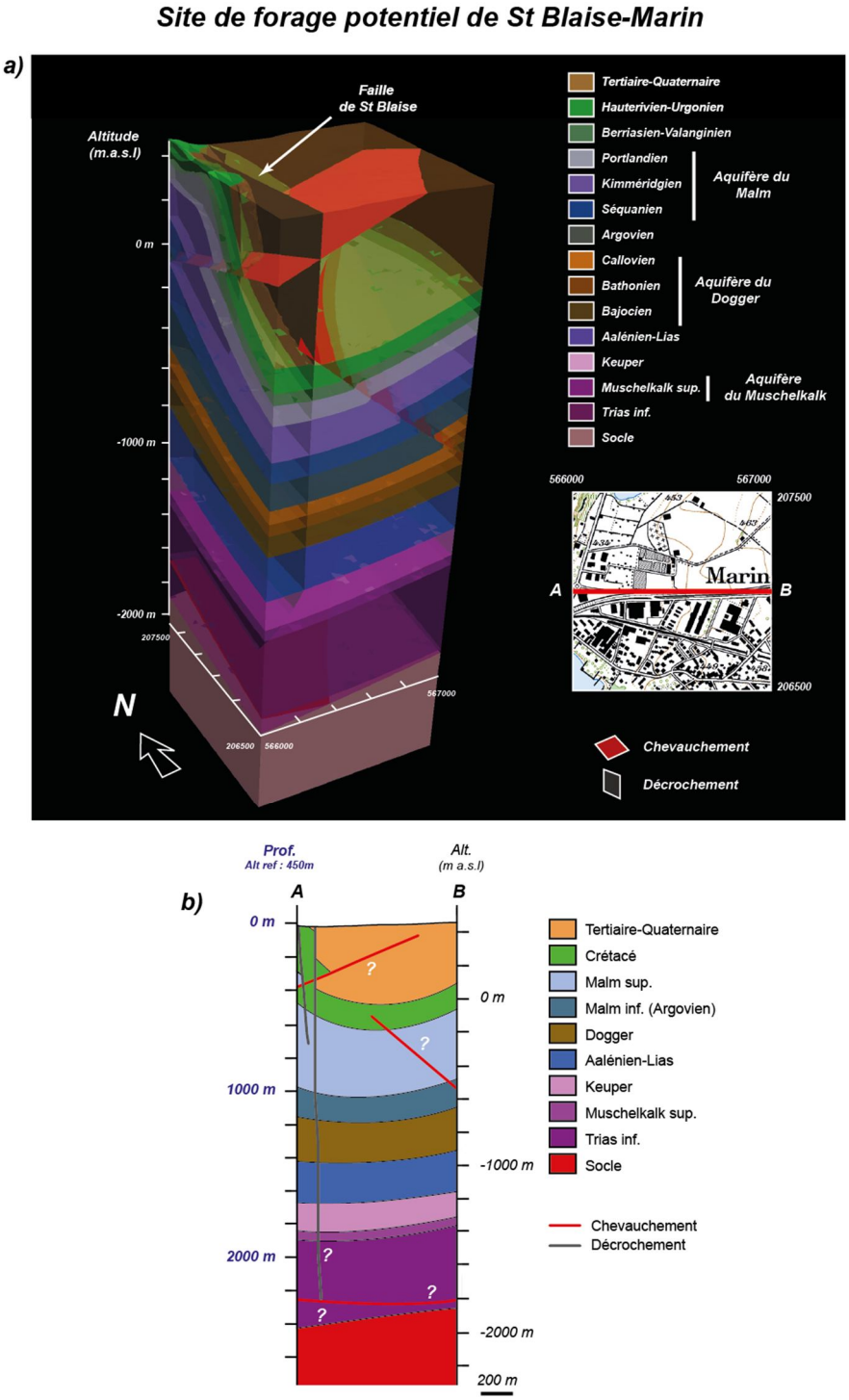



c

| Aquifères potentiels | Profondeur (Toit) | Incertitude |
|---|---|---|
| **Malm sup.** | 150-350 m | ±50 m |
| **Dogger** | 600-800 m | ±100 m |
| **Muschelkalk sup.** | 1400-1500 m | ±200 m |

*Figure III - 28. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de Neuchâtel Monruz. (b) Colonne synthétique de forage. (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation sur la Figure III - 13.*




| *Aquifères potentiels* | *Profondeur (Toit)* | *Incertitude* |
|---|---|---|
| ***Malm sup.*** | 400-700 m | ±50 m |
| ***Dogger*** | 1000-1200 m | ±100 m |
| ***Muschelkalk sup.*** | 1800-1900 m | ±200 m |

*Figure III - 29. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de St Blaise-Marin (b) Colonne synthétique de forage (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure III - 13.*

# 4. Potentiel géothermique

## 4.1 Modèle thermique régional

### 4.1.1 Paramètres du modèle

Le modèle thermique régional a été réalisé par le bureau Geowatt à Zurich sur la base d'un maillage par éléments finis réalisé à partir des surfaces géologiques extraites du Modèle 1 (Figure III - 30). Ce modèle a pour but une première estimation du champ de température dans la région de Neuchâtel – St Blaise.

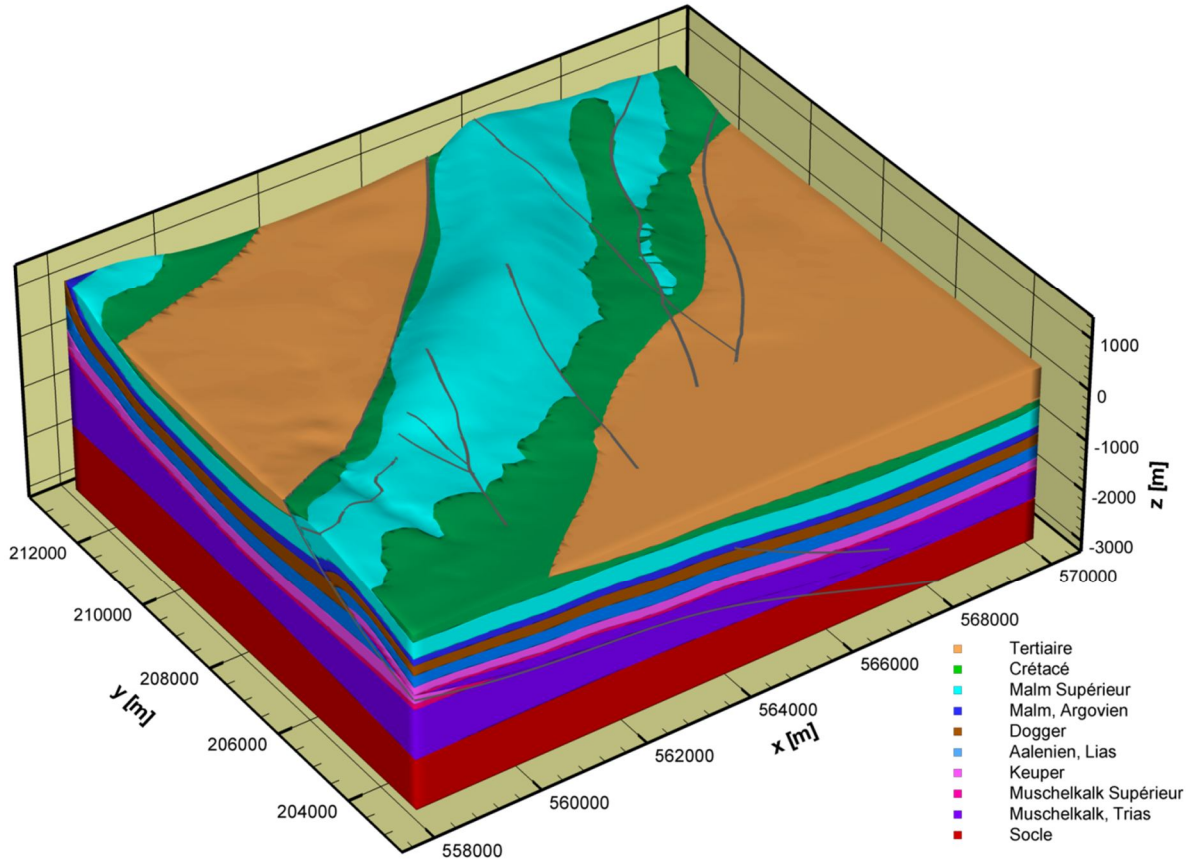



*Figure III - 30. Modèle 3D régional de Neuchâtel – St Blaise, vue du sud-ouest. Système de coordonnées CH1903.*

La température à la surface et le flux de chaleur à 3 km sont montrés dans les Figure III - 31 et Figure III - 32. Un gradient du flux de chaleur est pris en compte afin de simuler une température légèrement inférieure sous le Jura que sous le plateau Suisse. La Figure III - 33 montre les résultats de la calibration. Une comparaison est effectuée au moyen des données des forages les plus proches de la zone d'étude. Le profil de température calculé est extrait au SE du modèle, au plus près des données disponibles. La Figure III - 34 montre le champ de température calculé pour le modèle Neuchâtel – St Blaise.

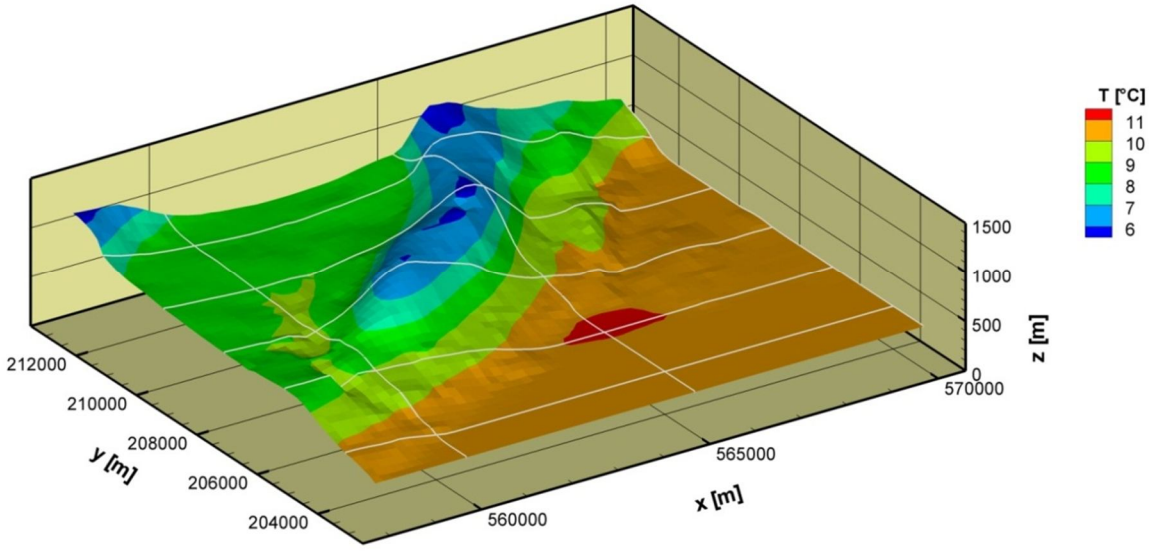



*Figure III - 31. Température à la surface définie pour le modèle régional de Neuchâtel – St Blaise*

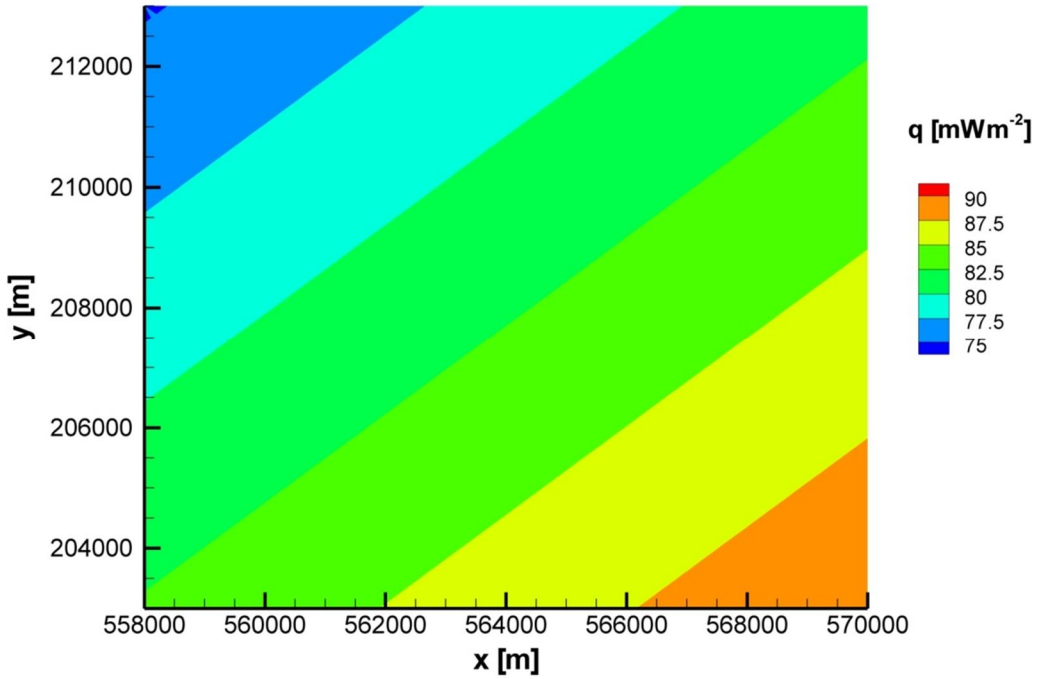



*Figure III - 32. Flux thermique défini à la base du modèle régional de Neuchâtel – St Blaise à 3 km sous le niveau de la mer.*

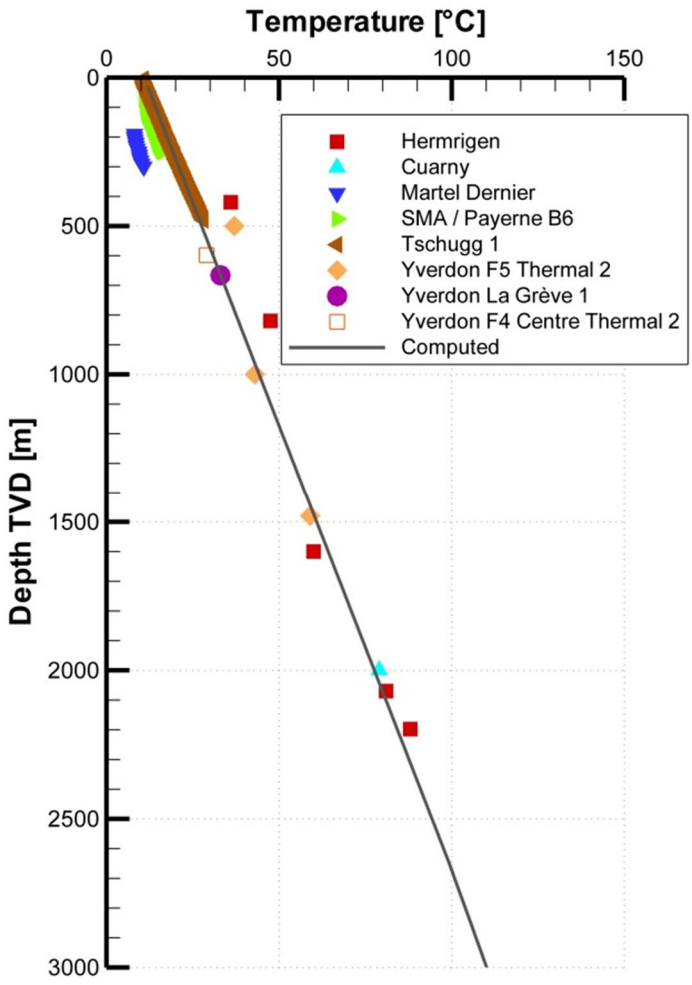



*Figure III - 33. Résultats de la calibration du modèle régional de Neuchâtel – St Blaise (coordonnées 570'000/203'000)*

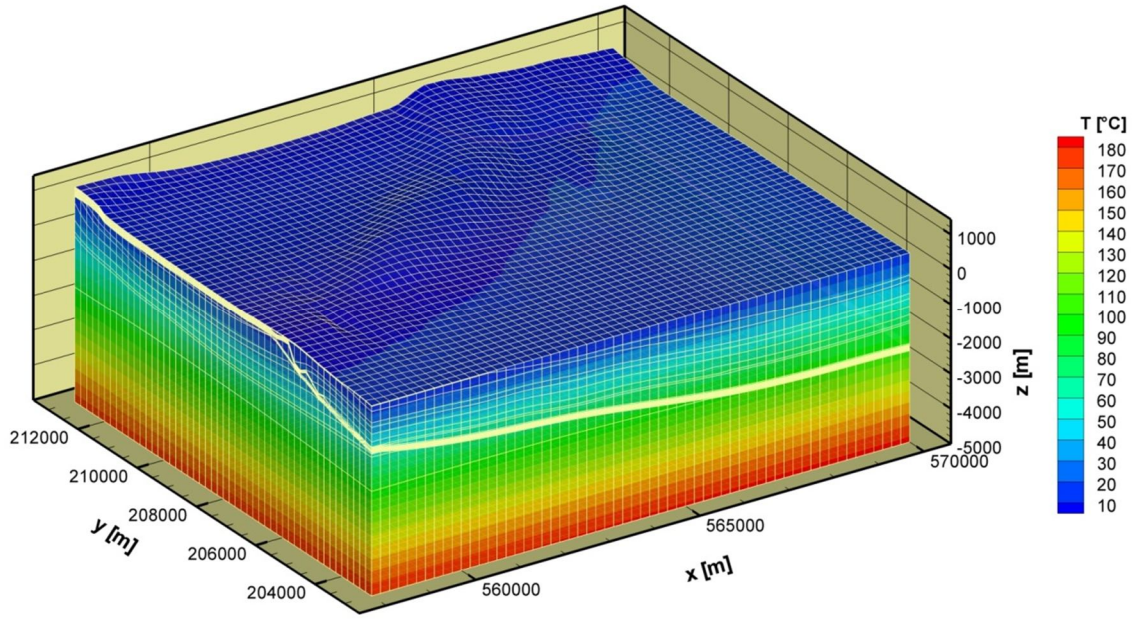



*Figure III - 34. Vue en 3D de la température calculée dans le modèle régional de Neuchâtel – St Blaise.*

## 4.1.2 Température dans les aquifères

La distribution des températures au toit des aquifères potentiels est présentée dans les cartes de la Figure III - 35 à la Figure III - 37 . La même tendance générale se dégage de ces trois cartes, avec une augmentation de la température en direction du littoral liée à la structure du premier pli du Jura. Les températures les plus élevées sont observées au SE de St Blaise et atteignent ~30°C pour le Malm, ~55°C pour le Dogger et ~75°C pour le Muschelkalk.

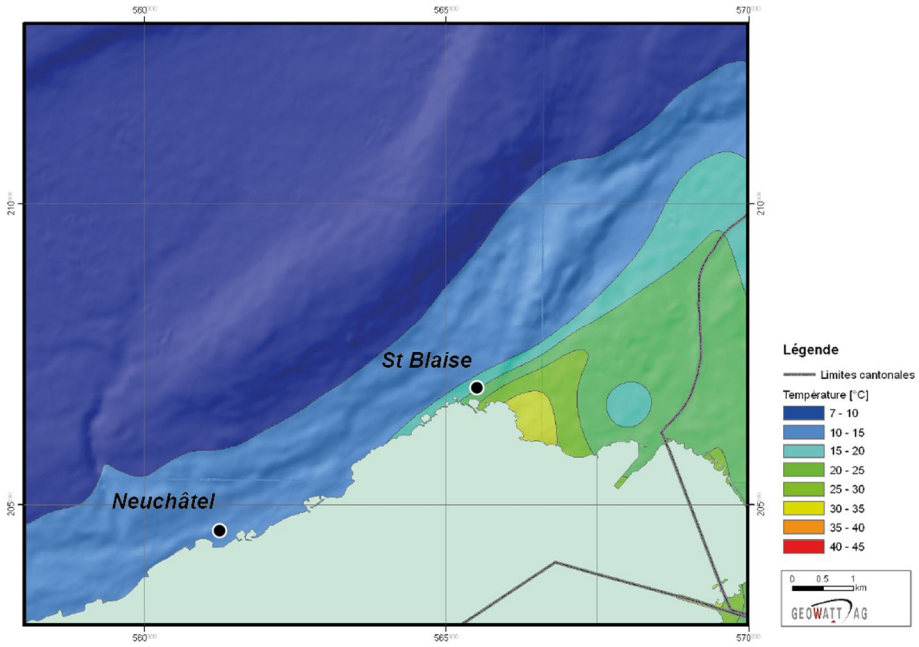



*Figure III - 35. Température calculée au toit du Malm (modèle régional Neuchâtel – St Blaise)*

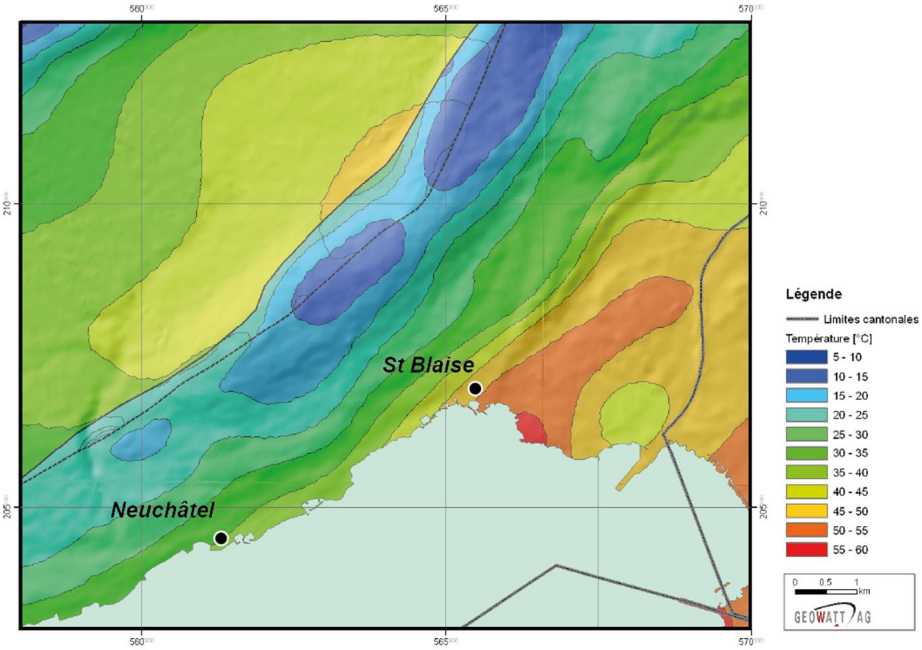



*Figure III - 36. Température calculée au toit du Dogger (modèle régional Neuchâtel – St Blaise)*

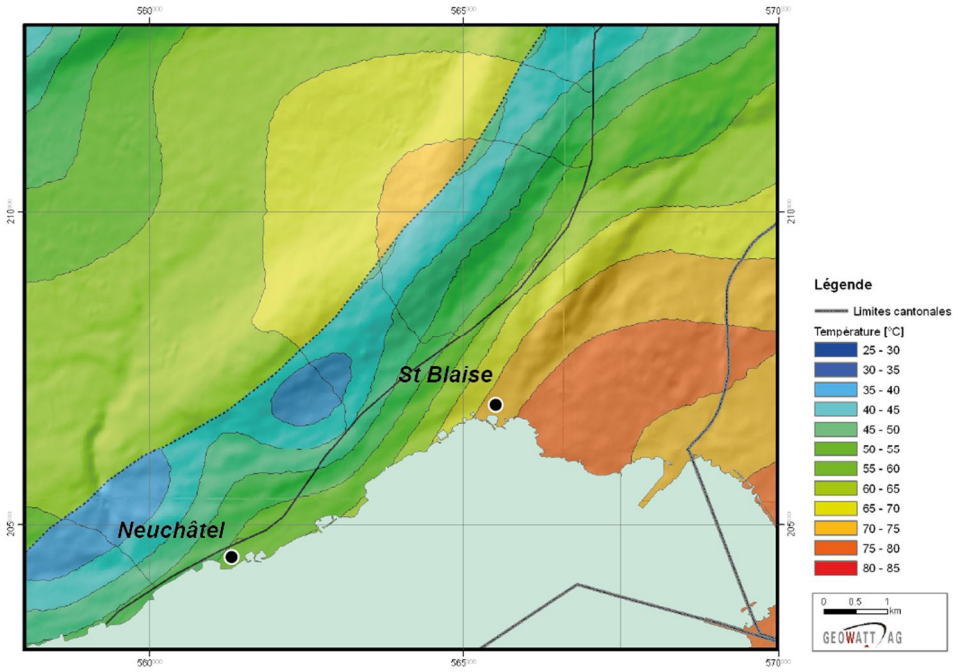



*Figure III - 37. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle régional Neuchâtel – St Blaise)*

# 4.2 Modèles thermiques de détail

## 4.2.1 Paramètres des modèles

Les modèles ont été réalisés à l'aide du module de modélisation directe de température du logiciel Geomodeller (BRGM, Intrepid geophysics). Le modèle géologique 3D utilisé est le modèle Détail 1 (cf §2), qui prend en compte avec plus de détail la structure géologique. Les paramètres de conductivité thermique et de production de chaleur sont ceux présentés au Chapitre II.

La température à la surface a été fixée à 10°C pour les modèles normaux (sans effet du karst), ce qui correspond à la moyenne annuelle des températures enregistrées par les stations météorologiques cantonales pour la région du littoral. Cette température est fixe, quelle que soit l'altitude, car le logiciel ne permet pas d'inclure de variations. Pour pouvoir déterminer le flux de chaleur à la base du modèle, il est nécessaire de fixer la valeur de ce flux à la surface du modèle. Basé sur les données de la littérature le flux de chaleur a été fixé à 80 $mW.m^{-2}$ à la surface du modèle (Données de l'Atlas de la Suisse et de Medici & Rybach, 1995). Le résultat obtenu à la base du modèle, c'est-à-dire à -2500 m.s.m, indique que le flux calculé est de 75 $mW.m^{-2}$. Un détail de la procédure de calcul est décrit dans le Chapitre II.

Différentes hypothèses ont été testées pour les modèles incluant l'effet potentiel de circulation d'eaux froides dans le Malm. Ces hypothèses correspondent à un scénario extrême où les écoulements dans le karst annulent totalement le gradient géothermique, ce qui est peu réaliste. Cependant elles permettent de calculer des températures minimales pour les différents aquifères.

Pour le site de Neuchâtel - Monruz, ou le karst affleure à la surface, la température a été fixée à 12°C à la base du Malm supérieur. Cette température correspond à un gradient géothermique très faible (5-10°C.$km^{-1}$) pour la zone karstifiée et est en accord avec les données de forages dans l'aquifère du Malm (Tableau III - 2). Pour le site de St Blaise-Marin, la situation géologique est différente, car le Malm est enfoui sous une épaisse couche de sédiments tertiaires et quaternaires d'environ 500 m (Figure III - 29). La température a été fixée à 20°C à la base du Malm supérieur, correspondant à un gradient géothermique normal (30°C.$km^{-1}$) dans les sédiments tertiaires et un gradient faible dans les

zones karstifiées (5-10°C.km$^{-1}$). Les paramètres des différents modèles sont résumés dans le Tableau III - 3.

*Tableau III - 2. Données d'une sélection de forages profonds dans le canton de Neuchâtel pour la zone littorale (d'après données PDGN, 2010 et Archives CHYN)*

| **Forage** | **Température réservoir (°C)** | **Débit (l·s$^{-1}$)** | **Profondeur (m)** | **Aquifère** |
|---|---|---|---|---|
| Bevaix - Treytel | 9 - 14 | 75 | 300 | Malm |
| St-Aubin | - | - | - | |
| SA1 | 11 - 13 | 31 | 313 | |
| SA2 | 13 - 14 | 20 | 380 | Malm |
| SA3 | 12 - 13 | 20 | 315 | |

*Tableau III - 3. Paramètres utilisées pour les modèles thermiques détaillés de la région Neuchâtel – St Blaise.*

| **Zone** | **Flux base du modèle (mW.m$^{-1}$)** | **T Surface (°C)** | **T base Malm sup. (°C)** |
|---|---|---|---|
| Neuchâtel – St Blaise | 75 | 10 | - |
| Site Neuchâtel Monruz | 75 | - | 12 |
| Site St Blaise - Marin | 75 | - | 20 |

## 4.2.2 Température dans les aquifères

La distribution des températures au toit des aquifères du Dogger et du Muschelkalk est présentée sur les Figure III - 38 et Figure III - 39 respectivement. On retrouve la même tendance que sur les modèles régionaux avec une augmentation de la température en direction du littoral liée à la structure du premier pli du Jura. Les températures estimées sont assez cohérentes entre les modèles régionaux et les modèles détaillés, avec de valeurs légèrement plus faibles pour les modèles détaillés, liées à une valeur de flux de chaleur inférieure. Les températures les plus élevées sont observées au SE de St Blaise et atteignent ~50°C pour le Dogger et ~65°C pour le Muschelkalk.

Le Tableau III - 4 présente la synthèse des estimations de température pour les sites potentiels de forage de Neuchâtel - Monruz et St Blaise – Marin. Pour les deux sites, le modèle " karst " montre des températures de 13 à 17°C inférieures au modèle " normal ". Ces valeurs sont des minima et ne correspondent pas à la réalité. Il faut également noter pour le site de St Blaise – Marin que la température calculée pour le modèle normal à 500 m de profondeur est d'environ 25°C, ce qui correspond assez bien à la température du forage de Tschugg dont la température atteint 28°C à la même profondeur (Schärli & Kohl, 2002). Le modèle normal serait donc plus proche de la réalité pour St Blaise, ce qui est également en accord avec la structure locale, ou l'aquifère du Malm est confiné sous le Tertiaire (Figure III - 29**)**.

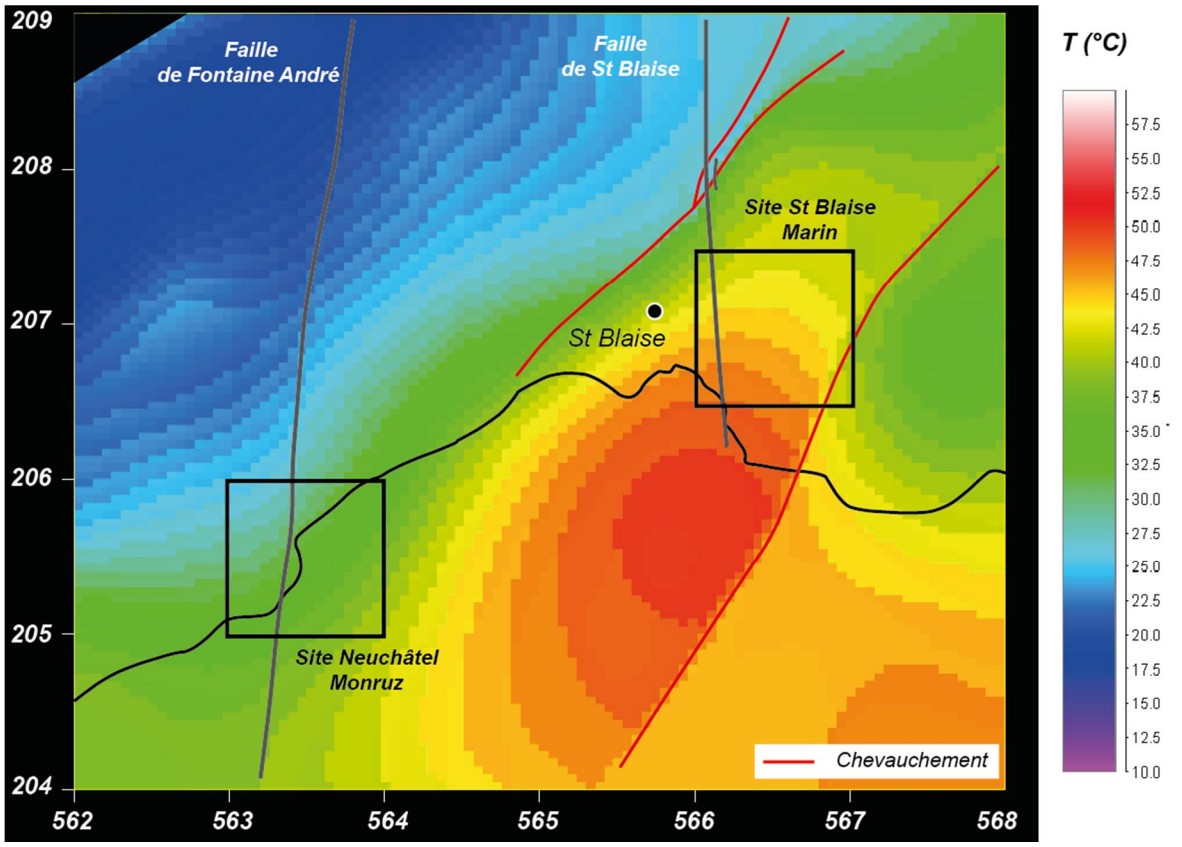



*Figure III - 38. Température calculée au toit du Dogger (modèle détaillé Neuchâtel-St Blaise)*

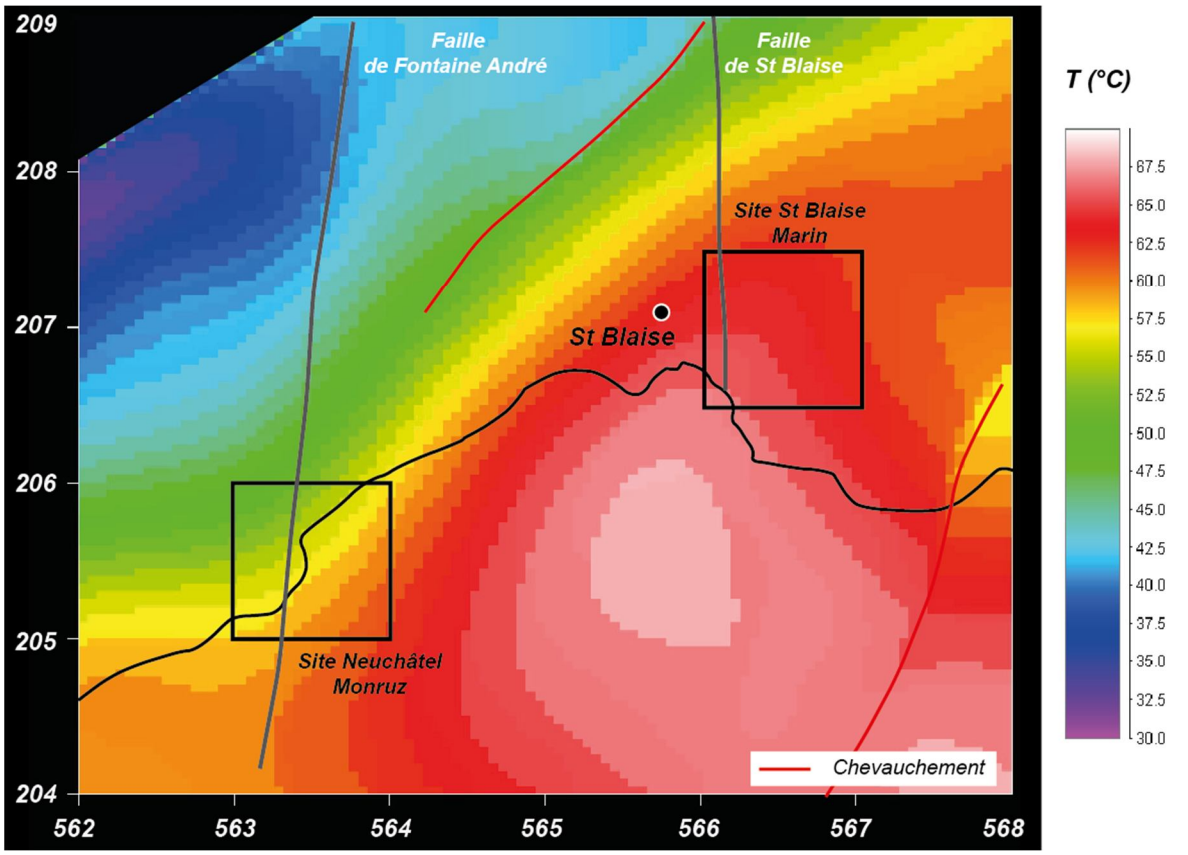



*Figure III - 39. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle détaillé Neuchâtel-St Blaise)*

*Tableau III - 4. Bilan des températures estimées pour sites de la région Neuchâtel – St Blaise.*

| **Aquifère** | **Site Neuchâtel - Monruz** | | | **Site St Blaise - Marin** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Profondeur moyenne (m)** | **Température moyenne et écart-type (°C)** | | **Profondeur moyenne (m)** | **Température moyenne et écart-type (°C)** | |
| | | Non karstifié | Karstifié | | Non karstifié | Karstifié |
| Malm | 400 | 21 ± 4 | 12 (fixé) | 800 | 31 ± 4 | 20 (fixé) |
| Dogger | 900 | 35 ± 3 | 21 ± 3 | 1300 | 46 ± 2 | 29 ± 2 |
| Muschelkalk | 1450 | 55 ± 3 | 42 ± 3 | 1850 | 63 ± 1 | 47 ± 1 |

# 5. Potentiel d'utilisation de la chaleur

## 5.1 Introduction

L'étude confiée au bureau Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA avait pour buts d'analyser les scénarios d'exploitation à mettre en œuvre pour valoriser la ressource géothermique au voisinage des zones potentiels envisagés en priorité par le projet GeoNE pour des forages profonds sur le Littoral Neuchâtelois : soit les zones de Neuchâtel-Monruz et de Saint-Blaise-Marin.

Ce travail a été terminé en octobre 2011 et un rapport circonstancié et détaillé a été remis : Scénarios possibles à mettre en oeuvre pour valoriser l'eau de forages géothermiques sur le littoral neuchâtelois, en particulier dans les régions de Neuchâtel et de St-Blaise-Marin.

Contrairement aux possibilités plus immédiates et mieux connues de la valorisation de la chaleur à haute température (utilisation en direct de la chaleur géothermique à plus de 80°C), la mise en valeur de la chaleur à basse température n'est pas spontanément évidente. Les systèmes projetés et les exemples de réalisation sont rares, parfois peu performants et mal adaptés aux conditions géologiques du littoral neuchâtelois. Récemment, plusieurs projets prometteurs ont été menés en vue d'exploiter en réseau à très basse température dans la région de la Béroche (NE) et à St-Imier (BE), avec des températures de la ressource comprise entre 12 et 20 °C.

## 5.2 Travaux réalisés

Pour les deux secteurs (Neuchâtel et St-Blaise-Marin), les scénarios d'exploitation les plus représentatifs et probables en termes de débit-température de la ressource, et pour chaque aquifère potentiellement exploitable ont fait l'objet d'études techniques et économiques détaillées. Ont été considérés en particulier :

- A Neuchâtel : l'intégration de la géothermie de basse température (15 à 60°C) à un réseau de chauffage à distance existant (Chauffage Urbain Maladière) avec le calcul détaillé des investissements, des économies d'énergies et du prix de revient de la « chaleur géothermique ». Des contacts ont été pris et des visites effectuées avec des collaborateurs de Viteos SA, propriétaire et exploitant du réseau Chauffage Urbain Maladière (CUM), pour une intégration de la géothermie.
- A St-Blaise-Marin : le pré-dimensionnement de réseaux de distribution de chaleur haute température et d'une centrale de production de chaleur avec une part d'énergie géothermique de 54 à 58% en considérant une production de chaleur centralisée (usage en cascade, appoint et secours).
- A St-Blaise-Marin : le pré-dimensionnement de réseaux de distribution à basse enthalpie ~20-30°C avec une production de chaleur décentralisée selon le « modèle de St-Imier ».

Pour les deux secteurs (Neuchâtel et St-Blaise-Marin), des modèles de calcul ont été établis, permettant de calculer les paramètres-clés techniques et économiques de la production et de la distribution de chaleur en fonction des caractéristiques de la ressource. Les résultats (p.ex. prix de revient de la chaleur) ont ainsi pu être étendus aux nombreux scénarios d'exploitation possibles.

# 5.3 Modes d'exploitation de la chaleur géothermique

## 5.3.1 Critères de base

L'objectif doit être que le réseau de distribution, qu'il soit existant ou à construire, fournisse un maximum d'énergie géothermique. Il s'agit également de minimiser les pertes et que le recours sans doute indispensable à des pompes à chaleur garantisse des coefficients de performance les plus élevés possibles et donc des rendements énergétiques à même de justifier cette forme d'énergie.

L'utilisation de pompes à chaleur combinées à des couplages chaleur-force à gaz garantissant l'autosuffisance de l'approvisionnement en électricité nécessaire à la production de chaleur est apparue comme le mode de valorisation le mieux adapté aux conditions de débit/température attendues.

Les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire des bâtiments situés sur les secteurs de distribution potentiels investigués dans la présente étude nécessitent d'avoir une ressource géothermique à une température d'au moins 70°C pour réaliser un réseau de distribution utilisant la chaleur de la ressource directement sans machine thermique.

Considérant les températures attendues de la ressource géothermique, le recours à des machines thermiques, qu'elles soient centralisées sur site de forage ou décentralisées chez les consommateurs, est inévitable si l'on veut assurer l'ensemble des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.

## 5.3.2 Description des systèmes

Dans la pratique, la valorisation de la géothermie en ayant recours à des machines thermiques peut être réalisée selon deux systèmes principaux.

### RESEAU A BASSE ENTHALPIE

La chaleur est transportée jusqu'aux consommateurs à la température de la ressource géothermique (20-50°C) via un réseau de conduites enterrées. L'élévation de la température au niveau demandé par le consommateur pour le chauffage et l'eau chaude est ensuite réalisée par des machines thermiques (PAC) décentralisées en fonction des besoins thermiques de chaque immeuble. Cette forme de distribution de la chaleur géothermique sous forme de réseaux « froids » est peu répandue, malgré ses avantages en termes d'efficacité énergétique. On peut citer en exemple les projets de St-Imier (BE) et de St-Aubin (NE) fonctionnant sur ce principe.

### SYSTEME DE DISTRIBUTION A HAUTE TEMPERATURE

Le niveau thermique du fluide pompé est élevé dans une centrale de chauffe située idéalement à proximité du forage et composée d'un système de machines thermiques (PAC) et d'un système d'appoint et de secours (Central Chaleur-force (CCF) et chaudière) puis distribué via un réseau de conduites enterrées et isolées vers des consommateurs. La combinaison d'une pompe à chaleur électrique et d'un couplage chaleur-force est appelée PAC-Gaz.

En évaluant les avantages et les inconvénients de ces deux systèmes, on peut voir que la basse enthalpie a l'avantage d'une meilleure efficacité énergétique, ceci d'autant plus que la production d'électricité soit compensée, mais coûte plus cher en termes d'investissements. Donc la variante basse enthalpie est la plus pertinente au plan énergétique si l'on souhaite valoriser au maximum la ressource géothermique.

## SCENARIOS RETENUS ET ETUDIES

Compte tenu du nombre de paramètres et des deux sites aux caractéristiques différentes, il a été décidé de rechercher les conditions de mise en œuvre les plus réalistes possible et de calculer de manière détaillée la performance énergétique, les coûts d'investissements, et le prix de revient de la chaleur pour les scénarios suivants (Tableau III - 5).

*Tableau III - 5. Détail des scénarios.*

| **Scénario** | **Région** | **Aquifère considéré** |
|---|---|---|
| Intégration de la géothermie à un réseau de distribution de la chaleur existant (CUM – Chauffage Urbain Maladière) | Neuchâtel - Monruz | Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk |
| Réalisation d'une centrale géothermique de production de chaleur avec distribution haute température par un nouveau réseau de distribution de chaleur | St-Blaise - Marin | Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk |
| Réalisation d'une centrale géothermique avec réseau de distribution à basse enthalpie et pompes à chaleur décentralisées | St-Blaise - Marin | Malm<br>Dogger |

Ces scénarios ont été étudiés en prenant en compte les caractéristiques de température, de débit et de profondeur estimées lors de l'étude PDGN (Groupe de travail PDGN, 2010).

### *Valorisation pour la production d'eau potable*

En cas d'exploitation géothermique des eaux du Malm, dans une gamme de minéralisation faible à moyenne, il est raisonnable de penser que l'on pourra valoriser les eaux du Malm pour la production d'eau potable. Le principe prévu consiste à fournir de l'eau brute destinée à la consommation à partir de l'eau de rejet refroidie à 10 °C après son utilisation thermique.

La valorisation de l'eau géothermique captée dans le Malm comme eau destinée à l'eau potable (avant traitement de potabilisation) représente, au prix de 0.80 Frs/$m^3$, un revenu potentiel de 115'000.- à 230'000.- Frs/an pour des débits de 10 à 20 l/s. Ce revenu pourra être déduit des frais d'exploitation de l'installation géothermique.

### *Valorisation de la geothermie par le thermalisme*

On considère généralement qu'un débit de 200 l/min (3.3 l/s) à une température de 40°C permet d'assurer le fonctionnement d'une station thermale de petite dimension. Pour autant que la température de l'eau pompée soit supérieure à 35°C, la puissance dissipée pour une utilisation en direct de la chaleur géothermique utilise une puissance relativement faible, soit entre 100 et 200 kWth pour un centre thermal de petite taille (surface totale de bassin de 500-700 $m^2$), comparable aux bains de Bad-Schinznach (AG).

Pour autant que l'établissement soit correctement géré et, compte tenu de la situation géographique favorable du bord du lac neuchâtelois, il est probable que la réalisation d'un centre thermal (de loisir ou médical) puisse être rentable financièrement et que l'intégration du thermalisme apporte une valeur ajoutée en termes d'image et de rentabilité à l'installation de production de chaleur géothermique.

Dans ce sens, les sites de forage proposés à proximité du lac de Neuchâtel, et notamment le site du Nid-du-Crô sont idéalement situés pour tirer parti du thermalisme.

## 5.4 Possibilités de valorisation à Neuchâtel - Monruz

Les résultats des investigations sur les 3 scénarios retenus sont résumés dans le Tableau III - 6.

*Tableau III - 6. Scénarios retenus pour la zone Neuchâtel – Monruz avec intégration de la géothermie au réseau de distribution de la chaleur du Chauffage Urbain de la Maladière(CUM).*

| **Aquifère considéré** | **No scénario** | **Débit (l/s)** | **Température (°C)** | **Investissement (Mio CHF)** | **Prix revient de l'énergie (ct/kWh)** |
|---|---|---|---|---|---|
| Malm | N-Ma-2 | 15 | 21 | 4.9 | 18.5 (12.1*) |
| Dogger | N-D-2 | 10 | 37 | 8.4 | 16.0 |
| Muschelkalk | N-Mu-2 | 10 | 57 | 12.5 | 13.1 |

* En considérant la valorisation de l'eau pompée comme eau destinée à la consommation.

Pour mesurer la compétitivité de la chaleur géothermique délivrée, on peut la comparer au prix de vente de ~14 ct/kWh pratiqué sur le réseau CUM à Neuchâtel, fonctionnant principalement au gaz, et en tenant compte d'un prix du gaz de 7 ct/kWh (2011). On constate que dans l'ensemble, le prix de revient est proche, mais globalement légèrement inférieur au prix de vente du réseau CUM.

L'exploitation du Malm à 20°C (10 l/s et 15 l/s) est peu favorable (respectivement 25.6 ct/kWh et 20.3 ct/kWh), sauf en cas de revente d'eau potable.

L'exploitation du Dogger est compétitive à partir de 15 l/s (15.6 à 11.6 ct/kWh).

L'exploitation du Muschelkalk est généralement très compétitive (12 à 9.8 ct/kWh). Le surcoût lié aux forages est en partie absorbé par l'amélioration de la performance (frais énergétiques) de l'installation lors de l'exploitation de la chaleur géothermique à >50°C (échangeur en direct sur les retours à 50°C).

En termes de qualité de la ressource géothermique, les objectifs à atteindre sont un débit de 15 l/s ou une température de 40°C. En-dessous de ces valeurs la ressource reste exploitable, mais dans des conditions moins favorables (10 l/s, 20°C).

## 5.5 Possibilités de valorisation à St-Blaise - Marin

En raison de l'absence de réseau de distribution de chaleur existant, avec intégration possible de la géothermie, deux types d'installations ont été évalués :

- Réalisation de forages couplés à une centrale de production de chaleur et d'un réseau de distribution à haute température, à partir de l'exploitation des aquifères du Malm (SB-Ma-1), du Dogger (SB-D-1) et du Muschelkalk (SB-Mu-1).
- Réalisation de forages équipés, d'un réseau de distribution à basse enthalpie et d'installations de production de chaleur (PAC) décentralisées, à partir de l'exploitation des aquifères du Malm (SB-Ma-2), du Dogger (SB-D-2).

Les résultats des investigations sur les cinq scénarios retenus pour la zone de St-Blaise – Marin sont résumés dans les Tableau III - 7 etTableau III - 8.

Les conditions d'exploitation à St-Blaise-Marin sont globalement favorables, notamment pour la distribution à haute température. Les scénarios probables, sans considérer la revente d'eau de

consommation sont légèrement en-dessus du seuil de 14 cts/kWh, soit la compétitivité du prix de l'énergie en 2011. Plusieurs possibilités d'abaissement du prix de la chaleur sont envisageables.

*Tableau III - 7. Scénarios retenus pour la réalisation d'une centrale géothermique de production de chaleur avec distribution haute température par un nouveau réseau de distribution de chaleur dans la zone de St-Blaise – Marin.*

| Aquifère considéré | No scénario | Débit (l/s) | Température (°C) | Investissement (Mio CHF) | Prix revient de l'énergie (ct/kWh) |
|---|---|---|---|---|---|
| Malm | SB-Ma-1 | 15 | 29 | 10.7 | 15.7 (13.6*) |
| Dogger | SB-D-1 | 10 | 42 | 13.9 | 16.6 |
| Muschelkalk | SB-Mu-1 | 10 | 63 | 20.0 | 15.3 |

* En considérant la valorisation de l'eau pompée comme eau destinée à la consommation.

*Tableau III - 8. Scénarios retenus pour la réalisation d'une centrale géothermique avec réseau de distribution à basse enthalpie et pompes à chaleur décentralisées dans la zone de St-Blaise – Marin.*

| Aquifère considéré | No scénario | Débit (l/s) | Température (°C) | Investissement (Mio CHF) | Prix revient de l'énergie (ct/kWh) |
|---|---|---|---|---|---|
| Malm | SB-Ma-2 | 15 | 29 | 7.5 | 20.4 (16.5*) |
| Dogger | SB-D-2 | 10 | 42 | 11.9 | 23.4 |

* En considérant la valorisation de l'eau pompée comme eau destinée à la consommation.

La revente d'eau destinée à la consommation dans la région de St-Blaise – Marin serait possible à de gros consommateurs comme l'industrie EM Marin et le réseau de distribution d'eau de la CEN dans le cadre de son extension vers les communes de l'entre-deux-lacs.

Pour le réseau de haute température, on arrive à une baisse de prix de 2 à 4 cts/KWh et pour le réseau à basse enthalpie, le prix de revient de la chaleur peut être abaissé de 4 à 8 cts/kWh.

Le calcul des coûts effectués ne tient pas compte des diverses subventions et taxes de raccordement permettant d'abaisser les frais financiers et le prix de vente de la chaleur. Les montants des subventions et taxes de raccordement permettraient d'abaisser le prix de revient de la chaleur à 14 cts/kWh pour plusieurs scénarios d'exploitation probables.

Un autre moyen pour abaisser significativement le prix de revient de l'énergie produite par basse enthalpie consiste à produire l'électricité par une central chaleur-force (CCF) décentralisée, par exemple dans les sous-stations des grands consommateurs (PAC-GAZ) et/ou par l'implantation d'unités CCF de puissance équivalente dans d'autres réseaux de distribution de chaleur appartenant à l'exploitant (p.ex. Viteos SA).

En termes de coûts, le prix élevé de l'électricité considéré pour l'alimentation des PACs (23 cts/kWhe) a une grande influence sur le prix de revient de la chaleur. En assurant la production d'électricité par CCF, on pourra produire de l'électricité à ~15 cts/kWhe [8], et revendre la chaleur produite par le CCF. L'abaissement du prix de revient de la chaleur sera de l'ordre de 3 à 4 cts/kWh, et le prix de la basse enthalpie deviendra compétitif.

Finalement, les scénarios d'exploitation du Dogger et du Muschelkalk (≥40°C) peuvent permettre d'alimenter un centre thermal, et en principe d'augmenter la rentabilité financière de l'opération. La relative proximité du bord du lac constitue sans doute une opportunité de valorisation.

Le principal risque pour la rentabilité de l'opération est l'augmentation des coûts liés aux forages, par exemple en cas de réalisation d'un forage profond non exploitable. En faisant l'hypothèse pessimiste de devoir réaliser par exemple deux forages de prospection pour n'en exploiter qu'un seul, les prix doivent alors évidemment être revus à la hausse.

## 5.6 Remarques finales et conclusions

Dès les années 1970, les exploitants français des champs géothermiques du bassin de Paris qui disposaient d'eau géothermale entre 50 et 70 °C sur des sites très habités avaient compris que l'exploitation de la chaleur en cascade était une condition fondamentale à la mise en valeur de la chaleur géothermique : bâtiments équipés de radiateurs, planchers chauffants puis pompes à chaleur.

La nécessité d'obtenir des retours au forage à la plus basse température possible est sur le littoral neuchâtelois aussi une condition de succès, impliquant donc de recourir à un système de pompe à chaleur.

L'analyse devait démontrer à la fois la faisabilité technique d'installations de mise en valeur de la chaleur géothermique et valider leur efficacité économique. Dans ce contexte, l'un des points clés était de trancher entre deux options possibles, à savoir :

- Réseau de distribution à basse enthalpie (20 à 50 °C) avec élévation de la température de l'eau dans la chaufferie de chaque consommateur.
- Création d'une chaufferie centralisée avec pompes à chaleur et chaudière d'appoint délivrant de l'eau à 65°C et alimentant un réseau 65-50 °C en été et 80-45 °C en hiver.

Au plan de l'efficacité énergétique, l'étude démontre clairement que l'efficacité du réseau à basse enthalpie est la meilleure, c'est-à-dire que la part d'énergie géothermique valorisée est la plus élevée.

Au plan économique en revanche, en raison du prix des pompes à chaleur qui est inversement proportionnel à leur puissance, la création d'un réseau à haute température est plus favorable.

Au plan économique aussi, il faut relever que la présence ou non d'un réseau existant est déterminante pour le choix de l'option retenue. Le réseau CADBAR à Colombier ou celui du chauffage urbain de la Maladière (CUM) appellent un apport géothermique valorisé dans la centrale elle-même (haute température).

En revanche, lorsque le site est vierge de tout réseau, le souci de l'efficacité énergétique, qui doit être la règle, conduira à construire un réseau à basse température, pour autant que les eaux géothermiques atteignent moins de 35 à 40 °C. Le surcroît d'investissement pourrait alors être pris en charge par une taxe de raccordement, en fait une participation à la construction de la chaufferie décentralisée tenant compte du prix de la pompe à chaleur installée.

L'utilisation de l'eau géothermique à des fins de thermalisme est une façon de trouver une contribution financière aux coûts du forage.

Au plan économique et compte tenu du prix actuel des énergies conventionnelles (gaz, mazout), on doit admettre que la mise en valeur de la chaleur géothermique dont on pressent l'existence sous le territoire neuchâtelois exigera un appui financier extérieur, pour que la vente de la chaleur soit compétitive. Des taxes ($CO_2$) sont d'ailleurs prévues à cet effet.

Dans tous les cas, les moyens de calcul mis en place dans le cadre de la présente étude seront à même de permettre de trouver la solution optimum à chaque situation. La compétitivité économique de la géothermie étant proche et les espoirs de la population neuchâteloise dans cette énergie étant

élevés, il est important de démarrer quelques forages qui pourront être exploités en fonction de leur productivité.

Priorité devra être donnée à la probabilité de succès géologique. Le planificateur (l'ingénieur) saura alors chaque fois comment tirer le meilleur parti de la ressource disponible en fonction des possibilités de consommation sur place.

# 6. Projet d'une campagne sismique

## 6.1 Profils sismiques synthétiques prévisionnels

Dans la région de Neuchâtel – St Blaise, les deux sites d'intérêt se situent respectivement sur la faille de Fontaine-André, d'orientation pratiquement N-S traversant Neuchâtel au niveau de la zone de Monruz, ainsi que le système de failles de St-Blaise qui s'étend vers le NE par l'embranchement de deux systèmes distincts. Deux profils sismiques synthétiques d'orientation NO-SE, perpendiculaires aux directions de chevauchements, ainsi qu'un profil synthétique parallèle au bord du lac et perpendiculaire aux directions de failles principales ont été générés à partir du modèle géologique « Détail 1 » (Figure III - 40).

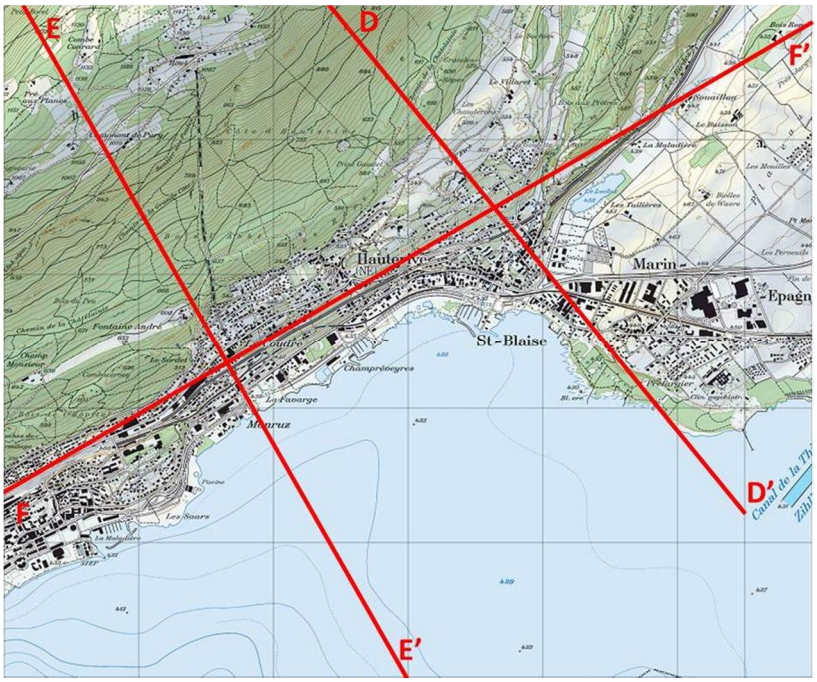



*Figure III - 40. Localisation des profils sismiques synthétiques sur la région de Neuchâtel – St Blaise. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

Moyennant les incertitudes structurales et de profondeur liées au modèle géologique, ces profils sismiques synthétiques permettent de mettre en évidence la géométrie des principales formations, les structures de chevauchement ainsi que les principales zones de failles présentes dans le modèle (Figure III - 41). Il est à noter que sur cette figure, l'échelle verticale des coupes au travers du modèle est donnée en profondeur alors que celle des profils sismiques synthétiques correspondants est en « temps double », ce qui explique le décalage vertical des différentes interfaces entre chaque coupe et son profil synthétique équivalent. Les profils sismiques réels qui seront obtenus suite à une campagne d'acquisition seront eux convertis en profondeur par le biais d'un modèle de vitesse, lui-même déterminé par l'analyse des résultats multitraces.

De par son faible rejet vertical, la faille de Fontaine-André est quant à elle plus difficilement identifiable sur le profil longitudinal FF'. Dans la réalité, cette dernière devrait néanmoins être mieux visible de par la bréchification (broyage de la roche dû au travail de la faille) qui affecte les abords directs de telles failles, donnant aux réflecteurs sismiques qui la borde un caractère localement plus chaotique.

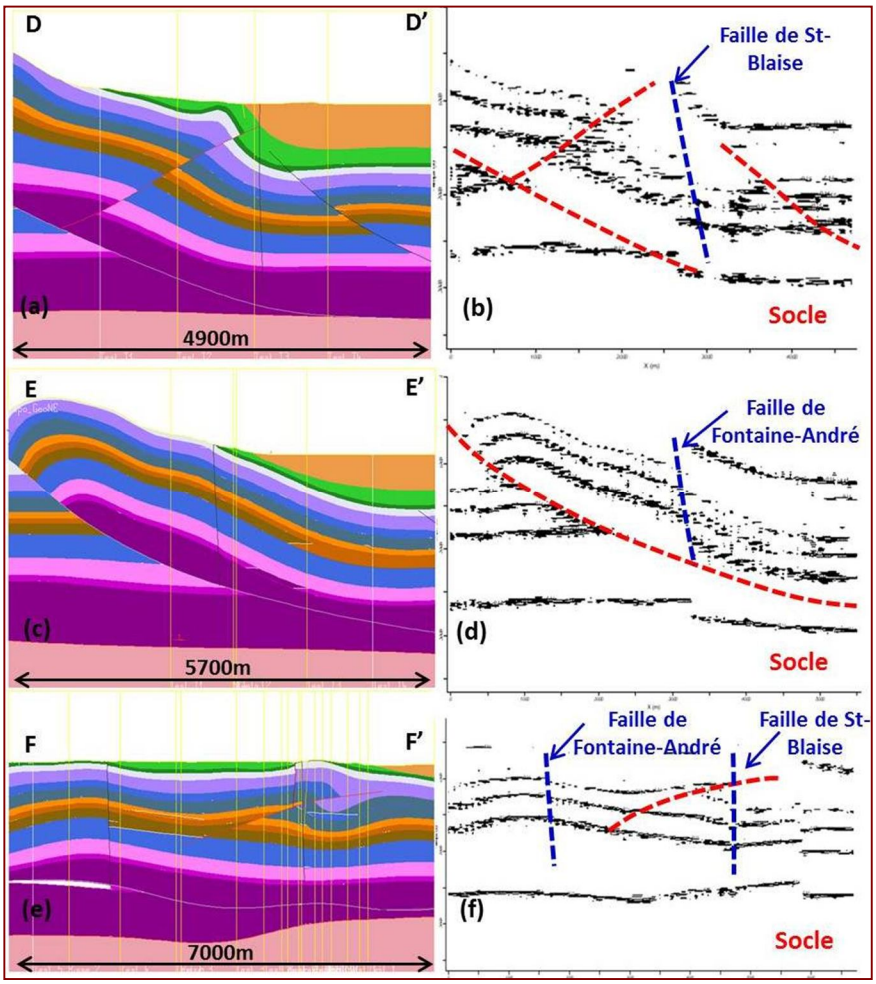



*Figure III - 41. Coupes et profils sismiques synthétiques correspondants sur la région Neuchâtel – St. Blaise issus du modèle géologique « Détail 1 » avec interprétation des principaux plans de chevauchement (en rouge) et des zones de faille principales (en bleu). (a) coupe DD' ; (b) profil sismique synthétique DD', (c) coupe EE' ; (d) profil sismique synthétique EE' ; (e) coupe FF' ; (f) profil sismique synthétique FF'. Se référer à la Figure III - 40 pour leur localisation et orientation. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 6.2 Planification d'une campagne d'acquisition de mesures sismiques

Sur la région de Neuchâtel – St. Blaise, les résultats des profils sismiques synthétiques montrent qu'il serait possible d'obtenir les informations recherchées par l'acquisition de mesures sismiques 2D. Ces informations en profondeur permettraient de combler certaines incertitudes quant à l'épaisseur, la profondeur et la géométrie des différentes formations géologiques et structures tectoniques (chevauchements et failles) qui forment et affectent le sous-sol. De plus, l'acquisition d'une série de lignes sismiques pourrait également révéler la présence de systèmes de failles profonds, jusque-là inconnus de par l'absence de leur manifestation en surface. Avec l'amélioration de la perméabilité qu'elles engendrent dans leurs abords immédiats (broyage de la roche), les failles ouvertes, qui dans la région sont présumées plus ou moins perpendiculaires aux plis qui forment le Jura, représentent des cibles potentielles pour l'exploitation de la géothermie profonde.

L'acquisition de lignes sismiques sur cette région pourrait également amener de précieuses informations au niveau du toit du socle cristallin et sur la présence potentielle de fossés d'origine

permo-carbonifères qui l'affectent en certains endroits. En effet, le socle cristallin est encore très mal connu en Suisse de par le nombre très limité de forages qui l'atteignent et la mauvaise qualité de sa réponse sismique sur la plupart des lignes existantes. Néanmoins, sa profondeur assurant des températures élevées, ainsi que la présence suggérée de zones d'altération dans sa partie superficielle et susceptibles d'offrir de bonnes perméabilités, font de cette formation une cible potentiellement intéressante en vue de son exploitation pour la géothermie profonde. Les sédiments anciens (datant du Carbonifère et du Permien) qui remplissent ces fossés sont également très peu connus mais pourraient présenter des propriétés d'aquifère intéressantes. Finalement, les failles de socle qui en théorie bordent ces fossés d'extension pourraient également faire l'objet de cibles potentielles.

Dans cette section, nous posons quelques bases et recommandations en vue de la planification d'une campagne d'acquisition sismique 2D sur la région de Neuchâtel – St. Blaise. Les coûts indiqués (Tableau III - 9) ne sont mentionnés qu'à titre informatif, visant à donner un ordre de grandeur du prix que coûterait une telle campagne, mais ne correspondent à aucune offre concrète. De même, les lignes proposées à ce stade de l'étude sont localisées à titre indicatif (Figure III - 42), sous réserve d'être modifiées suite aux conseils d'experts de manière à en simplifier l'acquisition et en augmenter la qualité.

De manière générale et pour des résultats optimaux, il est important que les profils sismiques soient le plus rectiligne et continus possible, moyennant une compatibilité avec les contraintes d'accès en surface (champs, forêts, zones urbanisées, fortes dénivellations, etc.) pour les camions vibreurs et le déploiement des lignes de géophones (flûte sismique). L'orientation des lignes doit également être choisie avec soin sur la base des connaissances géologiques locales, afin de recouper de manière optimale les structures géologiques visées. De plus, pour une meilleure interprétation, il est aussi recommandé que les différentes lignes sismiques se recoupent entre elles. Finalement, pour des raisons de géométrie du système d'acquisition, il est nécessaire d'étendre les lignes sismiques d'environ 1 km à chacune de leurs extrémités afin d'obtenir le meilleur signal possible sur la portion d'intérêt.

Sous réserve de modification de leur tracé suite à l'avis d'expert en acquisition sismique, deux lignes sismiques totalisant une distance d'environ 17 km sont proposées pour la région de Neuchâtel – St. Blaise (Figure III - 42):

- La ligne NE_01, orientée SO-NE parallèlement au lac, représente un peu plus de 11 km. Tout comme le profil synthétique FF' (Figure III – 40 et Figure III - 41), cette ligne vise à intercepter perpendiculairement les zones de failles de Fontaine-André et de St-Blaise, ce qui représente la meilleure géométrie d'acquisition pour mettre en évidence de tels objets géologiques. De par l'orientation des routes principales en ville de Neuchâtel, parallèle à la direction d'acquisition souhaitée, une géométrie bien rectiligne peut être facilement obtenue.
- La ligne NE_02 vise à intercepter la zone de faille de St-Blaise selon une orientation NO-SE ainsi qu'à mettre en évidence la géométrie et la profondeur des différents plans de chevauchements qui affectent le sous-sol profond, à l'image du profil synthétique DD' (Figure III – 40 et Figure III - 41). Contrairement à la ligne NE_01, cette ligne de 6 km risque de poser de plus grandes difficultés pour son acquisition. Il semble en effet difficile de conférer à la ligne NE_02 une géométrie rectiligne adéquate en raison des restrictions d'accès liées au manque de route et chemins orientés NO-SE, notamment sur les pentes de la montagne de Chaumont.

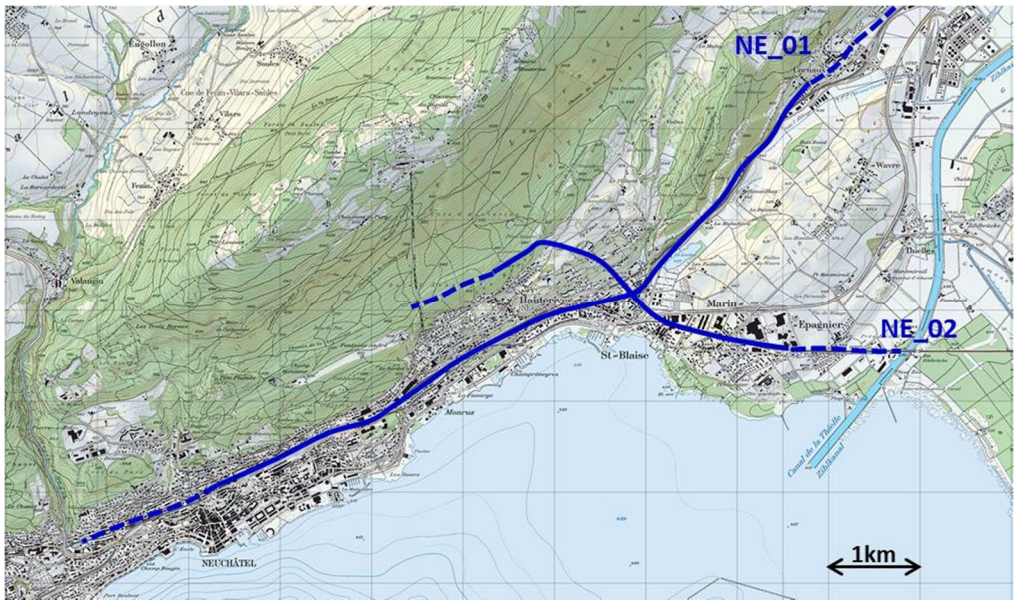



*Figure III - 42. Localisation des lignes sismiques suggérées pour la région de Neuchâtel et St-Blaise. Le trait plein représente la portion des lignes sur laquelle le signal sera optimal. Pour obtenir cette couverture maximale sur la zone d'intérêt, il est nécessaire d'étendre l'acquisition sur environ 1 km à chaque extrémité des lignes (traits discontinus). Au total : NE_01 = 11.3 km et NE_02 = 6 km. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

Une telle campagne d'acquisition nécessiterait le déploiement de trois camions vibreurs (cf. Chapitre II, Figure II - 23) ainsi que des flûtes sismiques de 300 à 600 canaux. Avec un intertrace (distance entre chaque point de tir ou chaque géophone) suggéré à 20 mètres et une moyenne de 200 tirs par jour, il est envisageable de couvrir environ 4 km de ligne par jour, ce qui représente 5 jours d'acquisition. A cela s'ajoute une journée de tests en début de mission visant à calibrer le matériel ainsi qu'à ajuster les différents paramètres d'acquisition. Ainsi, pour les 17 km de ligne proposés pour cette région, la phase d'acquisition durant laquelle le matériel lourd est mobilisé totaliserait une mission d'une durée de 6 jours.

Sur la base des chiffres articulés dans le Tableau III - 9, les phases d'acheminement du matériel sur site, d'acquisition et de traitement des données pour une telle campagne représenteraient un coût d'un ordre de grandeur compris entre 250'000 et 380'000 CHF. A ceci s'ajouteraient les coûts associés d'une part aux phases préliminaires de planification de la campagne et des démarches de permittage et d'autre part aux coûts éventuels de « standby » (immobilisation de l'équipe et du matériel sur site en cas de météo trop mauvaise).

Comme le montre le Tableau III - 9, l'acheminement du matériel sur site représente une part non-négligeable du coût total d'une telle opération. Il serait donc fortement recommandé d'acquérir toutes les lignes nécessaires sur une même région en une seule campagne d'acquisition, y compris les lignes suggérées dans la région de La Chaux-de-Fonds – Crêt du Locle, discutées dans le chapitre IV.

*Tableau III - 9. Enumération non exhaustive des principales étapes d'une campagne d'acquisition sismique 2D avec leurs prix approximatifs par unité, puis calculés pour la campagne d'acquisition proposée pour la région de Neuchâtel – St. Blaise.*

| **Opérations** | **Coût approximatif (CHF)** | **Coût approximatif pour la région Neuchâtel - St. Blaise (17 km ; 6 jours de mission) (CHF)** |
|---|---|---|
| Permittage | ~ 1'000.- / jour | ---<br>(nb de jours nécessaires inconnu) |
| Acheminement du matériel sur site | ~ 100'000.- | ~ 100'000.- |
| Acquisition sismique 2D | ~ 5'000 – 10'000.- / km | ~ 85'000 – 170'000.- |
| Test de début de mission<br>(1 journée) | ~ 30'000.- | ~ 30'000.- |
| Contrôle de qualité en temps réel | ~ 1'000.- / jour | ~ 6'000.- |
| Traitement des données | ~ 500 – 1'000.- / km | ~ 8'500 – 17'000.- |
| Correction de la zone altérée de surface par analyse de la réfraction | ~ 1'000 – 1'500 / base<br>(1 base tous les 500 à 1000m) | ~ 19'000 – 55'500.- |
| « Standby »<br>(Immobilisation de l'équipe et du matériel en cas de trop mauvais temps) | ~ 3'000.- / heure<br>(1/10 du coût du test de début de mission) | --- |

# 7. Conclusions et recommandations

## 7.1 Comparaison des zones de Monruz et St Blaise

Pour la région de Neuchâtel – St Blaise, deux zones ont été étudiées, la zone de Neuchâtel (Figure III - 12) et la Zone de St-Blaise (Figure III - 19). Pour chacune des zones, cette étude a mis en évidence l'existence de failles associées à l'existence de fracturation de la roche (Neuchâtel en Figure III - 11 ; St-Blaise en Figure III - 20). Cette fracturation de la roche a été mise en évidence par une baisse relative de la gravité terrestre et est considérée ici comme étant liée à une diminution relative de la densité des roches. Cette diminution relative de densité est un indicateur, qui laisse à supposer que dans ces zones de fracturation, la perméabilité de la roche devrait être relativement plus importante que dans les zones non fracturées.

Les modèles géologiques de détail montrent que le nombre de failles est plus important dans la zone de St-Blaise (Faille de St-Blaise, Figure III - 12), que dans celle de Neuchâtel (faille de Fontaine-André, Figure III - 12). Cela est confirmé par l'interprétation gravimétrique, qui montre des anomalies plus importantes autour de la faille de St-Blaise (Figure III - 10) que dans la faille de Fontaine-André (Figure III - 8).

L'étude du potentiel thermique des aquifères profonds a mis en évidence que la diffusion thermique était contrôlée par la géométrie des formations géologiques, ainsi que par la présence de karst dans l'aquifère du Malm (Tableau III - 4). La présence de karst a un effet non négligeable sur les températures estimées de chacun des aquifères profonds, pour chacune des zones de Neuchâtel et de St-Blaise. Toutefois, cette étude permet de mettre en évidence, que d'un point de vue géologique, même dans le cas d'une karstification du Malm, les températures des aquifères profonds sont toujours plus élevées dans la zone de St-Blaise.

Présentée dans cette étude, l'analyse de la qualité du modèle géologique 3D de détail par la gravimétrie a montré que ce modèle géologique de la région de Neuchâtel – St-Blaise est validé pour :

- la géométrie des grandes structures, tel que les grands anticlinaux ;
- la répartition et les limites des différents chevauchements ;
- la géométrie relative des couches en profondeur.

En revanche, des incohérences demeurent sur :

- la profondeur exacte des différentes formations, qui ne peuvent pas être confirmée pour les aquifères profonds ;

Ces lacunes dans le modèle géologique 3D sont dues au manque d'information géologique sur les orientations et les épaisseurs des structures géologiques. Les informations concernant les effets du karst sur la température des eaux et du débit de l'aquifère restent à déterminer lors des forages.

Ce modèle géologique 3D représente une base indispensable dans l'étude du potentiel géothermique. Toutefois des variations existent entre le modèle et la réalité et ces incertitudes sur la profondeur exacte de chaque aquifère devrait être levées par la réalisation de deux profils sismiques 2D dans la région Neuchâtel – St-Blaise. Ces profils permettront d'apporter les informations complémentaires à cette étude, qui sont nécessaires avant la réalisation de forage.

D'un point de vue de la valorisation de la chaleur, les deux zones présentent des conditions d'exploitation favorable de la chaleur géothermique pour les aquifères du Dogger et du Muschelkalk

(Neuchâtel en Tableau III - 6 ; St-Blaise en Tableau III - 7etTableau III - 8). Toutefois, le coût d'installation pour la zone de St-Blaise sera légèrement plus important que pour Neuchâtel, en raison de l'absence d'un réseau de chaleur existant. En revanche, l'existence de gros consommateurs potentiels (industries et zone commerciale de Marin) rendent le site de St-Blaise plus attrayant.

Dans l'état actuel des connaissances la zone de St-Blaise est plus favorable au développement de la géothermie que la zone de Neuchâtel – Monruz, en raison de la présence de structures géologiques favorables (système de failles), d'un potentiel thermique plus important (aquifères plus profonds), et de l'existence d'un potentiel de consommateurs de chaleur plus grand.

## 7.2 Sélection d'un site de forage

Basé sur les résultats de cette étude, un site de forage dans la zone de St-Blaise a été sélectionné et est montré sur la Figure III - 43, qui regroupe la structure géologique d'un log synthétique de forage, ainsi que la profondeur attendue des chacun des aquifères. Ce log synthétique de forage est présenté pour aider à planifier le futur forage et pour connaître à quelles profondeurs théoriques se situent chacune des formations géologiques présentées dans le modèle.

## 7.3 Recommandations

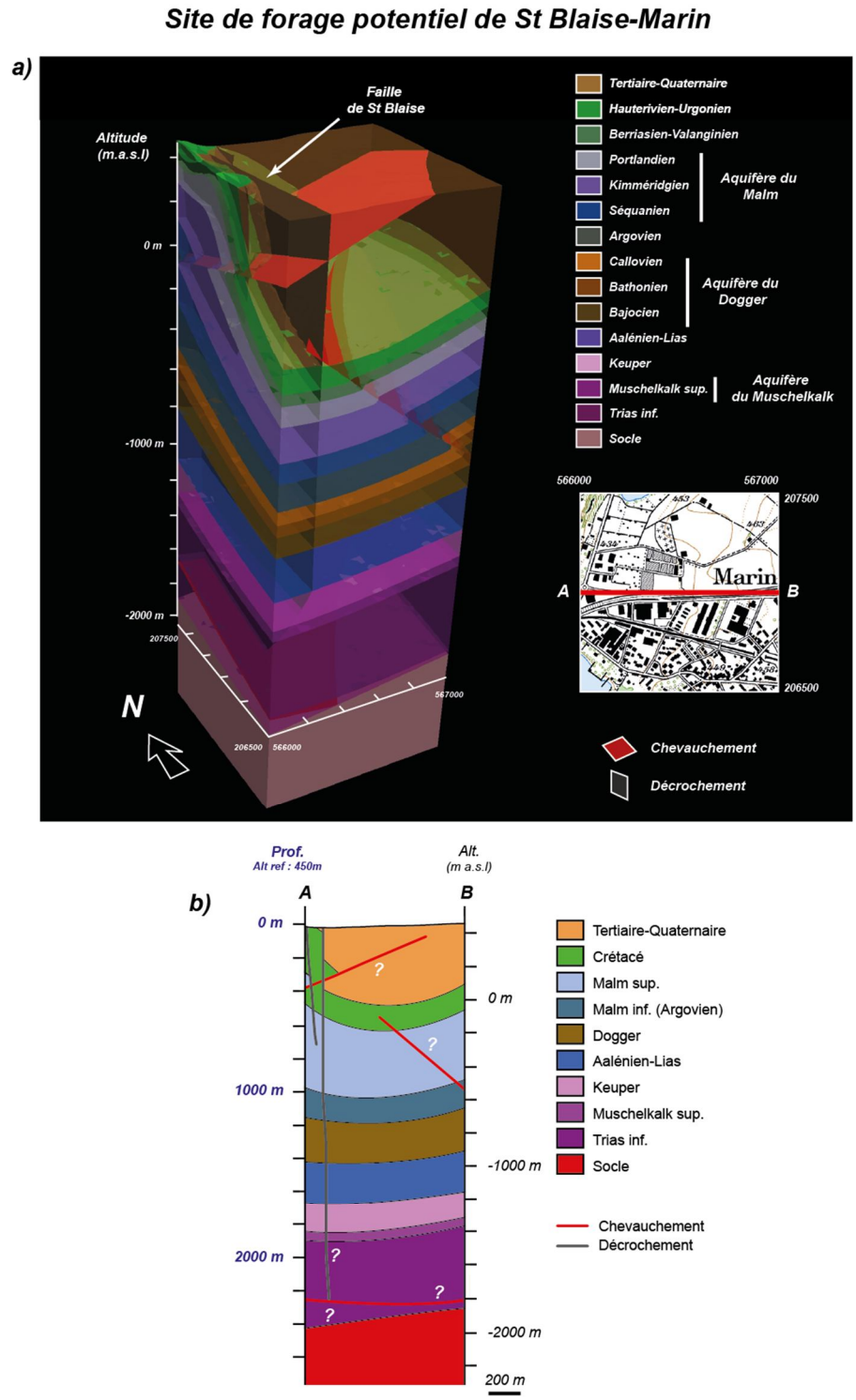
Comme il a été présenté dans cette étude, les avancées dans la connaissance des structures géologiques 3D ont permis d'estimer le potentiel géothermique en calculant la température et la profondeur des trois aquifères potentiels (Tableau III - 4), ainsi que de sélectionner un site de forage (Figure III - 43). De plus cette étude a permis de chiffrer des investissements nécessaires pour la valorisation de la chaleur ainsi que le coût de revient de l'énergie (Tableau III - 7 et Tableau III - 8).

Toutefois, des incertitudes restent sur le débit réels des aquifères, ainsi sur la température et la profondeur précise des aquifères profonds.

C'est pourquoi, basée sur les résultats du projet GeoNE, l'étude du potentiel géothermique de la zone de St-Blaise devrait être complétée par un ou deux profils sismiques (Figure III - 42), ainsi que par la réalisation d'un premier forage d'exploration de petit diamètre de type slimhole.

Tout d'abord, une campagne sismique doit être réalisée pour affiner la profondeur et l'épaisseur des aquifères, ainsi que la largeur et la profondeur du système de failles de St Blaise. Ensuite, un forage devra être exécuté et complété par des diagraphies et des tests de production qui permettront de définir les propriétés physiques, hydrauliques et chimiques des aquifères.

Le choix de la parcelle pour l'établissement du chantier de forage sera décidé sur la base des résultats de la campagne de sismique réflexion et sur les évaluations des conditions d'accès, d'environnement, de protection des eaux souterraines et d'habitat.




| *Aquifères potentiels* | *Profondeur (Toit)* | *Incertitude* |
|---|---|---|
| ***Malm sup.*** | 400-700 m | ±50 m |
| ***Dogger*** | 1000-1200 m | ±100 m |
| ***Muschelkalk sup.*** | 1800-1900 m | ±200 m |

*Figure III - 43. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de St Blaise-Marin (b) Colonne synthétique de forage (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure III - 13.*

## 7.4 Références bibliographiques

Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA, 2011. Scénarios possibles à mettre en oeuvre pour valoriser l'eau de forages géothermiques sur le littoral neuchâtelois, en particulier dans les régions de Neuchâtel et de St-Blaise-Marin. Rapport T-1584.00.

Groupe de travail PDGN, 2010. Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel (PDGN). Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, CREGE 08-10/01, Neuchâtel.

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.

Kiraly L., 1966. Remarques sur la tectonique de la région de Saint Blaise (Neuchâtel) Bulletin de La Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, 89 : 121-128.

Kiraly L. & Meia J., 1967. Observations tectoniques dans une carrière de Chaumont (Jura neuchâtelois, Suisse). Bulletin de La Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles : 90, 277-282.

Hinkle M.E., 1994. Environmental conditions affecting concentrations of He, $CO_2$, $O_2$ and $N_2$ in soil gases. Applied Geochemistry 9, 53—63.

Klussman R.W., 1993, Soil Gas and Related Methods for Natural Resource Exploration, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 483 pp.

Medici F. & Rybach, L., 1995. Geothermal map of Switzerland 1995. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse. Géophysique N°30, 27 pp.

Schaer J.P., 1955. Etude tectonique de l'anticlinal de Chaumont, Jura Neuchâtelois (Suisse). Neuchâtel, Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, 79 : 55-70.

Schardt H., 1900. Un décrochement sur le flanc du Jura entre Fontaine André et Monruz. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, 28 : 185-205.

Sommaruga A, 1997. Geology of the central Jura and the molasse basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. Mémoire de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, tome XII, 176 pp.

Suter H., 1920. Geologische Untersuchungen in der Umgebung von Les Convers - Vue des Alpes (Canton de Neuchâtel), Inaugural-Dissertation, Université de Zurich, 45 pp.

Suter H. & Lüthi E., 1969. Atlas géologique de la Suisse 1 :25000, Feuille 1144 Val de Ruz. Notice. Commission géologique Suisse.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

# Rapport final de la Phase 1

## Chapitre IV.
## Résultats de la prospection géothermique de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

**CHAPITRE IV. RESULTATS DE LA PROSPECTION GEOTHERMIQUE DE LA REGION LE LOCLE - LA CHAUX-DE-FONDS 123**

**1. INTRODUCTION ..... 123**

**2. MODELISATION GEOLOGIQUE 3D ..... 124**

2.1 INTRODUCTION ..... 124

2.2 MODELE GENERAL DE LA REGION LE LOCLE – LA CHAUX DE FONDS ..... 124

2.3 MODELE DETAILLE DE LA REGION LE LOCLE – LA CHAUX DE FONDS ..... 126

2.4 VALIDATION DU MODELE GEOLOGIQUE PAR LA GRAVIMETRIE ..... 128

**3. MODELISATION DES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ET ANALYSE DES ZONES DE FRACTURATION ..... 146**

3.1 MODELISATION DANS LES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ..... 146

3.2 MODELE POUR LA ZONE LA CHAUX-DE- FONDS ..... 147

3.3 MODELE POUR LA ZONE CRET-DU-LOCLE ..... 147

3.4 ETUDE DE SITES DE FORAGE POTENTIELS ..... 148

**4. POTENTIEL GEOTHERMIQUE ..... 152**

4.1 MODELE THERMIQUE REGIONAL ..... 152

4.2 MODÈLES THERMIQUES DE DÉTAIL ..... 156

**5. POTENTIEL D'UTILISATION DE LA CHALEUR ..... 159**

5.1 INTRODUCTION ..... 159

5.2 ETUDE DES SYSTEMES HYBRIDES POUR VALORISER LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE A LA CHAUX-DE-FONDS ..... 160

5.3 SYNTHESE DES RESULTATS ..... 163

**6. PROJET D'UNE CAMPAGNE SISMIQUE ..... 165**

6.1 PROFILS SISMIQUES SYNTHETIQUES PREVISIONNELS ..... 165

6.2 PLANIFICATION D'UNE CAMPAGNE D'ACQUISITION DE MESURES SISMIQUES ..... 167

**7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS ..... 171**

7.1 COMPARAISON DES ZONES DE LA CHAUX-DE-FONDS EST ET CRET-DU-LOCLE ..... 171

7.2 SELECTION D'UN SITE DE FORAGE ..... 172

7.3 RECOMMANDATIONS ..... 174

7.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 174

## LISTE DES FIGURES

Figure IV - 1. Carte tectonique de la zone d'étude avec localisation des modèles 3D et des coupes utilisées (modifiée d'après Groupe de travail PGN, 2008). ....124
Figure IV - 2. Extrait du Modèle 2 montrant la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km). ....125
Figure IV - 3. Extrait du Modèle 2 montrant la géométrie de la base des différentes formations géologiques ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km). ....126
Figure IV - 4. Comparaison des formations prises en comptes dans les modèles généraux et de détail. ....127
Figure IV - 5. Extrait du modèle Détail 2 montrant la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km). ....127
Figure IV - 6.Carte gravimétrique de la 1ère résiduelle de la région de Le Locle – La Chaux-de-Fonds pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée est présentée dans le Chapitre II. ....128
Figure IV - 7. Carte gravimétrique de la 2$^{ème}$ résiduelle de la région de Le Locle – La Chaux-de-Fonds pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée est présentée dans le Chapitre II. ....129
Figure IV - 8. Carte gravimétrique résiduelle de La Chaux-de-Fonds, extrait de la carte régionale de la 2$^{ème}$ résiduelle (Figure IV - 7). Deux tendances régionales ont été enlevées. Voir texte pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....130
Figure IV - 9. Carte gravimétrique résiduelle du Crêt-du-Locle, extrait de la carte régionale de la 2$^{ème}$ résiduelle (Figure IV - 7). Deux tendances régionales ont été enlevées. Voir texte pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). ....131
Figure IV - 10. Carte gravimétrique de la zone de La Chaux-de-Fonds calculée à partir du modèle géologique (Modèle 1, Figure IV - 5) et des paramètres de densité présentés dans le Tableau IV - 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir Chapitre II. ....133
Figure IV - 11. Carte gravimétrique de la zone du Crêt-du-Locle calculée à partir du modèle géologique (Modèle 1, Figure IV - 5) et des paramètres de densité présentés dans le Tableau IV - 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir Chapitre II. ....134
Figure IV - 12. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure IV - 11) par la carte gravimétrique de la 2$^{ème}$ résiduelle de la région de La Chaux-de-Fonds (Figure IV - 8). Voir texte pour détails. ....135

Figure IV - 13. Comparaison du profil gravimétrique A-B sur la zone de la Chaux-de-Fonds (Figure IV - 12). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4. .....136

Figure IV - 14. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone de la Chaux-de-Fonds (Figure IV - 12). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4. .....137

Figure IV - 15. Comparaison du profil gravimétrique E-F sur la zone de la Chaux-de-Fonds (Figure IV - 12). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4. .....138

Figure IV - 16. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure IV - 11) par la carte gravimétrique résiduelle de zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 9). Voir texte pour détails.....139

Figure IV - 17. Comparaison du profil gravimétrique A-B sur la zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 16). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4. .....140

Figure IV - 18. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 16). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4. .....142

Figure IV - 19. Comparaison du profil gravimétrique E-F sur la zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 16). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4. .....143

Figure IV - 20. Localisation des modèles détaillés pour les zones de forage potentielles Crêt-du-Locle et La Chaux-de-Fonds. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).....146

Figure IV - 21. Extrait du modèle Détail 2 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone La Chaux-de-Fonds. Localisation sur la Figure IV - 20. .....147

Figure IV - 22. Extraits du modèle Détail 2 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone Crêt-du-Locle. Localisation sur la Figure IV - 20. ....148

Figure IV - 23. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de La Chaux-de-Fonds Est. (b) Colonne synthétique de forage. (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation sur la Figure IV - 20. ....149
Figure IV - 24. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel du Crêt-du-Locle. (b) Colonne synthétique de forage (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure IV - 20. ....151
Figure IV - 25. Modèle 3D régional Le Locle- La Chaux-de-Fonds, vue du sud-est. Système de coordonnées CH1903. ....152
Figure IV - 26. Température à la surface définie pour le modèle régional Le Locle - La Chaux de Fonds ....153
Figure IV - 27. Résultats de la calibration du modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds ....153
Figure IV - 28. Vue en 3D de la température calculée dans le modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds. ....154
Figure IV - 29. Température calculée au toit du Malm (modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds) ....155
Figure IV - 30. Température calculée au toit du Dogger (modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds) ....155
Figure IV - 31. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds) ....156
Figure IV - 32. Température calculée au toit du Dogger (modèle détaillé Le Locle - La Chaux-de-Fonds). Les lignes rouges indiquent la bordure de l'aquifère modélisé et les zones noires cachent les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Dogger. ....158
Figure IV - 33. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle détaillé Le Locle - La Chaux-de-Fonds). Les lignes rouges indiquent la bordure de l'aquifère modélisé et les zones noires cachent les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Dogger. ....158
Figure IV - 34. Cadre général de la méthodologie (Gerber & Maréchal, 2011) ....159
Figure IV - 35. Schéma du scénario utilisant les PACs pour transmettre la chaleur du forage géothermique au réseau de CAD (Gerber & Maréchal, 2011) ....160
Figure IV - 36. Schéma du scénario où l'UIOM ou la chaudière à bois, via le réseau CAD, ainsi que le forage géothermique, fournissent de la chaleur à un cycle organique de Rankine pour la production d'électricité (Gerber & Maréchal, 2011) ....161
Figure IV - 37. Schéma du scénario où le forage géothermique fournit directement de la chaleur à un nouveau réseau de CAD basse température pour les quartiers Minergie (Gerber & Maréchal, 2011) ....161

Figure IV - 38. Comparaison des coûts d'investissement avec le profit annuel. Zone 1 : Investissements les plus faibles pour le Dogger ; Zone 2 : Investissements moyens pour le Dogger; Zone 3 : Investissements les plus élevés pour le Muschelkalk (Gerber & Maréchal, 2011).....163
Figure IV - 39. Localisation des profils sismiques synthétiques sur la région de La Chaux-de-Fonds..165
Figure IV - 40. Coupes et profils sismiques synthétiques correspondants sur la région de La Chaux-de-Fonds issus du modèle géologique « Détail 2 » avec interprétation des principaux plans de chevauchement (en rouge). (a) coupe AA' ; (b) profil sismique synthétique AA', (c) coupe BB' ; (d) profil sismique synthétique BB' ; (e) coupe CC' ; (f) profil sismique synthétique CC'. Se référer à la Figure IV - 39 pour leur localisation et orientation.....166
Figure IV - 41. Localisation des lignes sismiques suggérées pour la région de La Chaux-de-Fonds – le Crêt-du-Locle. Le trait plein représente la portion des lignes sur laquelle le signal sera optimal. Pour obtenir cette couverture maximale sur la zone d'intérêt, il est nécessaire d'étendre l'acquisition sur environ 1 km à chaque extrémité des lignes (traits discontinus). Au total : CDF_01 = 10 km, CDF_02 = 4.5 km et CDF_03 = 5 km. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....168
Figure IV - 42. (a) Modèle géologique 3D. (b) Colonne synthétique de forage. (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation sur la Figure IV - 20.....173

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV - 1. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). Les valeurs utilisées pour les densités de chaque formation correspondent au modèle présenté en Figure 5. *Mesurées dans le projet IGS-NE. # Valeurs de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. +Basées sur la littérature. ‡Utilisées dans le modèle normal permettant de reproduire au mieux les anomalies gravimétriques mesurées. .....132

Tableau IV - 2. Paramètres utilisés pour les modèles thermiques détaillés de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds. .....157

Tableau IV - 3. Bilan des températures estimées pour les sites de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds. .....157

Tableau IV - 4. Enumération non exhaustive des principales étapes d'une campagne d'acquisition sismique 2D avec leurs prix approximatifs par unité, puis calculés pour la campagne d'acquisition proposée pour la région de La Chaux-de-Fonds – Le Crêt-du-Locle. .....169

# Chapitre IV. **Résultats de la prospection géothermique de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds**

## 1. Introduction

La région Le Locle - La Chaux-de-Fonds est caractérisée par une succession de plis sur rampe recoupés par divers accidents décrochants. L'accident tectonique majeur est le décrochement de la Ferrière qui s'étend sur plusieurs kilomètres avec une orientation NNE-SSW. La zone d'étude s'étend du Val de Ruz à la vallée du Doubs afin de mieux prendre en compte la structure régionale. Les zones et sites de forage potentiels sont quant à eux situés à l'est de La Chaux-de-Fonds et au Crêt-du-Locle.

Différentes études ont été réalisées pour la région Le Locle – La Chaux-de-Fonds

- Modélisation de la structure géologique en 3D (§2)
- Validation des modèles géologiques et analyse des zones de fracturation par la gravimétrie (§2.4)
- Estimation du potentiel géothermique (§4)
- Étude du potentiel d'utilisation de la chaleur (§5)
- Projet de campagne sismique (§6)

La synthèse de l'ensemble de ces études permet de proposer un projet de forage sur le site réunissant les conditions les plus favorables à une exploitation géothermique.

# 2. Modélisation géologique 3D

## 2.1 Introduction

Différents modèles géologiques 3D ont été réalisés avec le logiciel 3D GeoModeller (BRGM, Intrepid geophysics) (Figure IV - 1) :

- Un modèle pour le nord du canton entre Le Locle et La Chaux-de-Fonds (Modèle 2)
- Un modèle détaillé dans la zone de La Chaux-de-Fonds (Détail 2)
- Un modèle autour des zones de forage potentielle à La Chaux-de-Fonds et au Crêt-du- Locle
- Deux logs de forage synthétiques pour les sites de La Chaux-de-Fonds Est et du Crêt-du-Locle

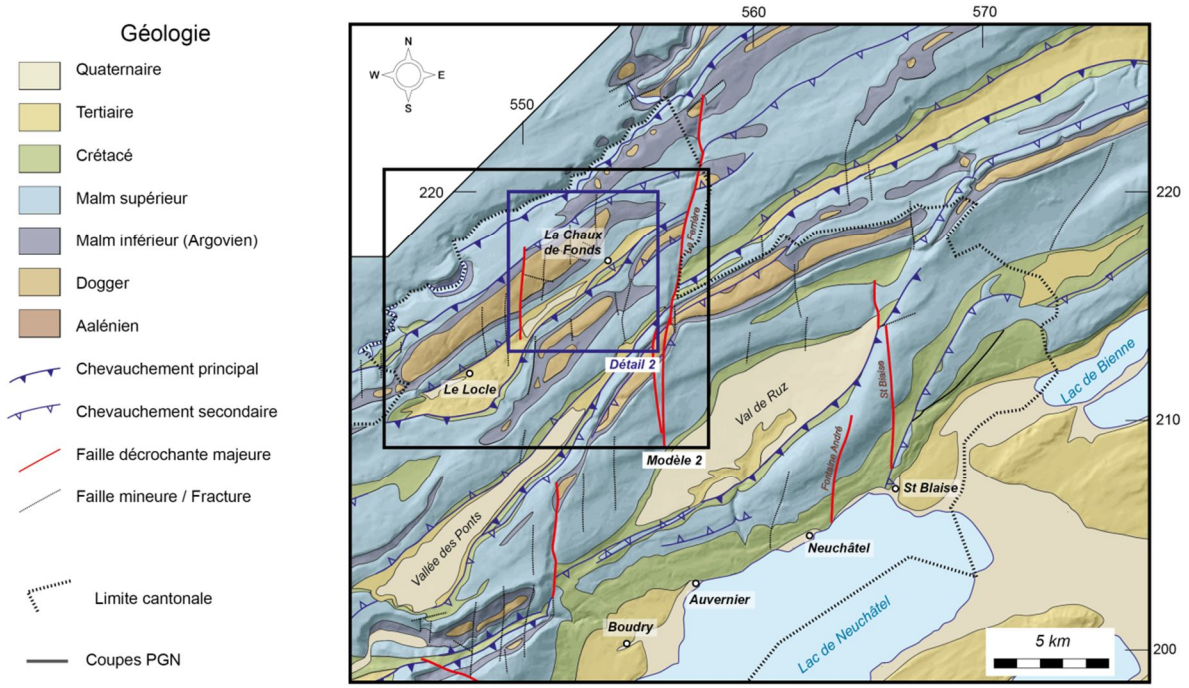



*Figure IV - 1. Carte tectonique de la zone d'étude avec localisation des modèles 3D et des coupes utilisées (modifiée d'après Groupe de travail PGN, 2008).*

## 2.2 Modèle général de la région Le Locle – La Chaux de Fonds

Le modèle 2 couvre une zone 14 x 12 km autour du Locle et de la Chaux de Fonds, de la surface jusqu'à une profondeur de 3 km. Il a été réalisé à partir du modèle numérique de terrain à 25 m (MNT25) (MNT,25V-Swisstopo 2011) et des cartes géologiques au 1/25'000 couvrant cette région (Le Locle-la Chaux de Fonds, Biaufond-Les Bois-La Ferrière-St Imier et Val de Ruz) ainsi que de la carte au 1/50'000 de Morteau. La structure géologique en profondeur de cette zone a été modélisée à partir des coupes réalisées à l'échelle du canton dans le cadre de l'étude PGN (Groupe de travail PGN, 2008), les travaux de de Sommaruga (1997), ainsi que les coupes réalisées dans le cadre du projet Transrun (Burkhard, 2002 et Meia, 2004). La structure géologique en surface est contrainte par les

coupes de Favre (1911), Suter (1920), Suter et Lüthi (1969) et la coupe du tunnel des Loges et du Mont Sagne (Dessor et Gressly, 1859).

Les formations géologiques ont été regroupées en fonction de leurs caractéristiques hydrogéologiques afin d'obtenir la géométrie des trois aquifères potentiels pour une exploitation géothermique : le Malm, le Dogger et le Muschelkalk supérieur. L'ensemble des structures tectoniques a été intégré au modèle afin de mettre en évidence les zones de fracturation préférentielles favorables à une circulation de fluide. La Figure IV - 2 montre un aperçu du Modèle 2, avec la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk et leur relations géométriques avec les structures tectoniques. La Figure IV - 3 montre la géométrie de l'ensemble des formations pour le Modèle 2.

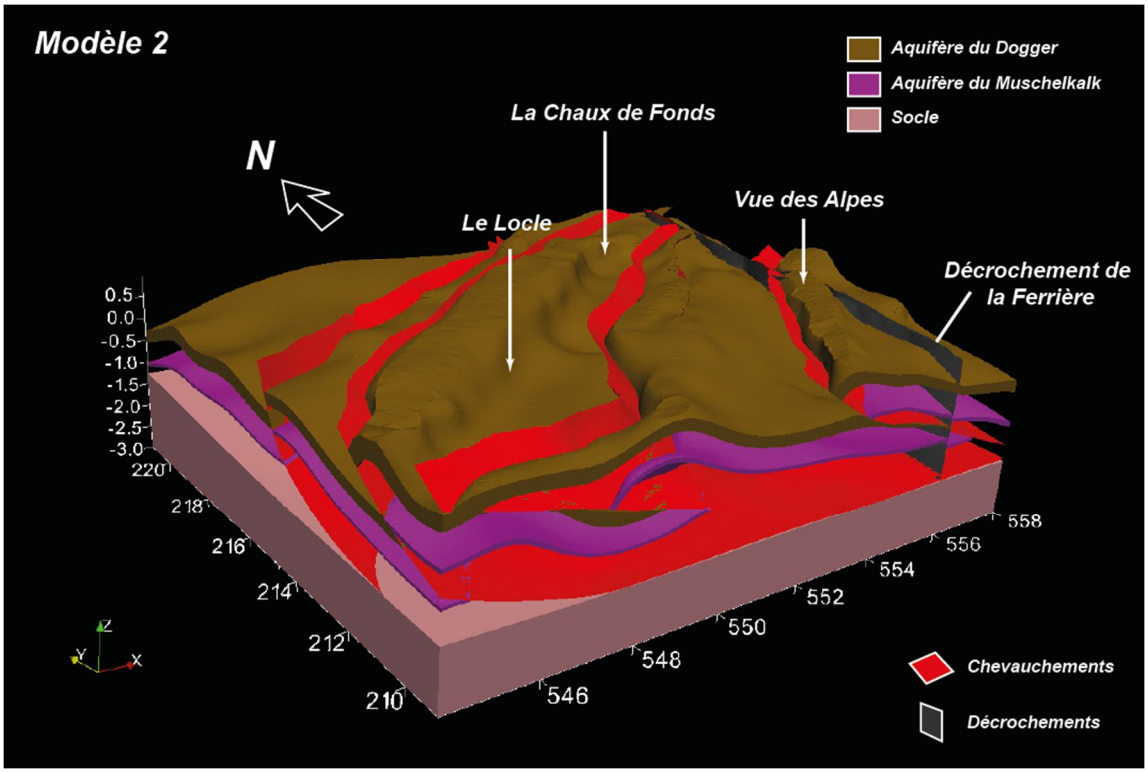



*Figure IV - 2. Extrait du Modèle 2 montrant la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km).*

Le Modèle 2 reproduit bien la géométrie de la succession de plis sur rampe. La précision de la géométrie du réseau de failles et ses relations avec les aquifères reste cependant faible, du fait de l'absence de données permettant de contraindre la structure en profondeur, notamment des données sismiques (cf. §6). L'interface socle-couverture n'a pas été modélisée en détail, et a été considérée comme une surface plane, également faute de données disponibles. Les surfaces calculées pour l'ensemble des formations géologiques (Figure IV - 3) ont servi au calcul du modèle thermique (cf. §4)

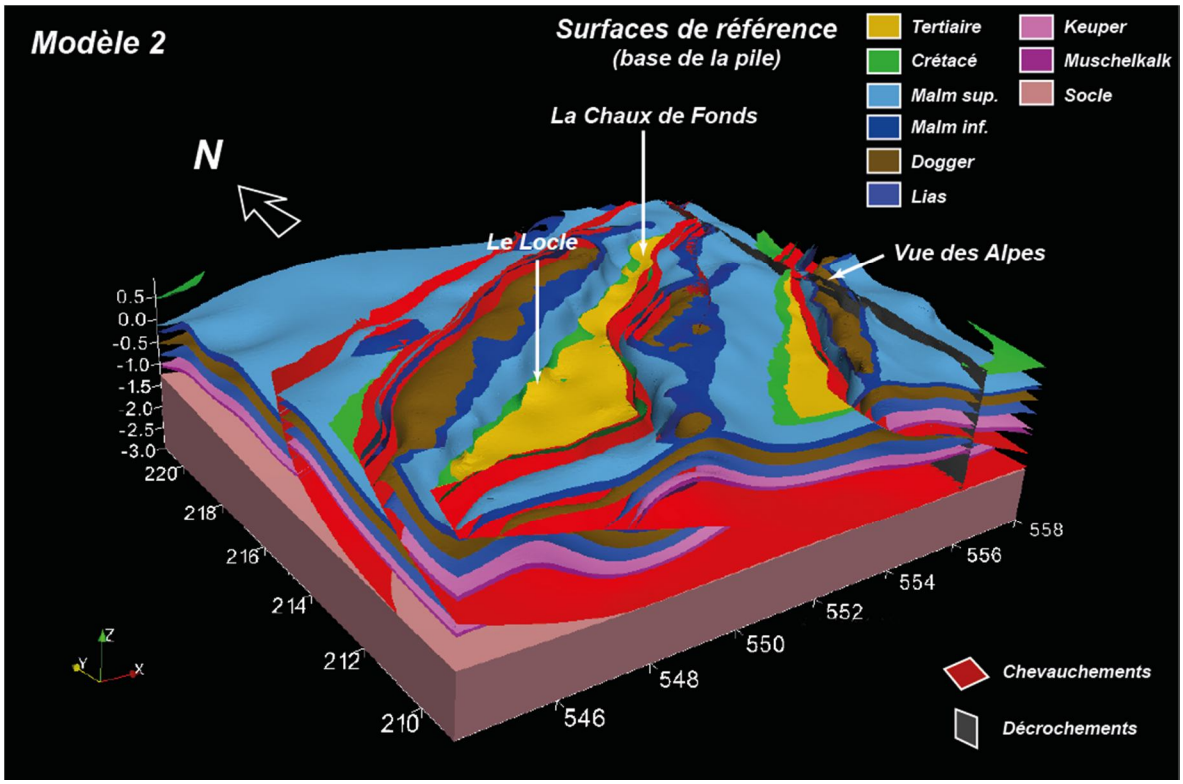



*Figure IV - 3. Extrait du Modèle 2 montrant la géométrie de la base des différentes formations géologiques ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km).*

## 2.3 Modèle détaillé de la région Le Locle – La Chaux de Fonds

### 2.3.1 Présentation du Modèle

Le modèle Détail 2 couvre une zone de 7 x 7 km autour de La Chaux-de-Fonds de la surface jusqu'à une profondeur de 2.5 km (Figure IV - 1). Il a été réalisé à partir du modèle numérique de terrain à 25 m (MNT25) et des cartes géologiques au 1:25'000 de cette zone (Val de Ruz et Biaufond-Les Bois-La Ferrière-St Imier). La stratigraphie a été prise en compte avec plus de détails par rapport au Modèle 2 (Figure IV - 5), ainsi que les accidents tectoniques secondaires dans la zone de la Chaux de Fonds. Le modèle a été calculé avec une résolution de 100 m horizontalement et 50 m verticalement, supérieure à celle du Modèle 2. La Figure IV - 5 montre un aperçu du modèle Détail 2, avec la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk et leurs relations géométriques avec les structures tectoniques.

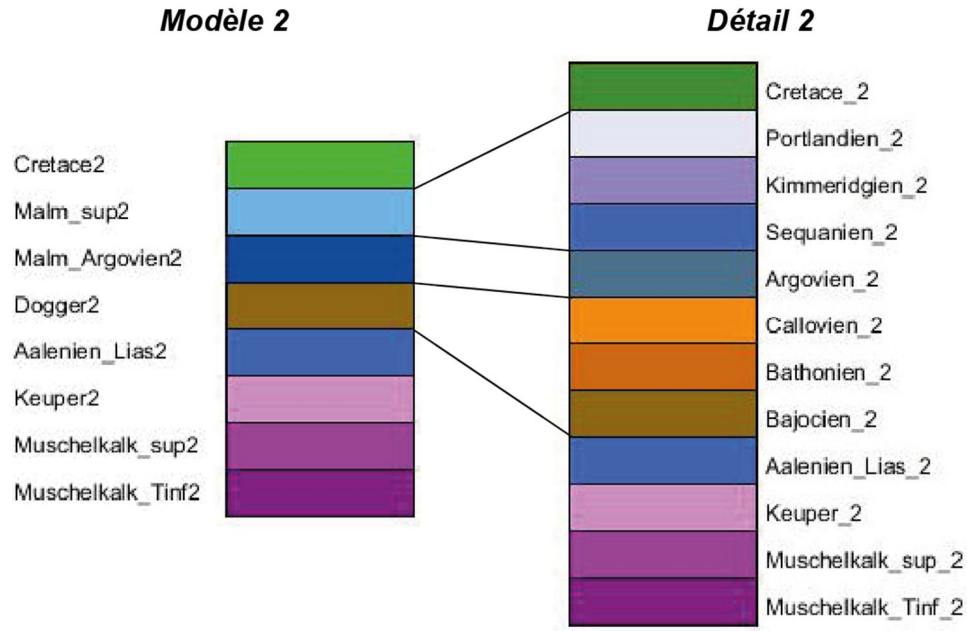



*Figure IV - 4. Comparaison des formations prises en comptes dans les modèles généraux et de détail.*

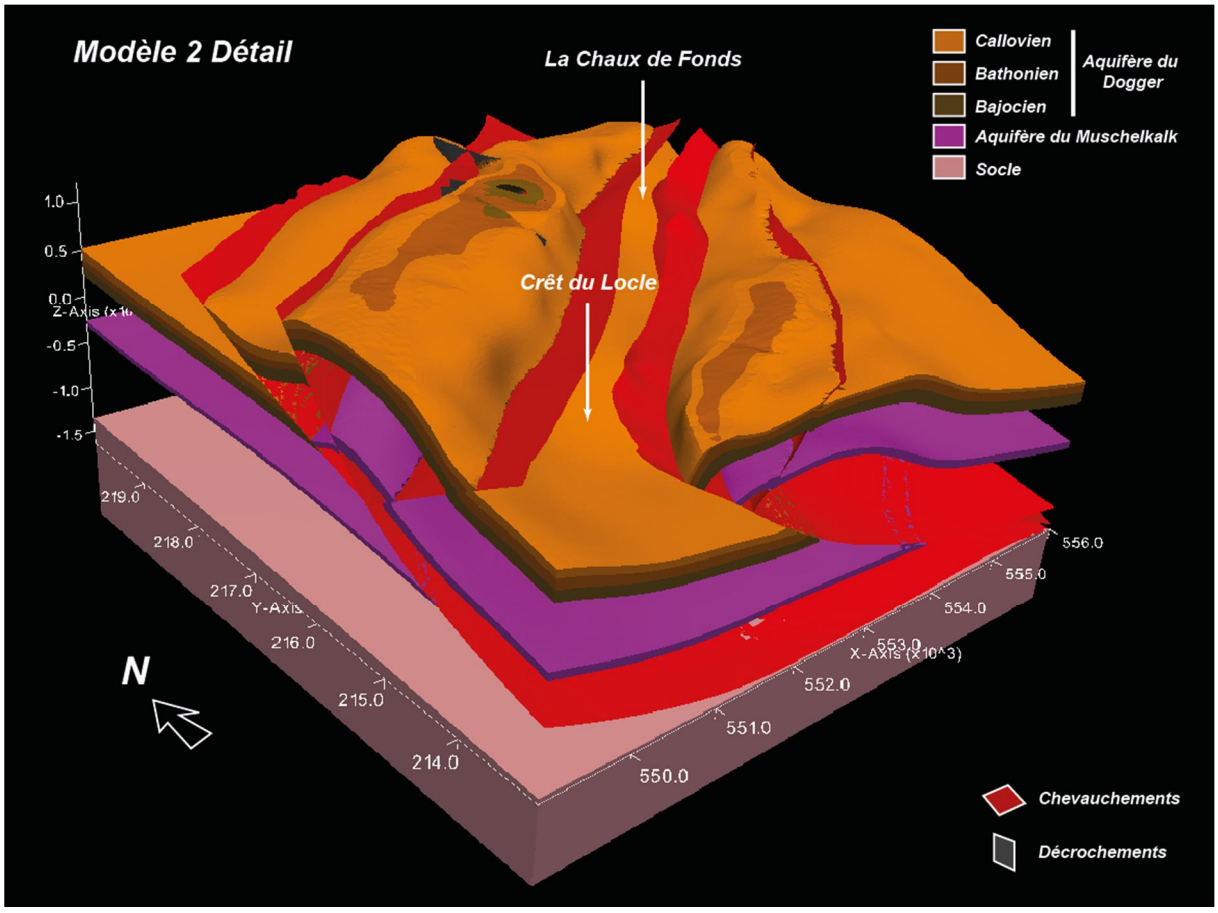



*Figure IV - 5. Extrait du modèle Détail 2 montrant la géométrie des aquifères du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km).*

# 2.4 Validation du modèle géologique par la gravimétrie

## 2.4.1 Anomalies gravimétriques résiduelles mesurées

La région Le Locle – La Chaux-de-Fonds couvre une surface de 8 km x 7 km dans la partie Nord du canton de Neuchâtel (Figure IV - 6). Les deux zones d'exploration géothermique sont la bordure Est de la ville de la Chaux-de-Fonds et la ville du Crêt-du-Locle, qui est au Sud-Ouest de la Chaux-de-Fonds (cf. Chapitre II, Figure II - 19).Dans le cadre du projet GeoNE, un total de 758 stations gravimétriques a été mesuré entre juillet 2011 et mai 2012 dans cette région. La cartographie est complétée par les données de l'Atlas Suisse de Gravimétrie (Klingele et Olivier, 1980) pour les surfaces se trouvant en dehors des zones de la Chaux-de-Fonds et du Crêt-du-Locle.

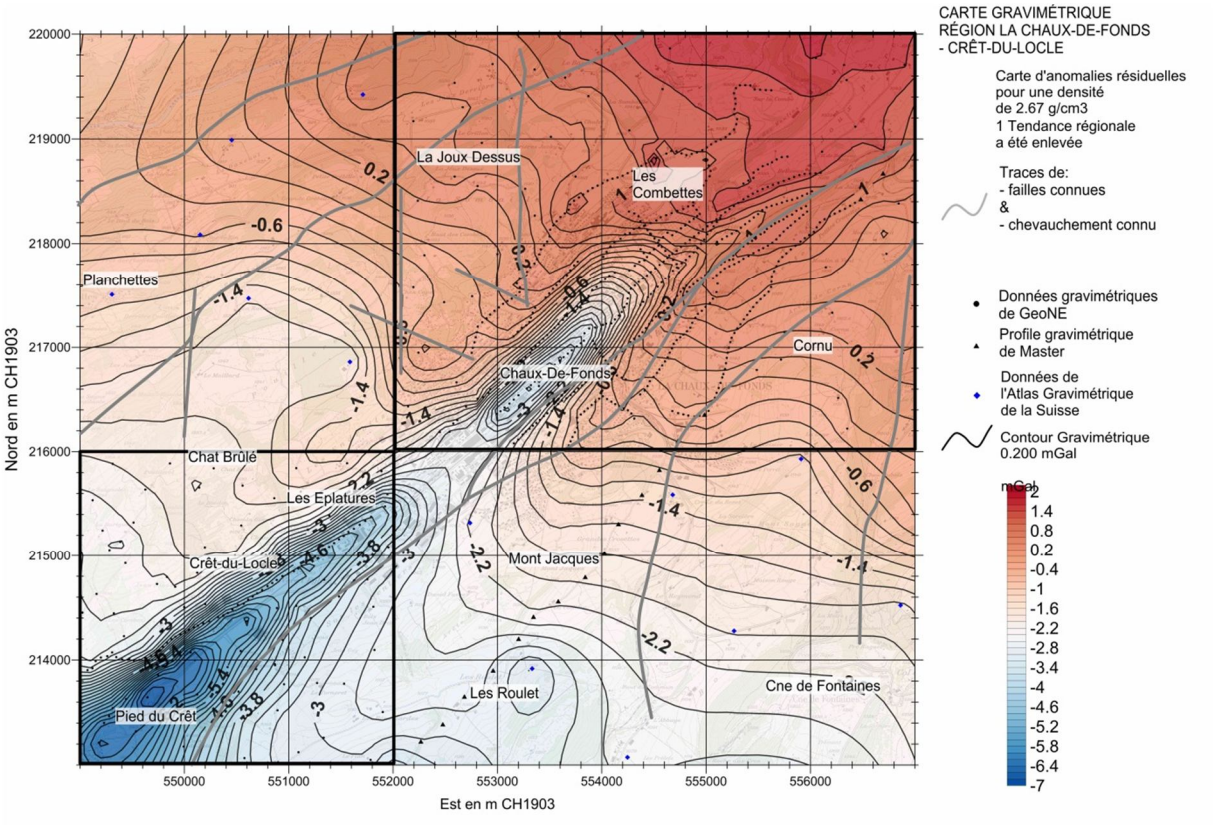



*Figure IV - 6.Carte gravimétrique de la 1ère résiduelle de la région de Le Locle – La Chaux-de-Fonds pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée est présentée dans le Chapitre II.*

Comme il a été présenté dans le chapitre méthodologie de la gravimétrie (cf. Chapitre II, Figure 19), la région Le Locle – La Chaux-de-Fonds se situe à cheval sur la bordure d'une grande anomalie régionale dont le cœur de la diminution gravimétrique est centré sur la ville du Locle et de la vallée de la Sagne. Cette tendance régionale de plongement gravitaire est orientée vers le Sud-Ouest et est clairement visible sur la zone de la Chaux-de-Fonds et sur la zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 6). De manière à pouvoir comprendre l'origine des anomalies gravimétriques de la zone de la Chaux-de-Fonds et de celle du Crêt-du-Locle, il est nécessaire de supprimer l'effet régional de cette grande anomalie gravimétrique. Dans ce but, la tendance générale de cette anomalie gravimétrique régionale a été calculée (Annexe, Figure A10), puis soustraite à la première carte d'anomalie résiduelle (Figure IV - 6). Le résultat est une carte d'anomalies résiduelles corrigée des deux

tendances régionales (Figure IV - 7), qui permet de mettre en évidence les structures géologiques de la région.

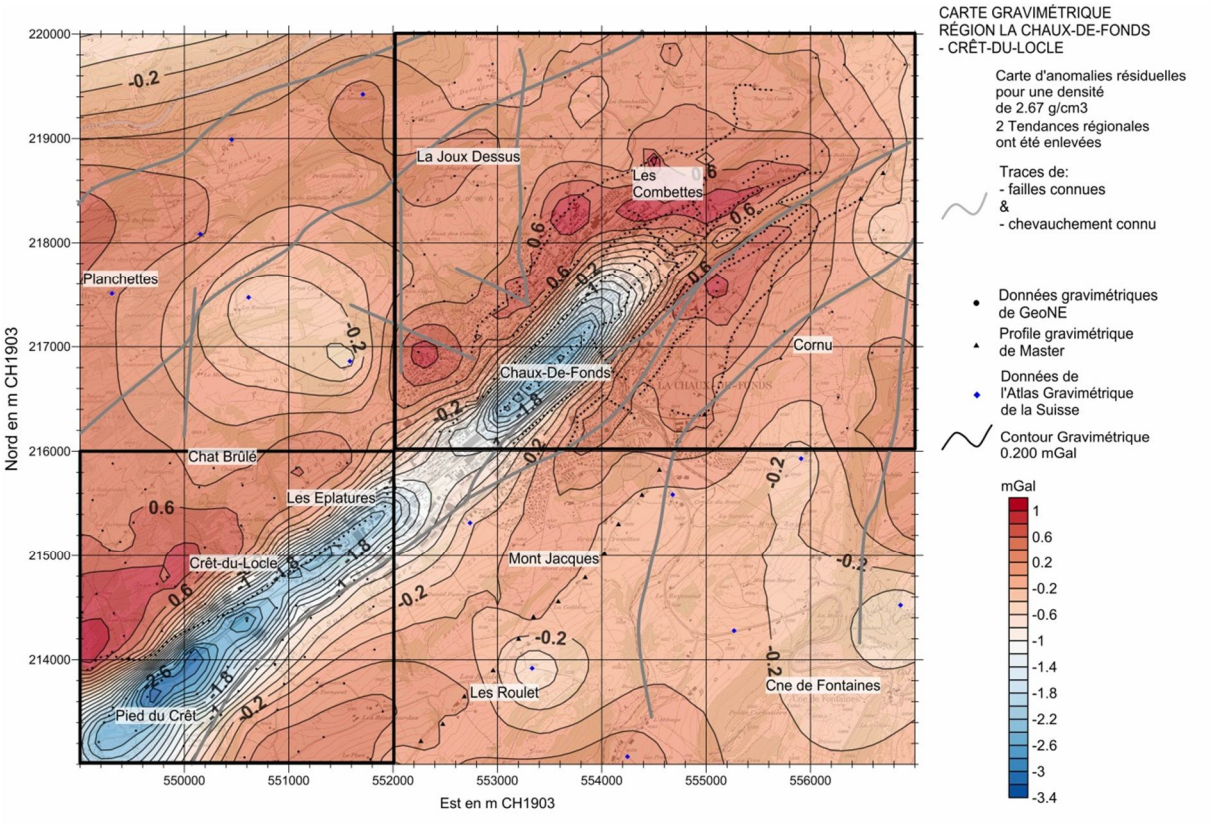



*Figure IV - 7. Carte gravimétrique de la 2$^{ème}$ résiduelle de la région de Le Locle – La Chaux-de-Fonds pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée est présentée dans le Chapitre II.*

## 2.4.2 Région de La Chaux-de-Fonds

Réalisée entre juillet 2011 et mai 2012, la carte des anomalies gravimétriques résiduelles de la région de La Chaux-de-Fonds regroupe 617 stations de mesures sur une surface de 20 km$^2$. Les interprétations suivantes sont basées sur la carte gravimétrique de la 2ème résiduelle de la région (Figure IV - 7).

Le front de chevauchement de La Petite Crosette, qui marque la bordure sud de la ville, crée un fort contraste gravifique avec la vallée. Cela est dû au contraste de densité entre les roches du chevauchement (calcaires et marneuses) et les sédiments post-mésozoïques (Molasse d'eau douce supérieure, Moraine de fond), qui remplissent la vallée. Formés de molasse d'eau douce supérieure et de moraine de fond, les sédiments post-mésozoïques sont peu denses (Tableau IV - 1) en comparaison de calcaires ou de marnes.

Les autres fronts de chevauchement (dans le coin nord-ouest et dans le coin sud-est) ne présentent pas de variation gravifique significative en comparaison des roches qu'ils chevauchent. Cela est vraisemblablement dû au fait que les types et les densités de ces roches (calcaires et marnes) sont similaires de part et d'autre des fronts de chevauchement.

Dans la zone de La Chaux-de-Fonds, la principale faille répertoriée (Favre, 1911 ; Suter et Lüthi, 1969 ; Groupe de travail PDGN, 2010) est localisé au nord-ouest de la ville (Figure IV - 8) et représente un système de plusieurs petites failles décrochantes orientées N-S (Suter et Lüthi, 1969), qui ont localement accommodé la déformation. Ce système de failles ne présente aucune signature

gravimétrique, contrairement aux failles de la région de Neuchâtel. Ceci est probablement dû au fait que les failles de la région de La Chaux-de-Fonds n'ont pas ou que peu décalé les couches géologiques et qu'elles n'ont pas suffisamment fracturé les formations rocheuses. Par conséquent, ces failles n'ont pas engendré un contraste de densité des roches, qui n'ont donc pas produit de changement local de la gravité.

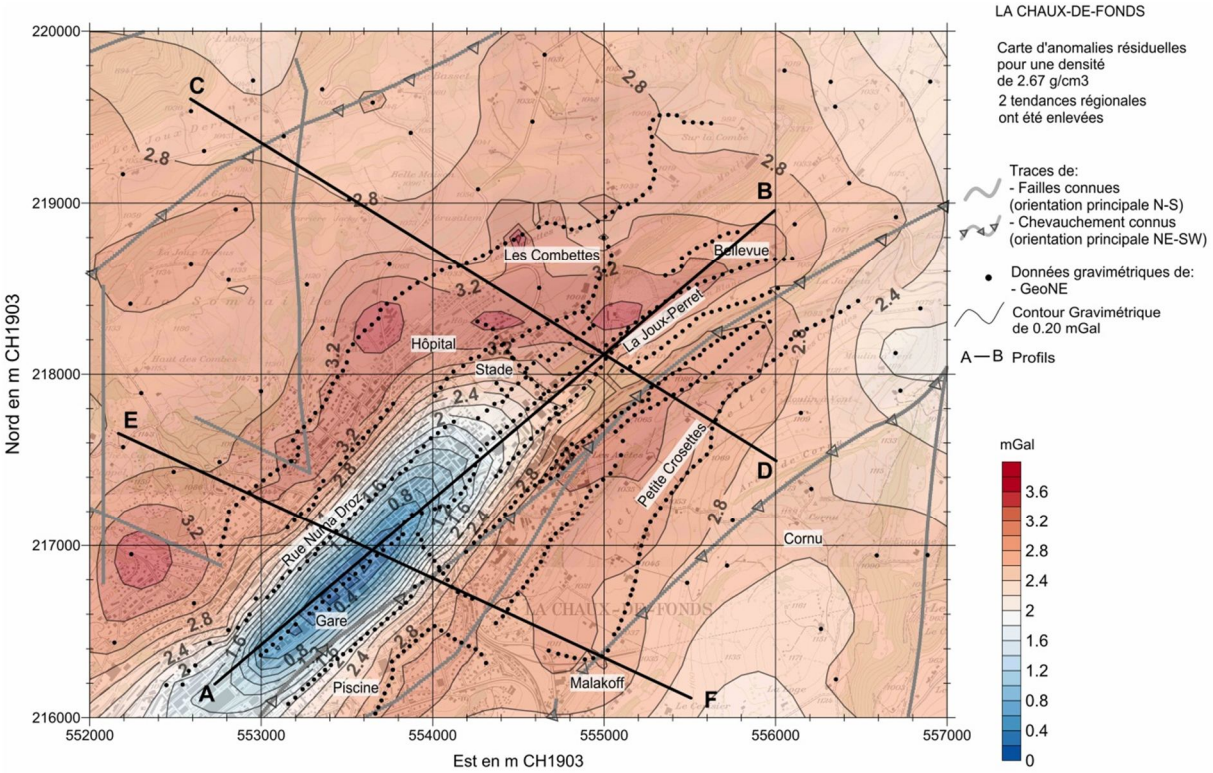



*Figure IV - 8. Carte gravimétrique résiduelle de La Chaux-de-Fonds, extrait de la carte régionale de la 2ème résiduelle (Figure IV - 7). Deux tendances régionales ont été enlevées. Voir texte pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 2.4.3 Région du Crêt-du-Locle

Réalisée d'avril 2012 à mai 2012, la carte des anomalies gravimétriques résiduelles de la région du Crêt-du-Locle regroupe 141 stations de mesures sur une surface de 9 km$^2$. Le résultat est une carte des anomalies gravimétriques résiduelles corrigées des deux tendances régionales (Figure IV - 9).

La carte des anomalies gravimétriques résiduelles pour la zone du Crêt-du-Locle est marquée par une forte diminution de la gravité de 4 mGal (Figure IV - 9), associée à la vallée et vraisemblablement due aux remplissages sédimentaires post-mésozoïques. La région du Crêt-du-Locle est marquée en termes de géologie par l'absence de faille et par l'existence d'un seul front de chevauchement (Figure IV - 9). Des rétro-chevauchements présents en profondeur ne sont pas visibles en surface. La carte d'anomalies résiduelles ne présente aucune diminution gravifique, qui pourrait être associée à de quelconques failles en profondeur, ni même à de la fracturation. La signature gravifique du front de chevauchement n'est pas mise en évidence par cette carte d'anomalies résiduelles. Cela est dû au fait que ce front de chevauchement est enfoui sous les sédiments, il est possible que sa signature gravifique soit occultée par l'effet gravimétrique des sédiments post-mésozoïques.

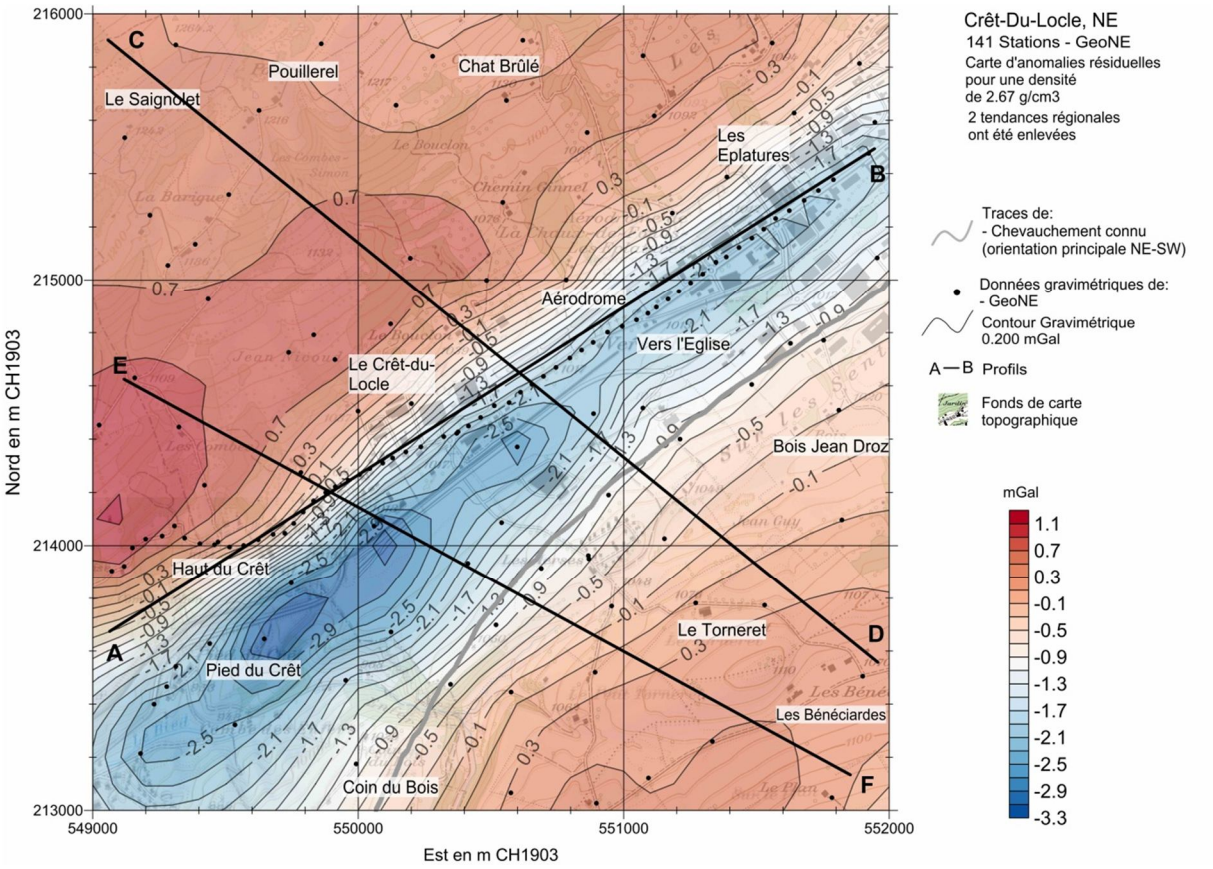



*Figure IV - 9. Carte gravimétrique résiduelle du Crêt-du-Locle, extrait de la carte régionale de la 2ème résiduelle (Figure IV - 7). Deux tendances régionales ont été enlevées. Voir texte pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

### 2.4.4 Anomalies gravimétriques obtenues à partir du modèle géologique

La région Le Locle – La Chaux-de-Fonds se situe dans les montagnes du Jura (Figure IV - 1) dont les formations géologiques qui les composent ont été tectonisées (plissement, chevauchement) et fracturées localement lors de la formation des montagnes. Les plissements et les chevauchements du Jura sont constitués des couches sédimentaires du Mésozoïque (Figure IV - 4, Tableau IV - 1), qui sont d'alternance de formations rocheuses allant du calcaire massif aux marnes en passant par les formations marno-calcaires. Le bas de la pile géologique du Mésozoïque est quant à lui fait d'une couche de gypse. Ces formations sédimentaires (marne et calcaire) ont des valeurs de densité très similaires, ce qui a pour conséquence que les variations de densité d'une formation à l'autre sont faibles au sein du Mésozoïque. Le Tableau IV - 1 synthétise les informations sur la densité des différentes formations présentes dans la région d'étude. Ces faibles variations de densité se traduisent par de faibles variations gravimétriques au sein des formations du Mésozoïque comme cela apparaît sur les collines autour des vallées de la Chaux-de-Fonds et du Crêt-du-Locle (Figure IV - 7). Après correction des effets des dépôts post-mésozoïques (méthode de stripping, Annexe Figure A10), ces faibles variations gravimétriques deviennent plus évidentes sur la zone de La Chaux-de-Fonds (Annexes, Figure A11). La même chose est visible pour la zone du Crêt-du-Locle (Annexes, respectivement Figure A13 et A14). Pour information, la méthode de stripping est présentée dans le Chapitre II Méthodologie.

*Tableau IV - 1. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). Les valeurs utilisées pour les densités de chaque formation correspondent au modèle présenté en Figure III - 12.. *Mesurées dans le projet IGS-NE. # Valeurs de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. + Basées sur la littérature. ‡ Utilisées dans le modèle normal permettant de reproduire au mieux les anomalies gravimétriques mesurées.*

| **Formation géologique** | **Type de roche** | **Source d'information** | **Valeurs de densité ($g.cm^{-3}$)** | **Valeurs de densité utilisées dans le modèle ($g.cm^{-3}$)‡** |
|---|---|---|---|---|
| Post-Mésozoïque (Molasse d'eau douce supérieure, Moraine de fond, Autres dépôts tertiaire) | Marnes bigarrées et grès - gravier-marnes | Observation géologique | 2.60# - 2.89# | 2.05 - 2.15 |
| Crétacé (Albien-Barrémien-Valanginien-Hauterivien) | Calcaire | Observation géologique | 2.64* - 2.69* | 2.45 - 2.62 |
| Malm-supérieur - Portlandien | Calcaire micritique- Calcaire oolithique - Marne (minoritaire) | Observation géologique | 2.65* - 2.71* | 2.60 – 2.73 |
| Malm supérieur - Kimméridgien | Calcaire micritique- Calcaire oolithique - Marne (minoritaire) | Observation géologique | 2.65* - 2.71* | 2.63 - 2.73 |
| Malm supérieur - Séquanien | Calcaire oolithique | Observation géologique | 2.65* - 2.71* | 2.63 - 2.66 |
| Malm-Argovien | Marne - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.57# | 2.62 - 2.64 |
| Dogger - Callovien | Calcaire spathique – Dalle Nacrée | Observation géologique | 2.61* - 2.67* | 2.61 - 2.65 |
| Dogger-Bathonien- | Calcaire oolithique – Calcaire roux sableux - Marne- | Observation géologique | 2.61* - 2.67* | 2.60 - 2.65 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dogger-Bajocien | Calcaire oolithique - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.61* - 2.67* | 2.60 - 2.66 |
| Aalénien - Lias | Marne | Hypothèse | 2.12# - 2.60# | 2.63 - 2.67 |
| Keuper | Marne | Hypothèse | 2.10# - 2.73# | 2.60 - 2.64 |
| Muschelkalk supérieur | Calcaire | Hypothèse | 2.53# - 2.83# | 2.63 - 2.67 |
| Muschelkalk-Trias inférieur | Gypse | Hypothèse | 2.13# - 2.83# | 2.55 - 2.63 |
| Socle cristallin | Roche cristalline | Hypothèse | 2.60# - 2.83# | 2.69 - 2.76 |

Pour pouvoir valider le modèle géologique 3D (Figure IV - 5) à partir des anomalies gravimétriques résiduelles (Figure IV - 8, Figure IV - 9), il est nécessaire de calculer la réponse gravimétrique du modèle géologique 3D « Détail 2 » (Figure IV - 5). La réponse gravimétrique calculée de chaque zone (Figure IV - 10, Figure IV - 11) est alors comparée aux cartes d'anomalies gravimétriques de la 2ème résiduelles (Figure IV - 8, Figure IV - 9). Dans ce but, plusieurs modélisations normales (Forward modelling) ont été exécutées en faisant varier les valeurs de densité des différentes formations géologiques (Tableau IV - 1). Dans ce Chapitre IV, seules les deux cartes gravimétriques calculées reproduisant au mieux les valeurs mesurées sont présentées respectivement sur les Figure IV - 10 et Figure IV - 11. Les paramètres de densité utilisés pour ces modèles sont présentés au Tableau IV - 1. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le Chapitre II de ce rapport.

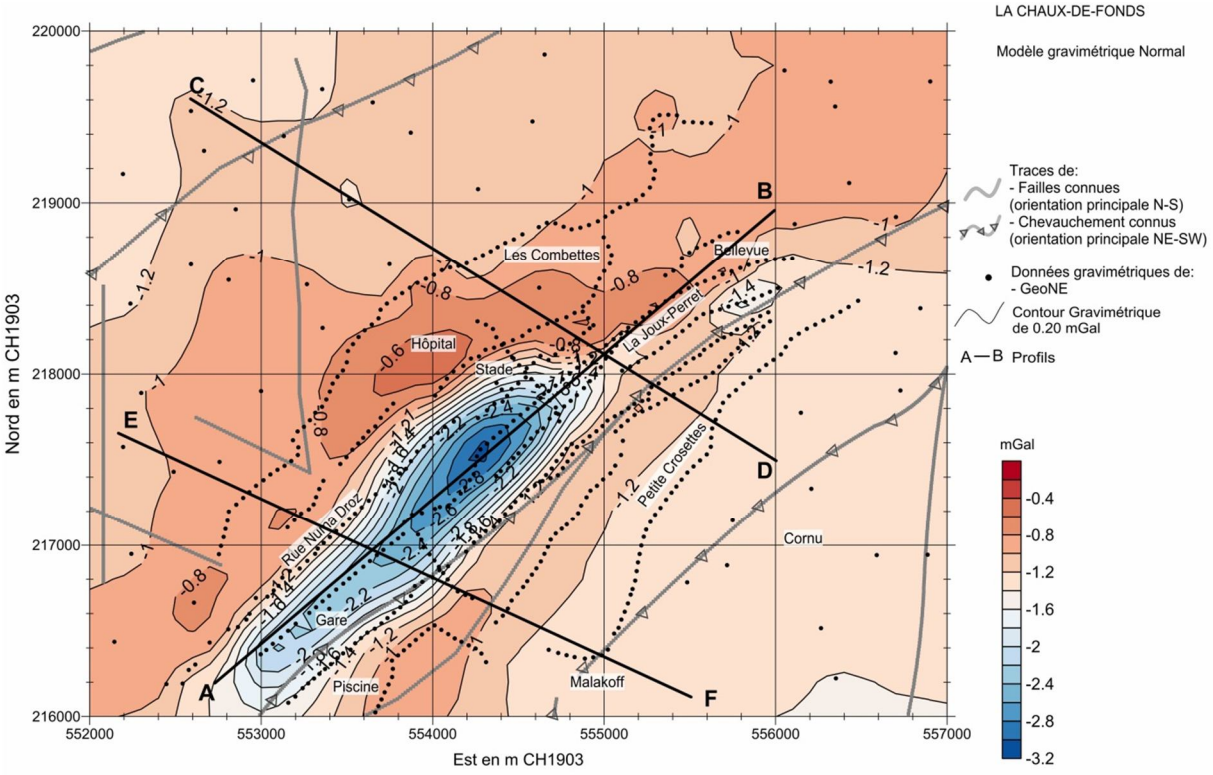



*Figure IV - 10. Carte gravimétrique de la zone de La Chaux-de-Fonds calculée à partir du modèle géologique (Modèle 1, Figure IV - 5) et des paramètres de densité présentés dans le Tableau IV - 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir Chapitre II.*

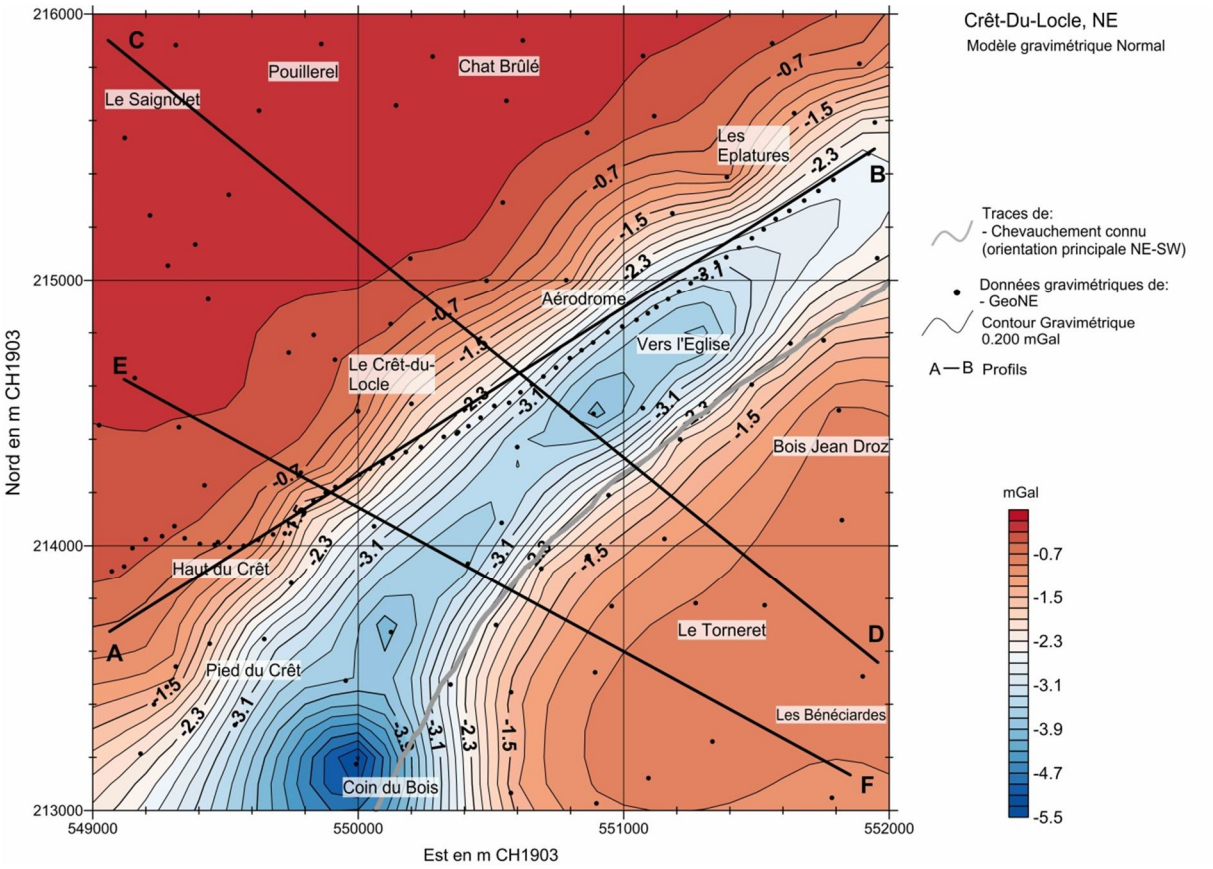



*Figure IV - 11. Carte gravimétrique de la zone du Crêt-du-Locle calculée à partir du modèle géologique (Modèle 1, Figure IV - 5) et des paramètres de densité présentés dans le Tableau IV - 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir Chapitre II.*

## 2.4.5 Validation et limites de la modélisation géologique 3D

### LA CHAUX-DE-FONDS

Le modèle gravimétrique de la Chaux-de-Fonds (Figure IV - 10) reproduit dans son ensemble assez bien la tendance gravimétrique générale comme elle est montrée par la carte de Misfit (Figure IV - 12) obtenue après soustraction de la carte gravimétrique de la 2ème résiduelle (Figure IV - 8).

L'incertitude de la géométrie des couches profondes et tout particulièrement de la géométrie du socle cristallin fait que les valeurs du Misfit ne sont pas autour de 0 mGal, mais de -4 mGal (Figure IV - 12). Toutefois, malgré ce shift apparent de 4 mGal, les amplitudes des variations gravimétriques dans la zone de La Chaux-de-Fonds sont relativement proches de celles mesurées sur la 2ème résiduelle (Figure IV - 12).

Pour pouvoir analyser objectivement la qualité du modèle géologique, plusieurs coupes comparatives ont été réalisées. Ces coupes regroupent les variations gravimétriques mesurées (à partir de la carte de la 2ème résiduelle, Figure IV - 8), modélisées (Figure IV - 10) et le Misfit (Figure IV - 12), ainsi que la topographie obtenue à partir du MNT 25 m de la Suisse (MNT,25V-Swisstopo 2011).

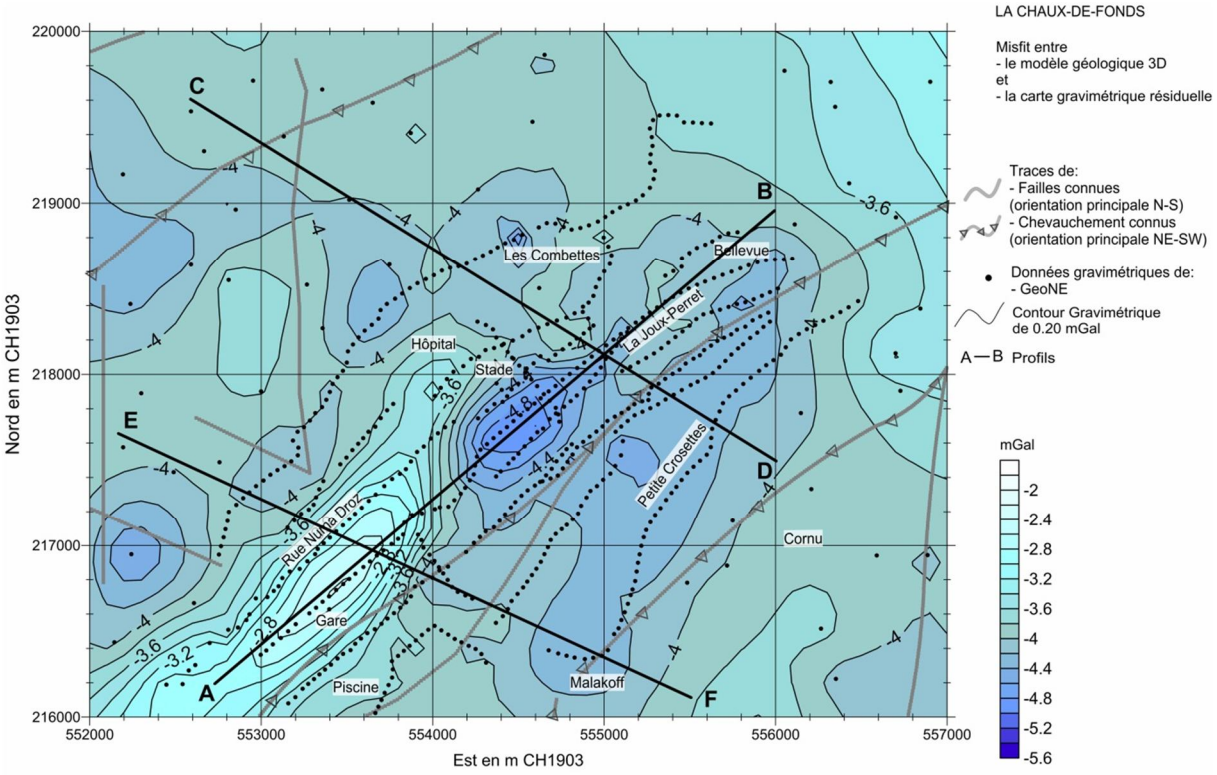



*Figure IV - 12. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure IV - 11) par la carte gravimétrique de la 2ème résiduelle de la région de La Chaux-de-Fonds (Figure IV - 8). Voir texte pour détails.*

Il est important de différencier les trois grandes structures stratigraphiques présentes dans la région d'étude. La plus importante succession stratigraphique regroupe les trois aquifères profonds du Malm, du Dogger et du Muschelkalk (Tableau IV - 1), qui constitue le corps du Mésozoïque. La deuxième structure stratigraphique est le Crétacé (Tableau IV - 1), qui forme le toit du Mésozoïque. La dernière structure stratigraphique regroupe les dépôts sédimentaires post-Mésozoïques (Tableau IV - 1). Chaque profil présenté ici est accompagné d'une coupe géologique (Figure IV - 13 à Figure IV - 15)

Comme suggéré par les résultats du Misfit (Figure IV - 12), les trois profils (A-B en Figure IV - 13, C-D en Figure IV - 14 et E-F en Figure IV - 15) mettent en évidence que la tendance générale des variations gravimétriques modélisées reproduit assez bien les effets gravimétriques des couches du Mésozoïque formant les aquifères profonds. Toutefois, cela n'est pas le cas pour les formations du Crétacé (en vert sur la coupe géologique, Figure IV - 13et Figure IV - 14). Les formations du Crétacé modélisées ne permettent pas de reproduire correctement la forme de l'anomalie mesurée (courbe bleue, Figure IV - 13 et Figure IV - 14). Ceci est dû au manque d'information géologique sur la géométrie exacte, ainsi que sur les variations d'épaisseurs des formations du Crétacé dans la vallée. Le long du Profil E-F (Figure IV - 15), la géométrie du Crétacé est bien plus proche de ce qu'elle est vraisemblablement dans la réalité, puisque la forme de l'anomalie gravimétrique modélisée est très similaire à ce qui a été mesuré. L'épaisseur des formations du Crétacé est très probablement trop importante au détriment des formations post-Mésozoïques (en jaune sur le profil géologique), ce qui empêche de pouvoir reproduire les amplitudes des anomalies associées au remplissage sédimentaire post-mésozoïque. Cela est clairement visible sur les profils A-B (Figure IV - 13) et E-F (Figure IV - 15).

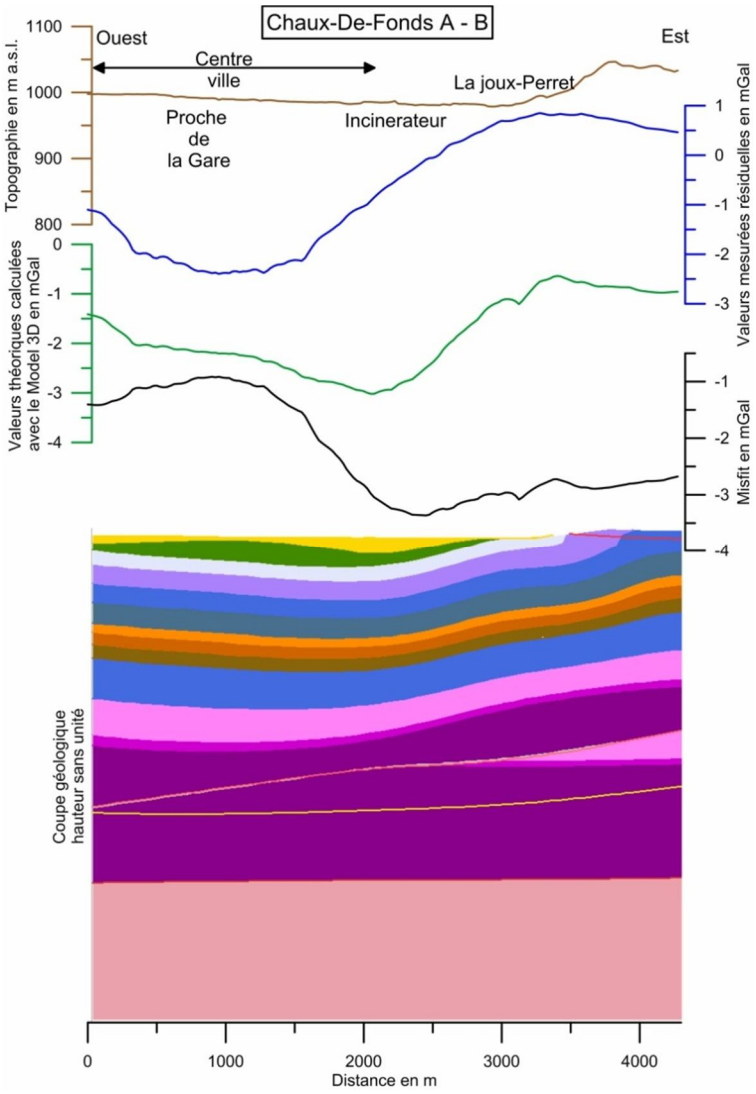



*Figure IV - 13. Comparaison du profil gravimétrique A-B sur la zone de la Chaux-de-Fonds (Figure IV - 12). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4.*

Ces problèmes de géométrie et d'épaisseur du Crétacé viennent perturber à la fois :

- les couches superficielles post-mésozoïques en les rendant plus fines que ce qu'elles devraient être ;
- les formations géologiques mésozoïques formant les trois aquifères profonds (Malm, Dogger et Muschelkalk) en affectant leur géométrie dans les zones de front de chevauchement (Figure IV - 14).

Dans les secteurs où il n'y a pas de Crétacé, la réponse gravimétrique des formations mésozoïques formant les trois aquifères reproduit bien les anomalies mesurées (Figure IV - 14 et Figure IV - 15) tant en amplitude que dans la forme des anomalies. Pour ces secteurs, la modélisation géologique 3D reproduit bien la réalité.

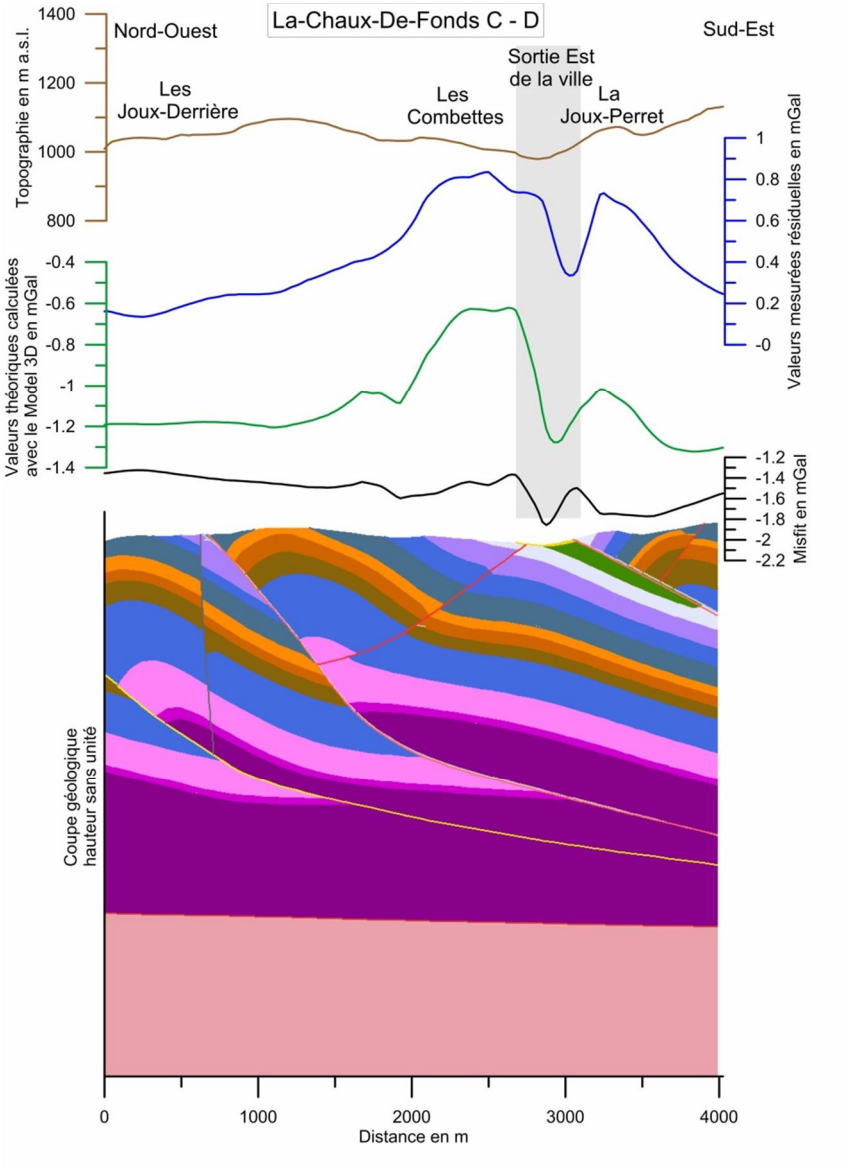



*Figure IV - 14. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone de la Chaux-de-Fonds (Figure IV - 12). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4.*

En conclusion pour la zone de la Chaux-de-Fonds, basée sur l'analyse des profils, ainsi que sur la carte de Misfit, le modèle géologique 3D permet:

- de bien reproduire la géométrie et l'épaisseur des formations mésozoïques formant les trois aquifères profonds (Malm, Dogger et Muschelkalk) dans les secteurs où il n'y a pas de formation du Crétacé ;
- de mettre en évidence l'existence de problèmes dans la géométrie et l'épaisseur des formations du Crétacé, qui forme le toit du Mésozoïque ;

- de mettre en évidence des erreurs dans l'épaisseur des sédiments post-mésozoïques, qui sont le plus souvent sous-estimé.

Les erreurs dans la géométrie et les épaisseurs du Crétacé, ainsi que dans les épaisseurs des formations post-mésozoïques ont vraisemblablement des conséquences importantes dans les vallées sur la géométrie et la profondeur exacte des formations géologiques des trois aquifères profonds qui sont en dessous.

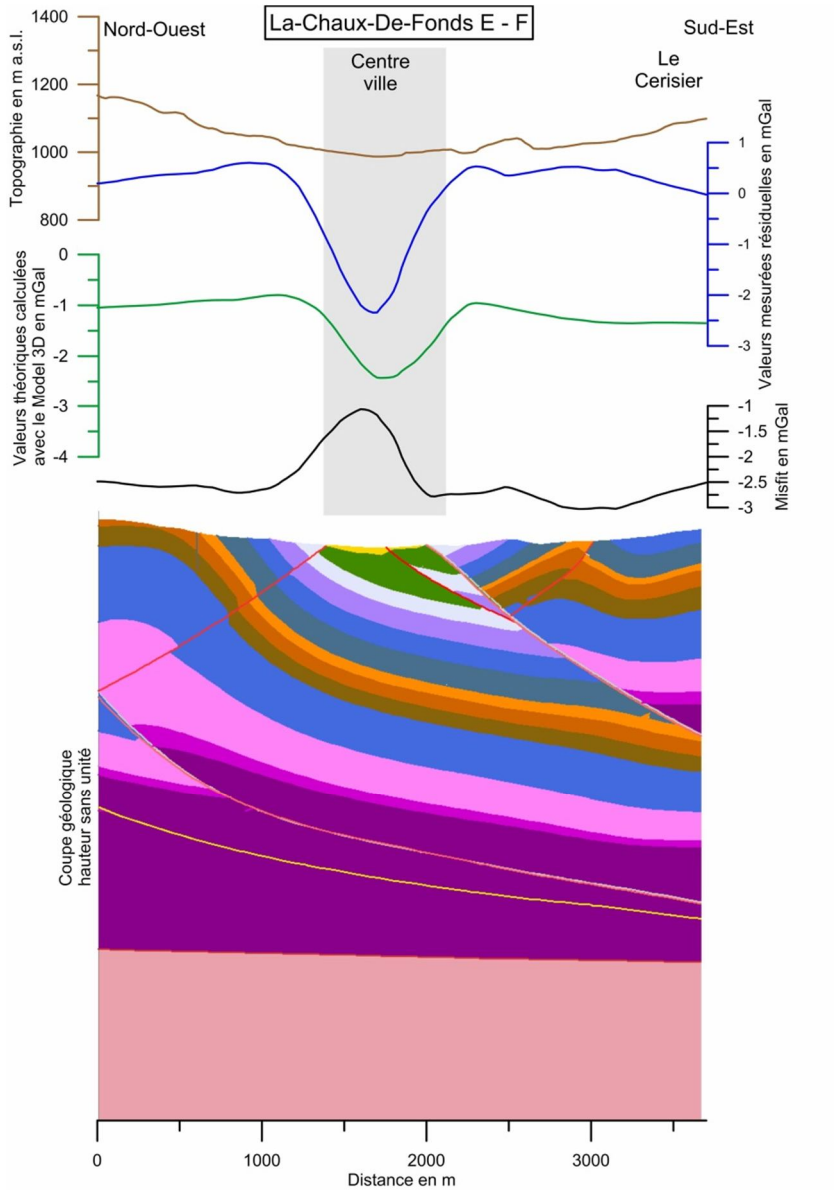



*Figure IV - 15. Comparaison du profil gravimétrique E-F sur la zone de la Chaux-de-Fonds (Figure IV - 12). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4.*

## CRET-DU-LOCLE

De manière similaire, le modèle gravimétrique du Crêt-du-Locle (Figure IV - 11) reproduit dans son ensemble assez bien la tendance gravimétrique générale mesurée (Figure IV - 9). Ceci est supporté par la carte de Misfit (Figure IV - 16) obtenu après soustraction de la carte gravimétrique de la 2ème résiduelle (Figure IV - 9).

L'incertitude de la géométrie des couches profondes et tout particulièrement de la géométrie du socle cristallin ont pour conséquence que les valeurs du Misfit ne sont pas tout à fait centré à 0 mGal, mais à -0.6 mGal (Figure IV - 16). Toutefois, malgré ce léger shift apparent, les amplitudes des variations gravimétriques dans la zone du Crêt-du-Locle sont relativement proches de celles mesurées sur la 2ème résiduelle.

Comme pour la zone de La Chaux-de-Fonds, dans la zone du Crêt-du-Locle, la qualité du modèle géologique est basée sur la comparaison de plusieurs coupes comparatives. Ces coupes regroupent les variations gravimétriques mesurées (à partir de la carte de la 2ème résiduelle, Figure IV - 9), modélisées (Figure IV - 11) et le Misfit (Figure IV - 16), ainsi que la topographie obtenue à partir du MNT 25 m de la Suisse (MNT,25V-Swisstopo 2011).

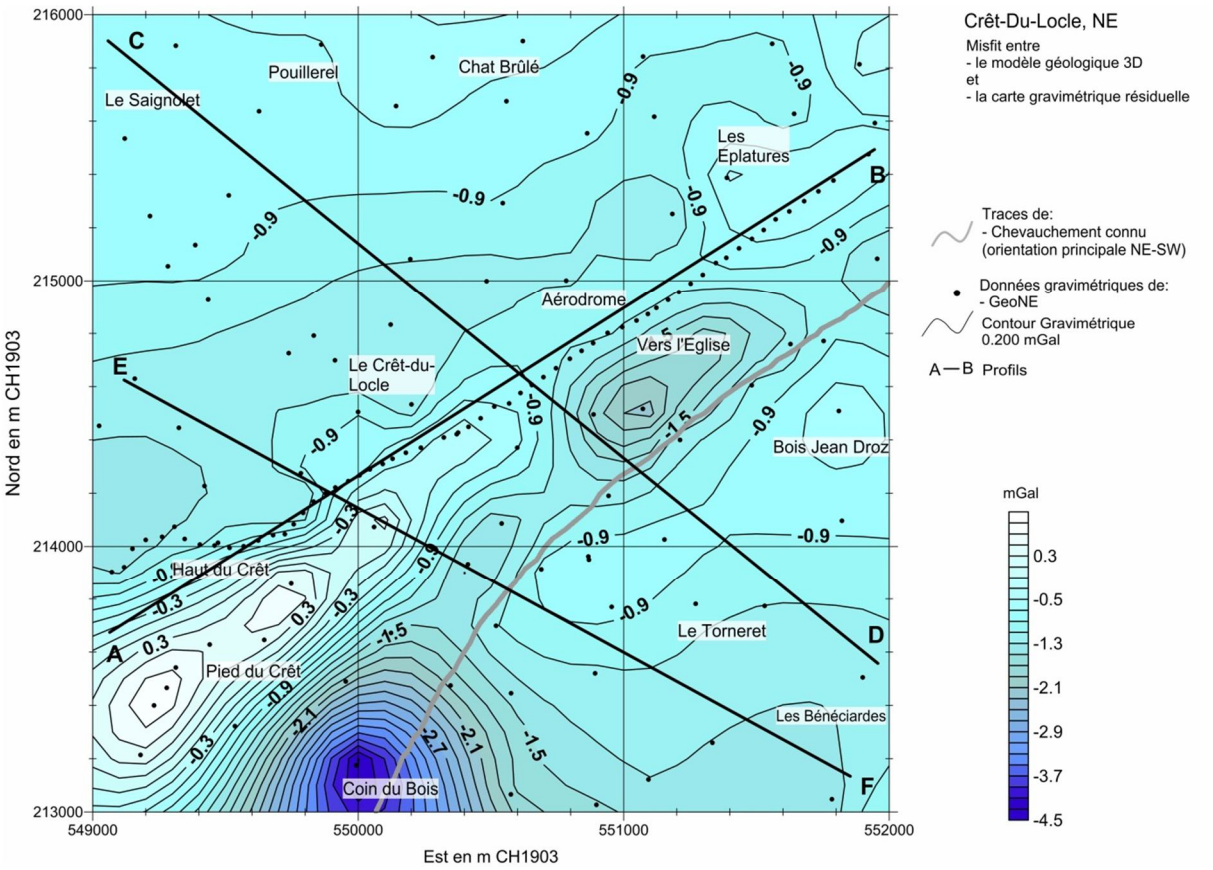



*Figure IV - 16. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure IV - 11) par la carte gravimétrique résiduelle de zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 9). Voir texte pour détails.*

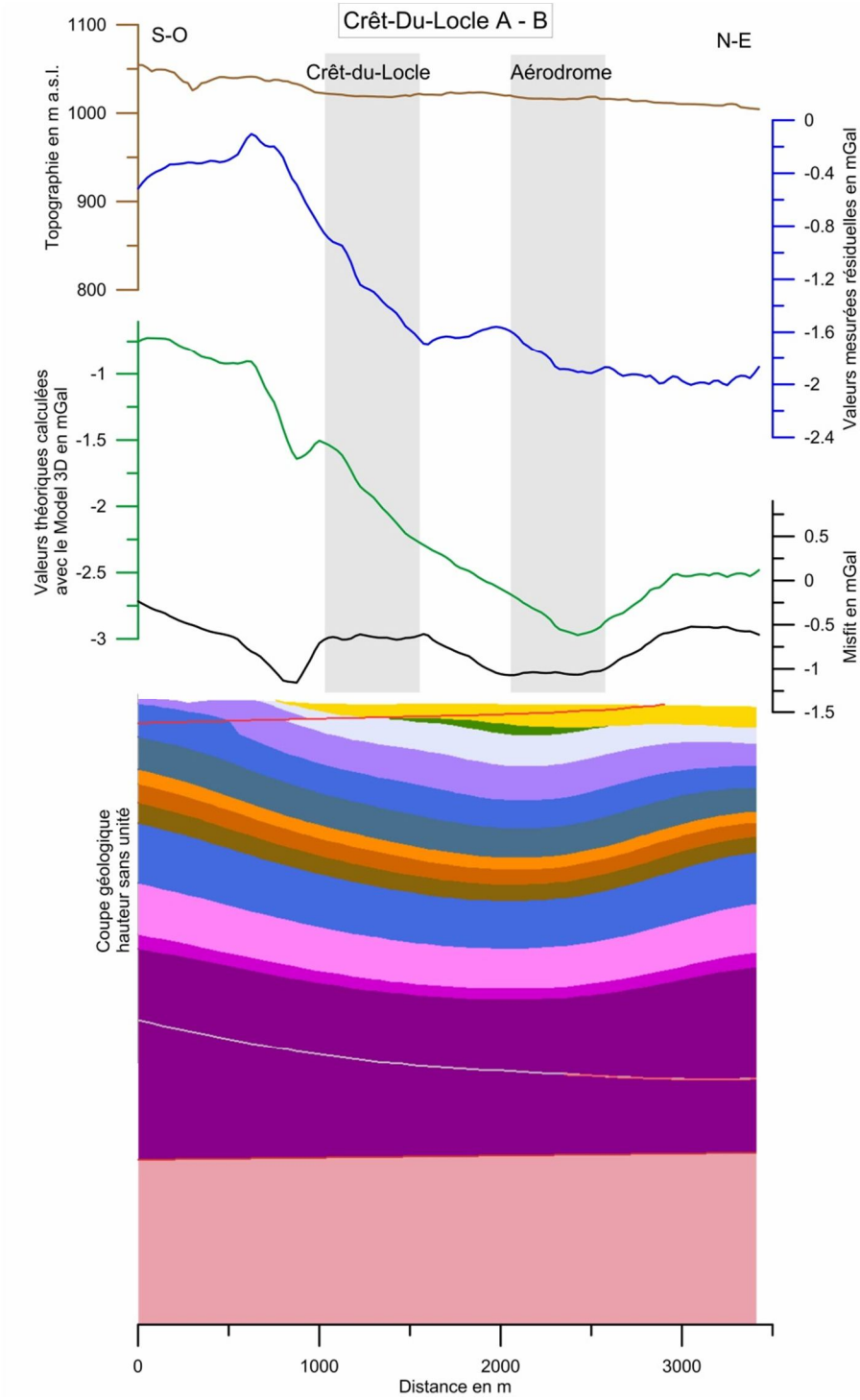



*Figure IV - 17. Comparaison du profil gravimétrique A-B sur la zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 16). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4.*

Les trois structures stratigraphiques décrites précédemment pour la Chaux-de-Fonds sont aussi valables pour la zone du Crêt-du-Locle. Le haut de la pile stratigraphique est constitué des dépôts sédimentaires post-mésozoïques (Tableau IV - 1) qui recouvrent les couches du Mésozoïque dans la vallée. Le toit du Mésozoïque est constitué des formations du Crétacé, qui ne sont présentes que dans la vallée. Les autres formations géologiques formant le corps du Mésozoïque sont celles contenant les trois aquifères profonds (Tableau IV - 1, Figure IV - 4). Chaque profil présenté ici est accompagné d'une coupe géologique (Figure IV - 17 à Figure IV - 19).

Comme suggérée par le résultat du Misfit (Figure IV - 16), une première analyse des trois profils (A-B en Figure IV - 17, C-D en Figure IV - 18 et E-F en Figure IV - 19) permet de mettre en évidence que la tendance générale des variations gravimétriques modélisées reproduit bien les effets gravimétriques mesurés (Figure IV - 9). De la même manière que ce qui a été montré pour la zone de La Chaux-de-Fonds, dans la zone du Crêt-du-Locle, l'effet gravifique des couches des aquifères profonds (Malm, Dogger, Muschelkalk) reproduit bien ce qui a été mesuré dans les secteurs où ces formations ne sont pas recouvertes par les formations du Crétacé, ni par celles post-mésozoïque (Figure IV - 17 à Figure IV - 19).

Dans la zone du Crêt-du-Locle, la géométrie et l'épaisseur des formations du Crétacé causent moins de problèmes que celles de la zone de La Chaux-de-Fonds. Toutefois, cela n'est pas suffisant pour pouvoir reproduire correctement les anomalies mesurées dans la vallée. Ceci est dû au manque d'information géologique sur la géométrie exacte, ainsi que sur les variations d'épaisseurs des formations du Crétacé dans la vallée. Ce manque de connaissances de la géométrie des formations du Crétacé est particulièrement visible sur le profil A-B (Figure IV - 17) où le Crétacé modélisé ne permet pas de reproduire l'anomalie gravimétrique mesuré se trouvant entre le Crêt-du-Locle et l'aérodrome des Eplatures.

Contrairement à la zone de La Chaux-de-Fonds, dans la zone du Crêt-du-Locle, l'épaisseur des formations du Crétacé n'est probablement pas assez importante, tandis que celle des dépôts sédimentaires post-mésozoïques sont trop importantes dans le modèle géologique par rapport à la réalité. La géométrie du Crétacé reste problématique au niveau de son interface avec les dépôts sédimentaires post-mésozoïques.

La géométrie de la surface de contact entre les formations du Crétacé et les formations sous-jacentes se montre assez cohérente. Toutefois, au niveau des rétro-chevauchements (Figure IV - 17 à Figure IV - 19), les effets gravimétriques modélisés ne permettent de reproduire exactement la forme de la pente des anomalies mesurées sur les bords de la vallée. Il semblerait que les géométries des différentes formations mésozoïques modélisées au niveau des contacts de chevauchement, ainsi que du rétro-chevauchement ne soit pas exactement celles de la réalité.

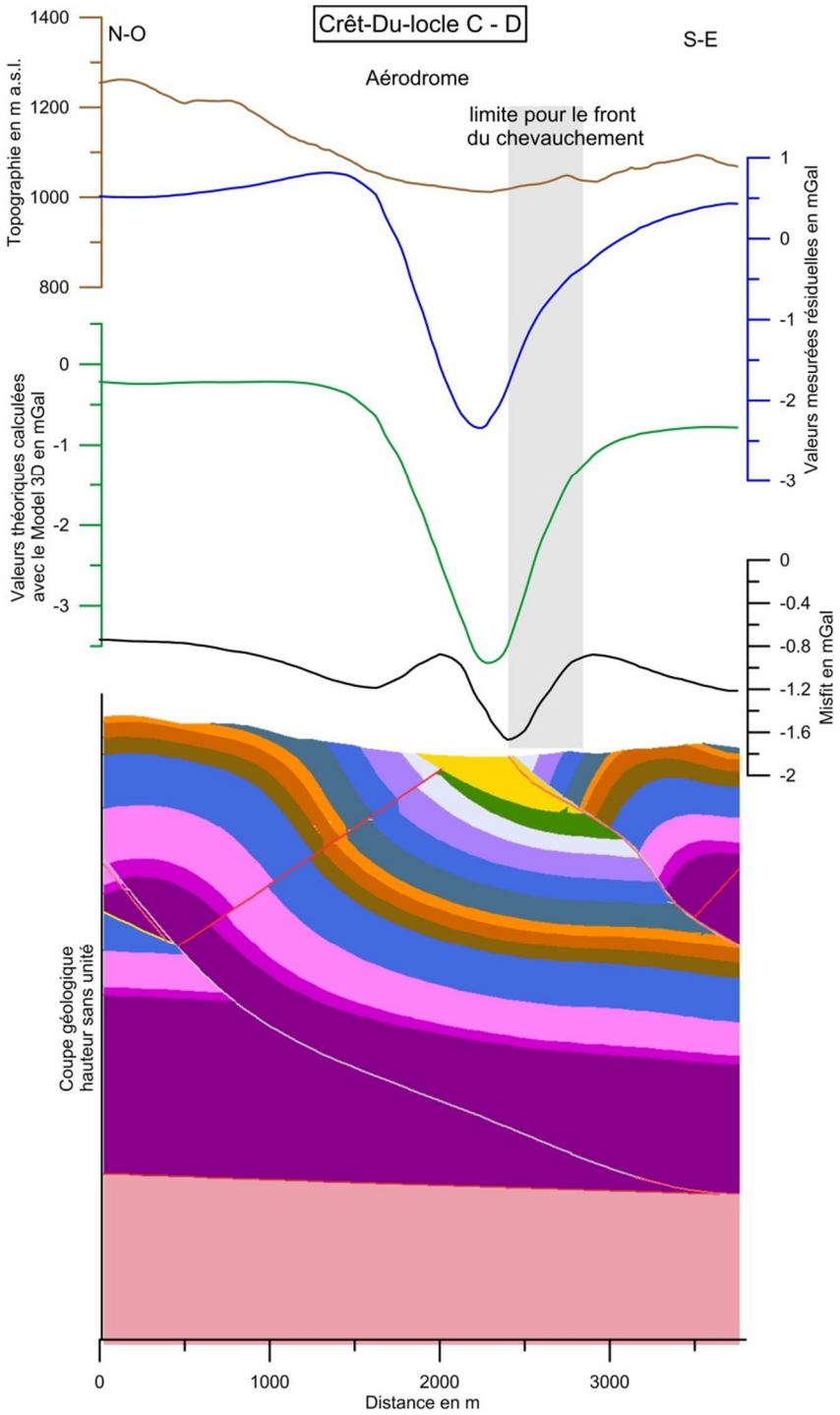



*Figure IV - 18. Comparaison du profil gravimétrique C-D sur la zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 16). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4.*

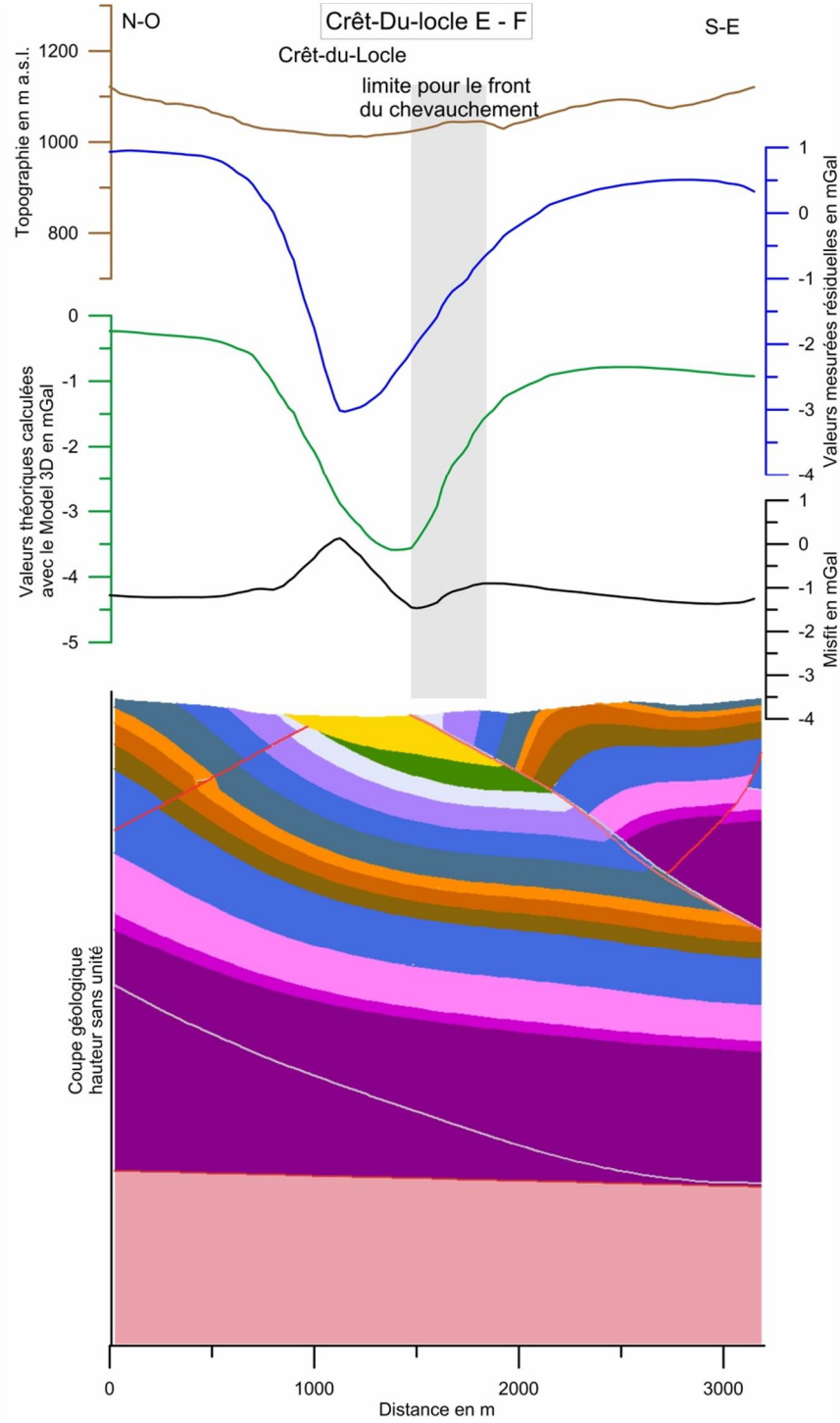



*Figure IV - 19. Comparaison du profil gravimétrique E-F sur la zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 16). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après correction des valeurs mesurées (courbe bleue) ; valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par la soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire). En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure IV - 5). Sur la coupe géologique, les sédiments post-mésozoïques sont en jaune. Les formations géologiques du Crétacé (toit du Mésozoïque) sont en vert. Les autres formations du Mésozoïque correspondent à la pile stratigraphique présentée en Figure IV - 4.*

En conclusion pour la zone du Crêt-du-Locle, basée sur l'analyse des profils, ainsi que sur la carte de Misfit, le modèle géologique 3D permet:

- de bien reproduire la géométrie et l'épaisseur des formations mésozoïques formant les trois aquifères profonds (Malm, Dogger et Muschelkalk) dans les secteurs où il n'y a pas de formations du Crétacé ;
- de mettre en évidence l'existence de problèmes dans la géométrie et l'épaisseur des formations du Crétacé, qui forme le toit du Mésozoïques ;
- de mettre en évidence des erreurs dans l'épaisseur des sédiments post-mésozoïques, qui sont le plus souvent sous-estimés ;
- de mettre en évidence de légères différences au niveau des géométries des formations le long des contacts du rétro-chevauchement, ainsi que du chevauchement.

Comme cela a été montré pour La Chaux-de-Fonds, les erreurs dans la géométrie et les épaisseurs du Crétacé, ainsi que dans les épaisseurs des formations post-mésozoïques ont vraisemblablement des conséquences importantes dans la vallée pour la géométrie et la profondeur des formations géologiques des trois aquifères profonds qui sont en dessous du Crêt-du-Locle.

#### CONCLUSION SUR LA VALIDITE DES MODELES GEOLOGIQUES

Les modèles géologiques réalisés pour la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds montrent leur validité pour les aspects suivants :

- la géométrie des grandes structures, tel que les grands anticlinaux ;
- la répartition et les limites des différents chevauchements ;
- la géométrie relative des couches en profondeur.

En revanche, le modèle géologique 3D présente des problèmes importants en ce qui concerne :

- La géométrie et les épaisseurs des formations du Crétacé ;
- la géométrie et les épaisseurs des formations post-mésozoïques ;
- la profondeur exacte des différents formations ne peut pas être confirmée en revanche pour les aquifères profonds ;
- L'orientation exacte des structures le long des plans de rétro-chevauchement et de chevauchement, lorsque les inclinaisons de ses plans sont très faibles.

Ces lacunes dans le modèle géologique 3D sont dues au manque d'information géologique sur les orientations et les épaisseurs des structures géologiques.

Le modèle géologique 3D de cette région représente une base indispensable dans l'étude du potentiel géothermique. Toutefois, pour les raisons expliquées ci-dessus, il n'est pas encore assez précis pour pouvoir déterminer avec'exactitude la profondeur réelle des trois aquifères profonds potentiels.

### 2.4.6 Effet de la karstification et de la fracturation

Une comparaison de la carte des anomalies gravimétriques résiduelles (Figure IV - 8 et Figure IV - 9) avec le positionnement des karsts connus (information fournie par l'ISSKA) pour la région de Le Locle – La Chaux-de-Fonds (carte non présentée ici) a montré qu'il n'y avait aucune corrélation apparente entre les karsts et les anomalies gravimétriques. Plusieurs raisons permettent d'expliquer cela. Tout d'abord, aucune station gravimétrique n'a été faite à l'aplomb d'un karst, ce qui limite les effets de ces derniers sur les mesures effectuées. De plus les karsts répertoriés dans cette région sont le plus souvent de taille modeste, et par conséquent les volumes de vide engendrés par ces karsts ne sont

pas suffisants pour créer des anomalies gravimétriques détectables par ces investigations. Individuellement les effets gravifiques de ces micro-karsts, si il y en a, ne sont pas détectable par cette étude. Toutefois, il est possible qu'à l'échelle du massif calcaire les effets gravimétriques de la micro-karstification soit détectables par les mesures gravimétriques. Cela pourrait expliquer les faibles variations gravimétriques mesurées (<0.2 mGal), qui sont disséminées dans les zones de La Chaux-de-Fonds (Figure IV - 8) et de celle du Crêt-du-Locle (Figure IV - 9).

Pour les aquifères du Malm et du Dogger, les valeurs de densité des formations majoritairement calcaires mesurées dans le cadre du projet IGS-NE ont montré que ces formations ont le plus souvent des densités de 2.67 à 2.71 $g.cm^{-3}$. Ces valeurs mesurées ont été obtenues sur des échantillons prélevés dans le canton de Neuchâtel, qui sont ni fracturés, ni karstifiés (Tableau IV - 1). Les modèles gravimétriques calculés pour cette région (Figure IV - 10 et Figure IV - 11), qui représentent au mieux les cartes d'anomalies résiduelles, ont été obtenus avec des valeurs de densité entre de 2.60 et 2.66 $g.cm^{-3}$ pour ces aquifères (Tableau IV - 1). Cette différence de densité correspond à une diminution relative de 1 à 4% des valeurs mesurées.

Pour les formations calcaires du Crétacé, les différences de densité peuvent atteindre 8% entre les valeurs mesurées et les valeurs du modèle. Les calcaires du Crétacé ont été mesurés avec des densités de 2.64 à 2.67 $g.cm^{-3}$, tandis que les valeurs du modèle sont le plus souvent entre 2.5 et 2.62 $g.cm^{-3}$ (équivalant à environ 4% ou moins). Dans la zone du Crêt-du-Locle, les valeurs du modèle sont plus basses atteignant 2.45 (environ 8% de différence). Ces valeurs sont certainement trop basses et sont comme il a été dit précédemment, dues à des problèmes dans la géométrie de la formation du Crétacé, qui ne correspond pas assez à la réalité.

Pour des différences de densité de 4% ou moins entre les valeurs du modèle et les valeurs mesurées, plusieurs causes peuvent être mises en avant. Au vu du nombre important de facteurs influençant les modèles, ces variations de densité ne peuvent pas être attribuées uniquement à une seule cause. Le plus vraisemblable est que ces diminutions de densité soient dues :

- majoritairement à de la fracturation au niveau des zones de front de chevauchement ;
- en partie à de la karstifiaction (micro et macroscopique), ainsi qu'à de la fracturation tectonique dans les vallées et sur les reliefs ;
- à des imperfections dans la géométrie des formations calcaires du modèle géologique.

# 3. Modélisation des zones de forage potentielles et analyse des zones de fracturation

## 3.1 Modélisation dans les zones de forage potentielles

Un calcul plus fin, avec une résolution de 50 m horizontalement et verticalement, a également été effectué à l'intérieur du modèle Détail 2, autour des zones de forage potentielle situé à l'est de la Chaux-de-Fonds et au Crêt-du-Locle. Ces zones ont été suggérées par la Ville de La Chaux-de-Fonds en fonction des projets de développement urbain de la ville. Ces modèles de 2 x 2 km et 3 x 3 km, présentés sur la Figure IV - 20 permettent de visualiser la géométrie des trois aquifères potentiels pour une exploitation géothermique dans ces zones. Des logs synthétiques ont également été réalisés sur des zones de 1 x 1 km (Figure IV - 20) pour les sites de forage potentiels.

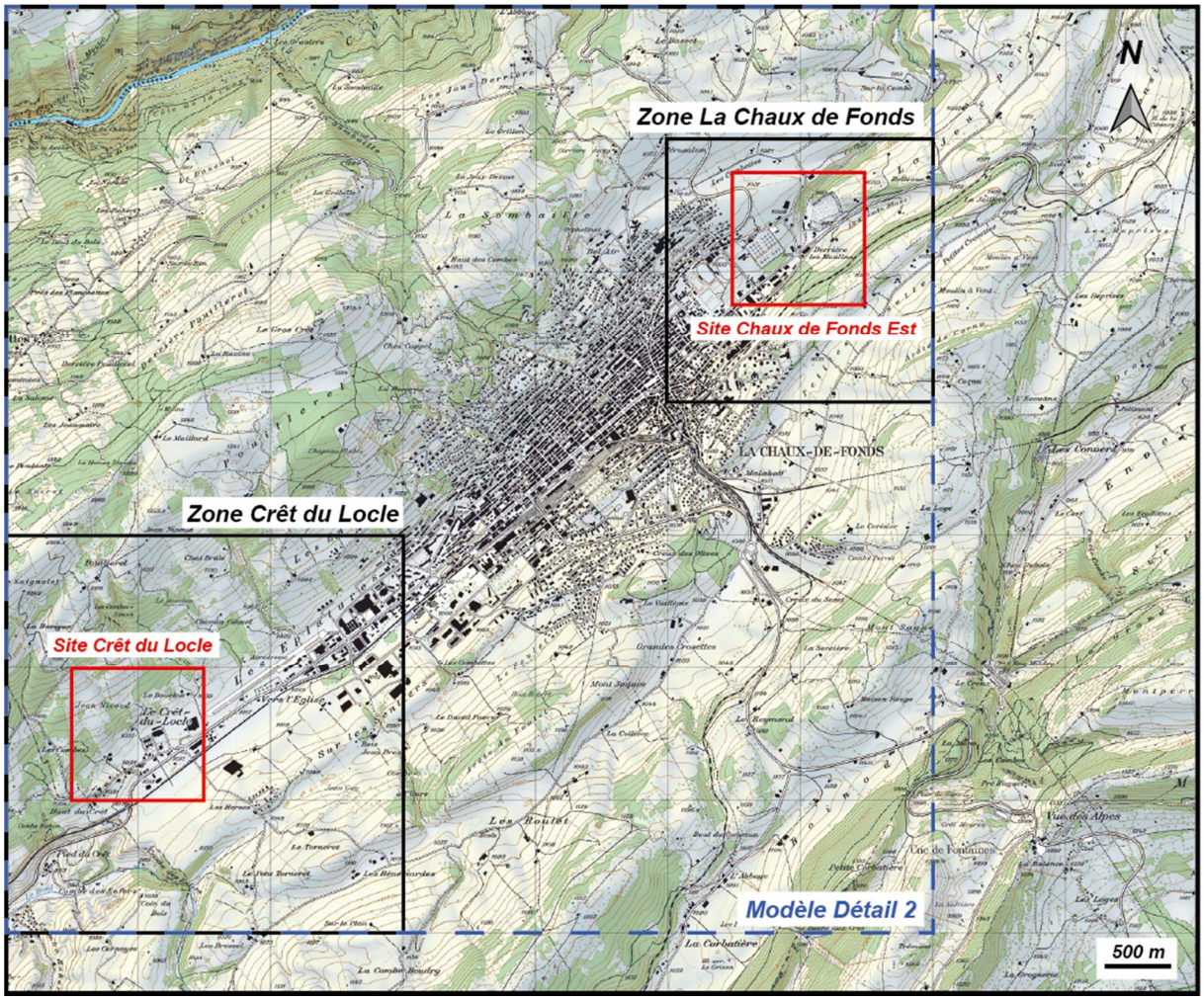



*Figure IV - 20. Localisation des modèles détaillés pour les zones de forage potentielles Crêt-du-Locle et La Chaux-de-Fonds. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

# 3.2 Modèle pour la zone La Chaux-de- Fonds

## 3.2.1 Modèle géologique 3D

Le modèle raffiné pour la zone de La Chaux-de-Fonds a été calculé autour du site choisi par la Ville de la Chaux-de-Fonds pour l'installation potentielle d'un forage (Figure IV - 20). Le modèle montre que dans cette zone, l'aquifère du Muschelkalk se trouve répété du fait de la présence d'un chevauchement en profondeur (Figure IV - 21). Cependant cette zone n'est affectée par aucun décrochement (Figure IV - 21).

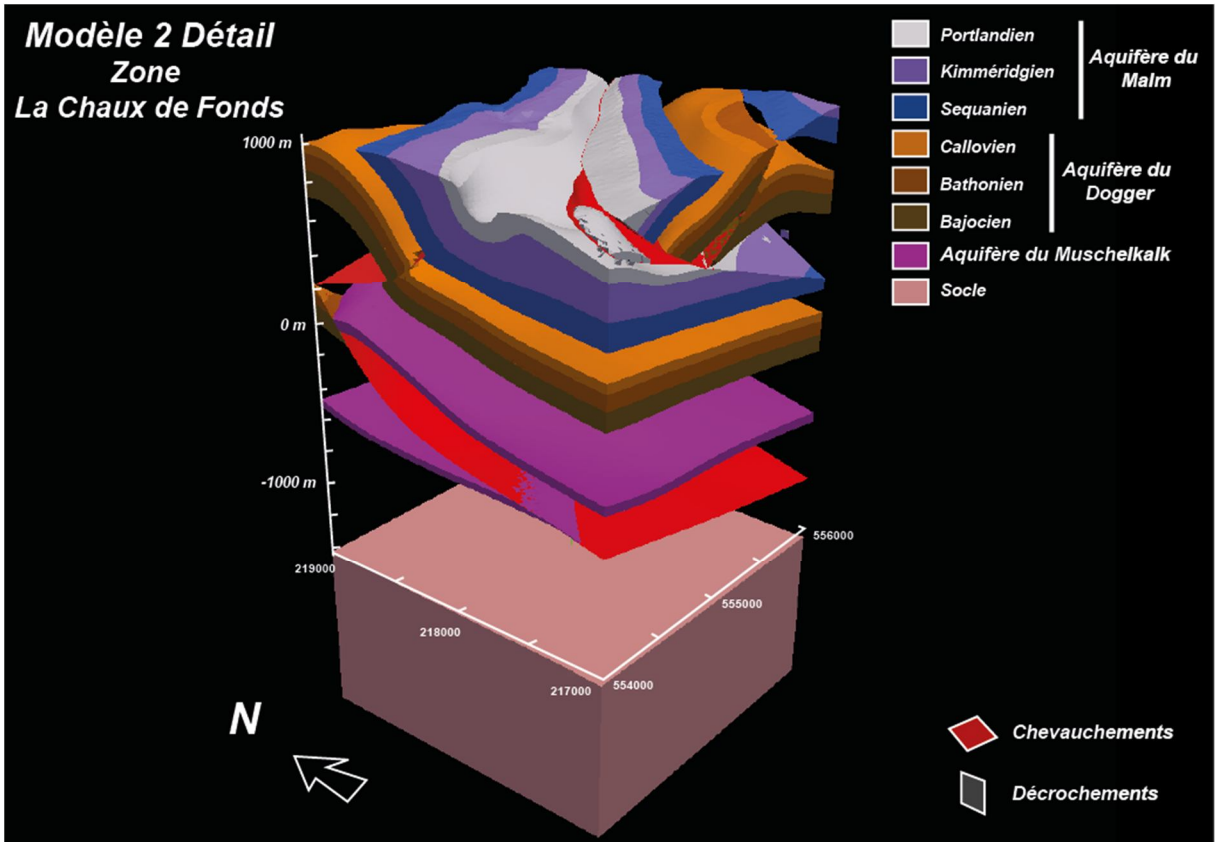



*Figure IV - 21. Extrait du modèle Détail 2 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone La Chaux-de-Fonds. Localisation sur la Figure IV - 20.*

# 3.3 Modèle pour la zone Crêt-du-Locle

## 3.3.1 Modèle géologique 3D

Le modèle raffiné pour la zone Crêt-du-Locle a été calculé dans une zone suggérée par la Ville de La Chaux-de-Fonds pour l'installation potentielle d'un forage (Figure IV - 20). La structure est assez similaire à la zone de La Chaux-de-Fonds. Il faut cependant noter la présence d'un retrochevauchement affectant les aquifères du Malm et du Dogger (Figure IV - 22). Il n'y a pas non plus de décrochement identifié dans cette zone, et l'aquifère du Muschelkalk n'est pas dédoublé (Figure IV - 22).

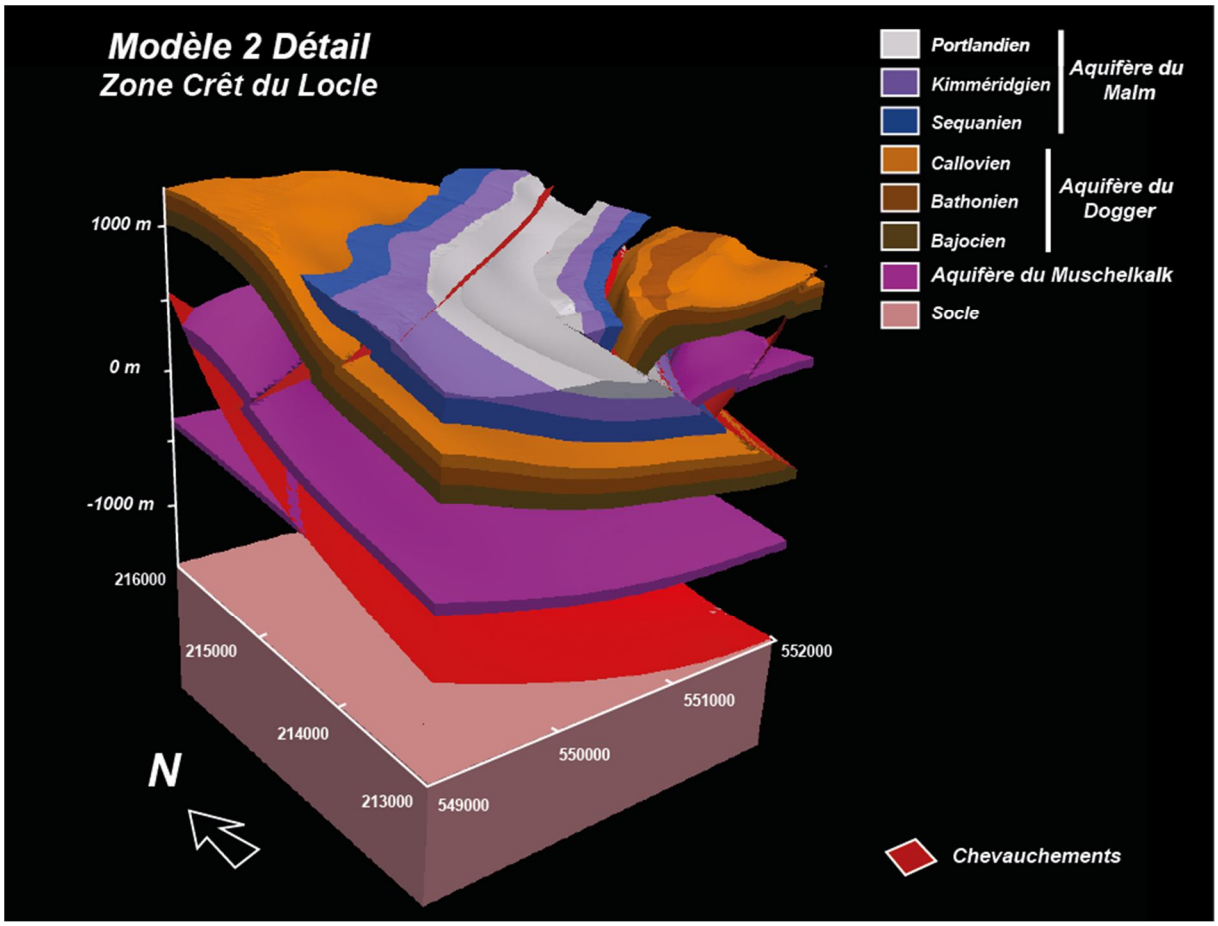
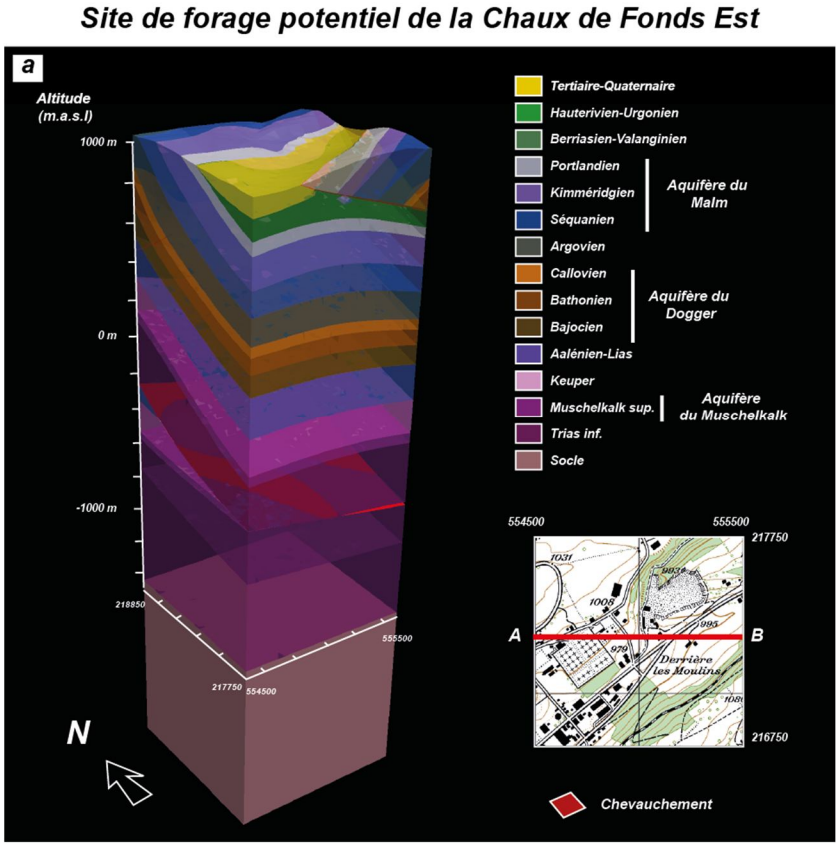


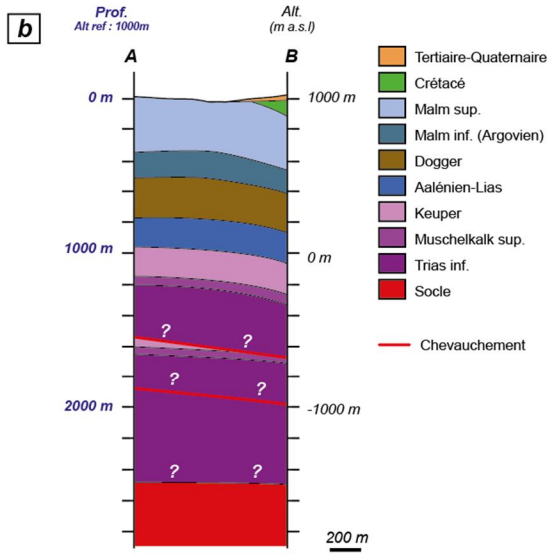

*Figure IV - 22. Extraits du modèle Détail 2 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk dans la zone Crêt-du-Locle. Localisation sur la Figure IV - 20.*

## 3.4 Etude de sites de forage potentiels

### 3.4.1 Modèle pour le site de La Chaux-de-Fonds Est

La localisation du modèle raffiné du site de La Chaux-de-Fonds Est a été choisie en accord avec le choix de site donné par la Ville de la Chaux-de-Fonds. La zone de 1x1 km couvre la zone sélectionnée. La Figure IV - 23a montre la géométrie en 3D de l'ensemble de la pile stratigraphique. La Figure IV - 23b correspond à un log de forage synthétique représentatif de la zone, et la Figure IV - 23c donne la profondeur du toit des trois aquifères potentiels dans la zone sélectionnée. L'aquifère du Muschelkalk est sur ce site présent à deux profondeurs différentes. Les incertitudes sur les profondeurs sont estimées à partir de la variabilité des épaisseurs de chaque formation. La position des plans de chevauchement reste hypothétique ainsi que l'interface entre le socle et la couverture (Figure IV - 23b).



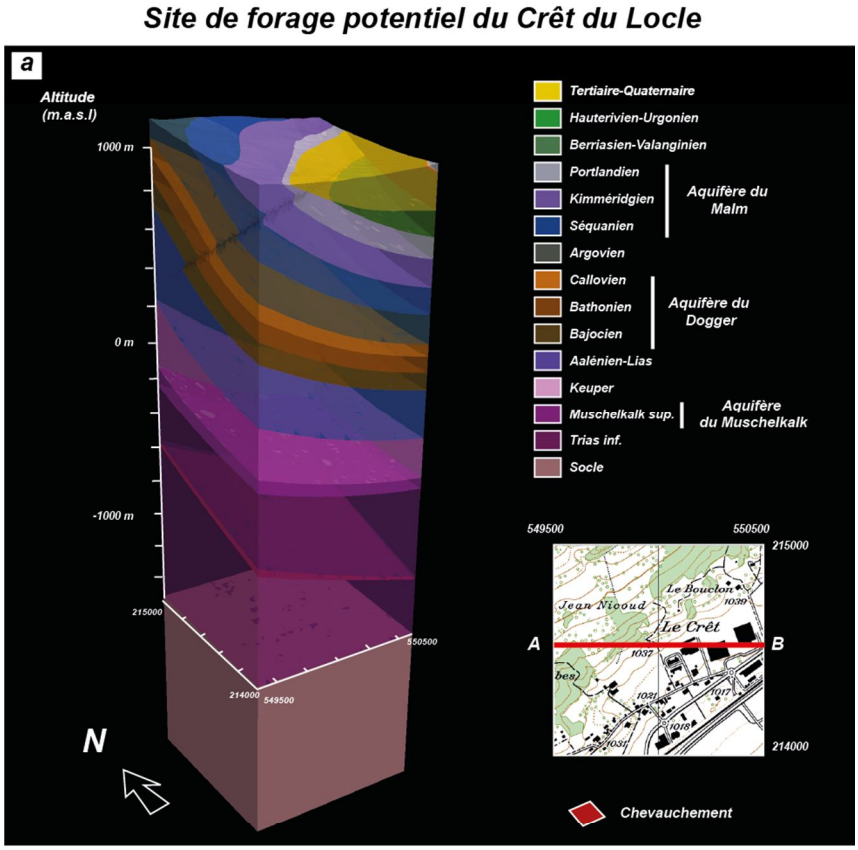

c

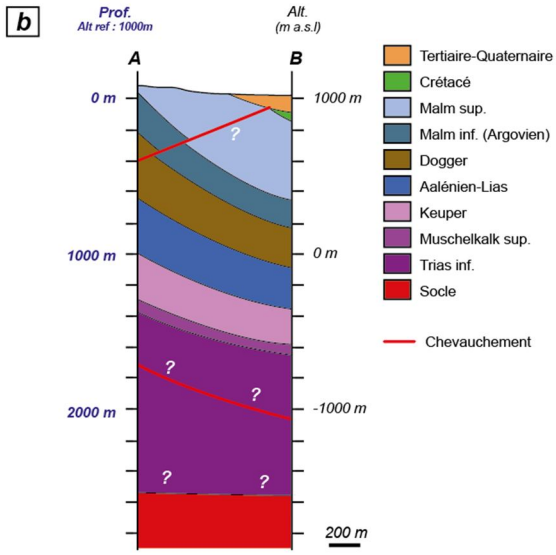
| Aquifères potentiels | Profondeur (Toit) | Incertitude |
|---|---|---|
| ***Malm sup.*** | 0-100 m | ±50 m |
| ***Dogger*** | 500-700 m | ±100 m |
| ***Muschelkalk sup.*** | 1150-1250 m | ±200 m |
| | 1600-1700 m | ±300 m |

*Figure IV - 23. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel de La Chaux-de-Fonds Est. (b) Colonne synthétique de forage. (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation sur la Figure IV - 20.*

### 3.4.2 Modèle pour le site de Crêt-du-Locle

La localisation du modèle raffiné du site du Crêt-du-Locle a été choisie en accord les indications de la Ville de La Chaux-de-Fonds. La zone de 1x1 km a été placée légèrement au NO du Crêt-du-Locle en raison de la présence d'une zone de protection des eaux souterraines S2. La Figure IV - 24a montre la géométrie en 3D de l'ensemble de la pile stratigraphique. La Figure IV - 24b correspond à un log de forage synthétique représentatif de la zone, et la Figure IV - 24c donne la profondeur du toit des trois aquifères potentiels dans la zone sélectionnée. Les incertitudes sur les profondeurs sont estimées à partir de la variabilité des épaisseurs de chaque formation. La position des plans de chevauchement est hypothétique ainsi que l'interface entre le socle et la couverture (Figure IV - 24b).




c

| Aquifères potentiels | Profondeur (Toit) | Incertitude |
|---|---|---|
| ***Malm sup.*** | 0-300 m | ±50 m |
| ***Dogger*** | 300-900 m | ±100 m |
| ***Muschelkalk sup.*** | 1400-1600 m | ±200 m |

*Figure IV - 24. (a) Modèle géologique 3D du site de forage potentiel du Crêt-du-Locle. (b) Colonne synthétique de forage (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure IV - 20.*

# 4. Potentiel géothermique

## 4.1 Modèle thermique régional

### 4.1.1 Paramètres du modèle

Le modèle thermique régional a été réalisé par le bureau Geowatt à Zurich sur la base d'un maillage par éléments finis réalisé à partir des surfaces géologiques extraites du Modèle 2 (Figure IV - 25). Ce modèle a pour but une première estimation du champ de température dans la région Le Locle – La Chaux-de-Fonds.

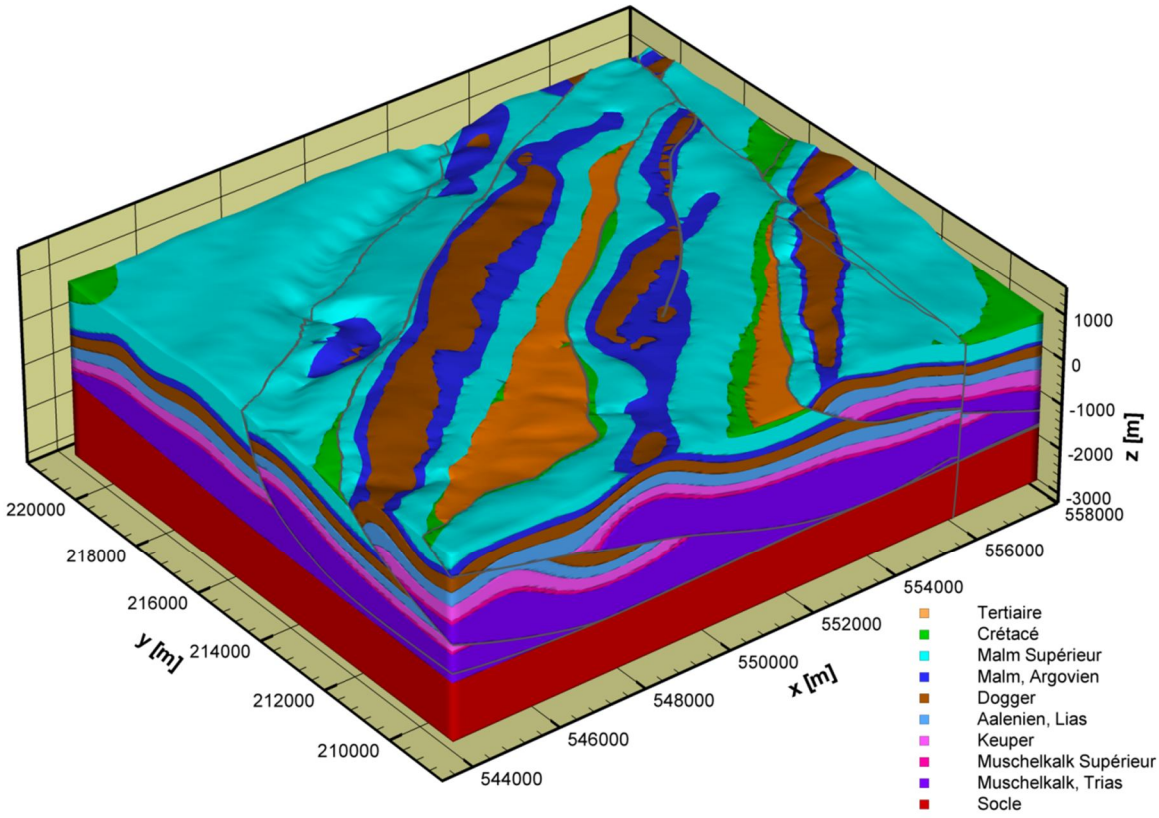



*Figure IV - 25. Modèle 3D régional Le Locle- La Chaux-de-Fonds, vue du sud-est. Système de coordonnées CH1903.*

La température à la surface est montrée dans la Figure IV - 26. Aucun gradient du flux de chaleur n'est cette fois pris en compte, car le modèle de La Chaux-de-Fonds est situé dans un contexte plus homogène que le modèle de Neuchâtel - St Blaise. Une valeur de 75 $mW/m^2$ est appliquée, afin d'assurer la continuité avec le précédent modèle. La Figure IV - 27 montre les résultats de la calibration. Une comparaison est faite les données des forages les plus proches de la zone d'étude. Les résultats montrent une température en profondeur légèrement moins élevée qu'au niveau du modèle de Neuchâtel-St. Blaise. La différence est de l'ordre de 5°C à 2'500 m.

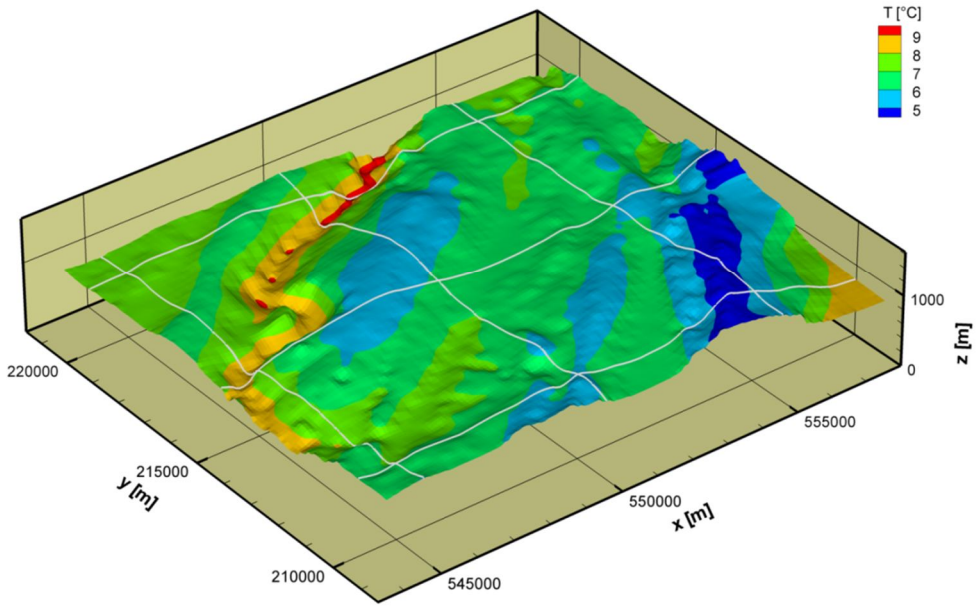



*Figure IV - 26. Température à la surface définie pour le modèle régional Le Locle - La Chaux de Fonds*

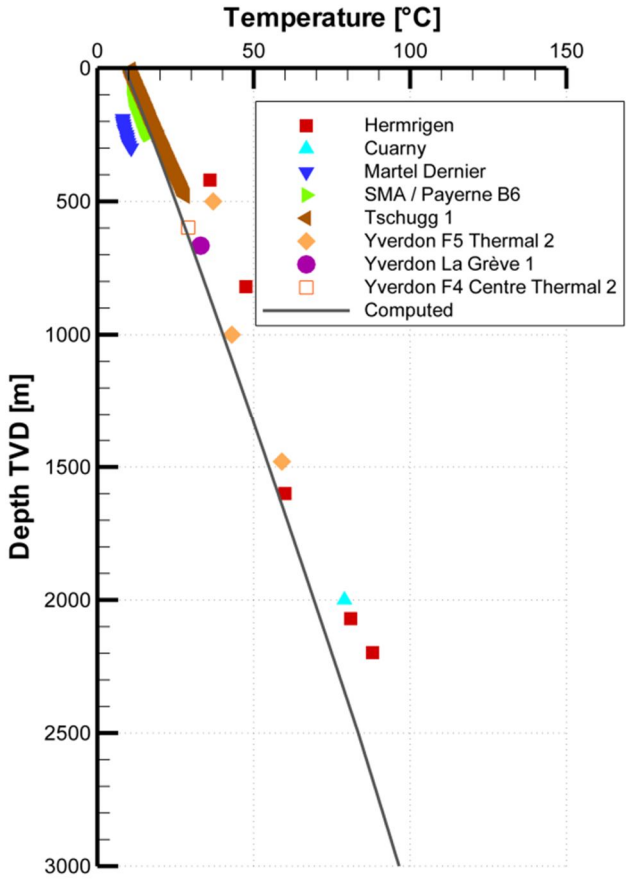



*Figure IV - 27. Résultats de la calibration du modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds*

La Figure IV - 28 montre une vue 3D de la température calculée dans le modèle. On peut noter que le maillage a été réalisé différemment que dans le cas du modèle de Neuchâtel-St. Blaise. Pour le modèle de La Chaux-De-Fonds, un procédé de maillage automatique à partir du modèle géologique a été mis en place. Cette différence de procédé n'a pas d'impact qualitatif sur les résultats.

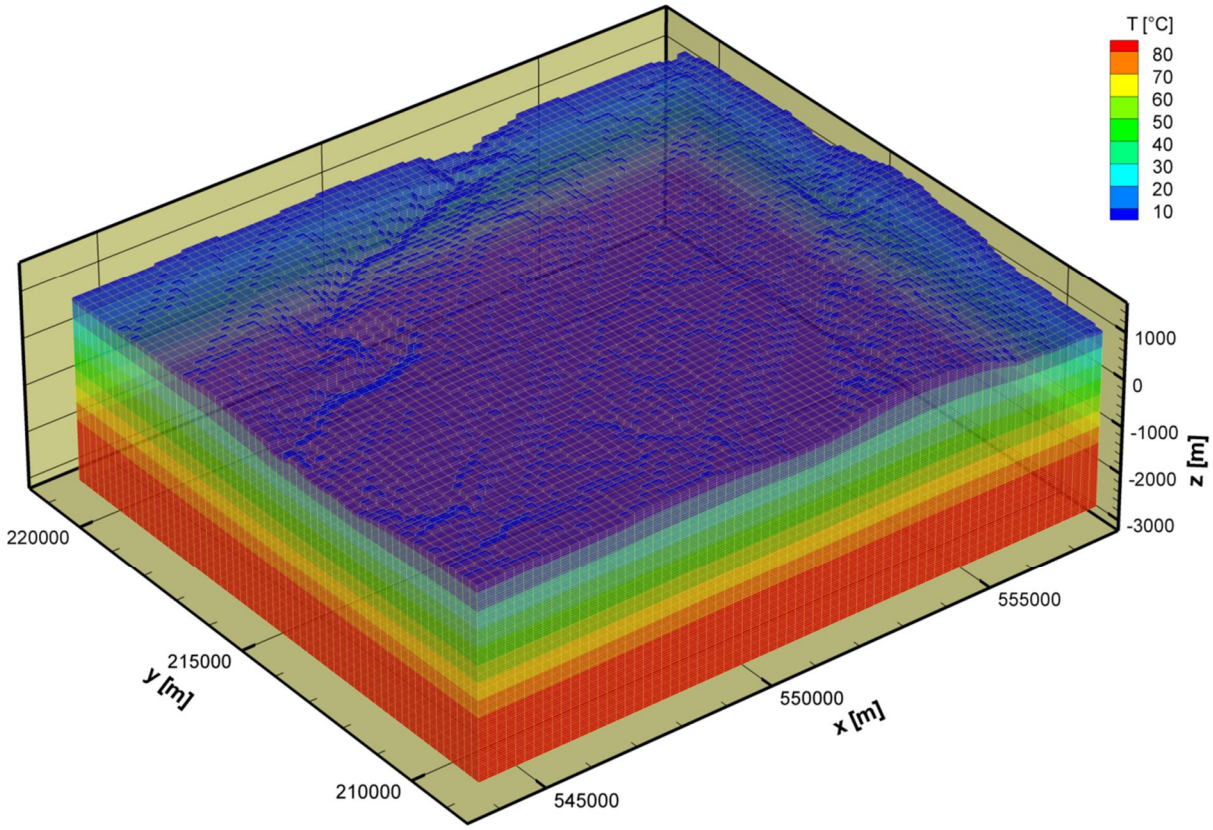



*Figure IV - 28. Vue en 3D de la température calculée dans le modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds.*

## 4.1.2 Température dans les aquifères

La distribution des températures au toit des aquifères potentiels est présentée dans les cartes des Figure IV - 29 à Figure IV - 31. La même tendance générale se dégage de ces trois cartes, avec une augmentation de la température en direction du SE liée à la structure des couches sous le synclinal du Locle. Les températures sont froides pour le Malm (10-20°C), atteignent ~40°C pour le Dogger et ~60°C pour le Muschelkalk, dans la partie la plus profonde des aquifères au SE.

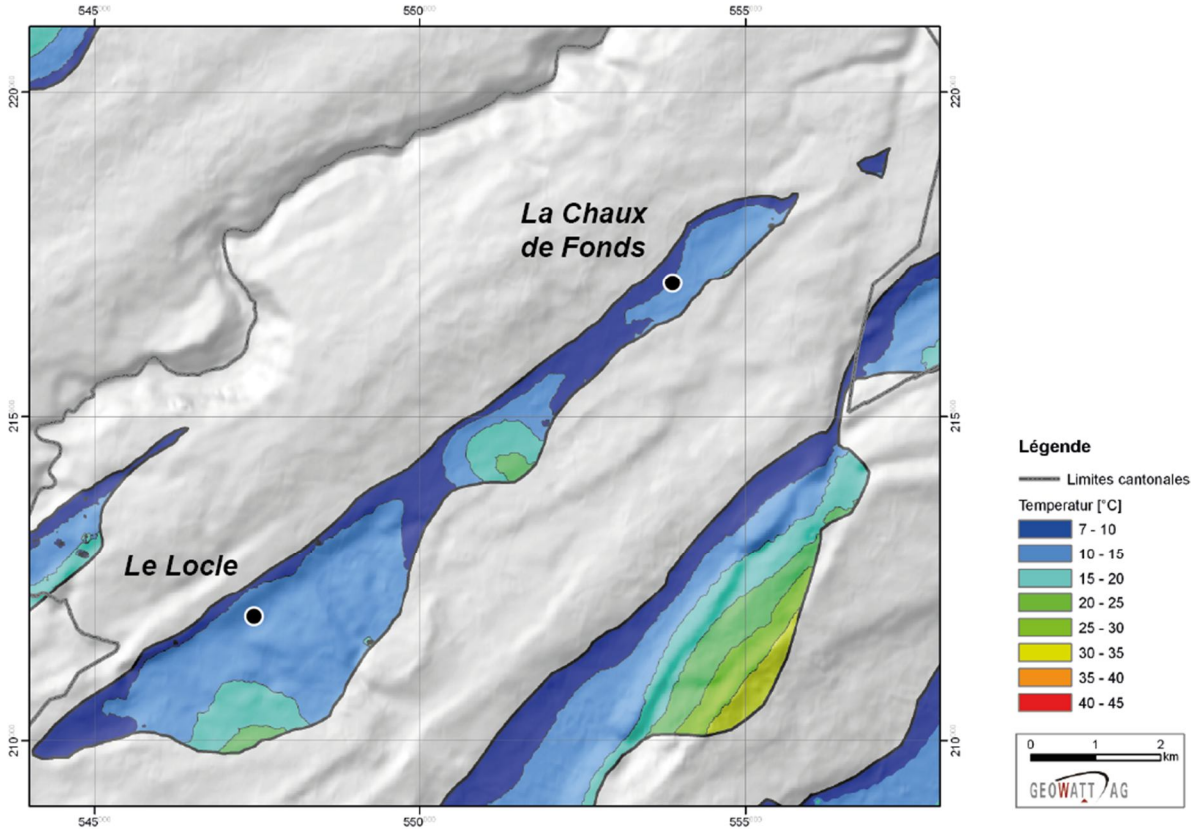



*Figure IV - 29. Température calculée au toit du Malm (modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds)*

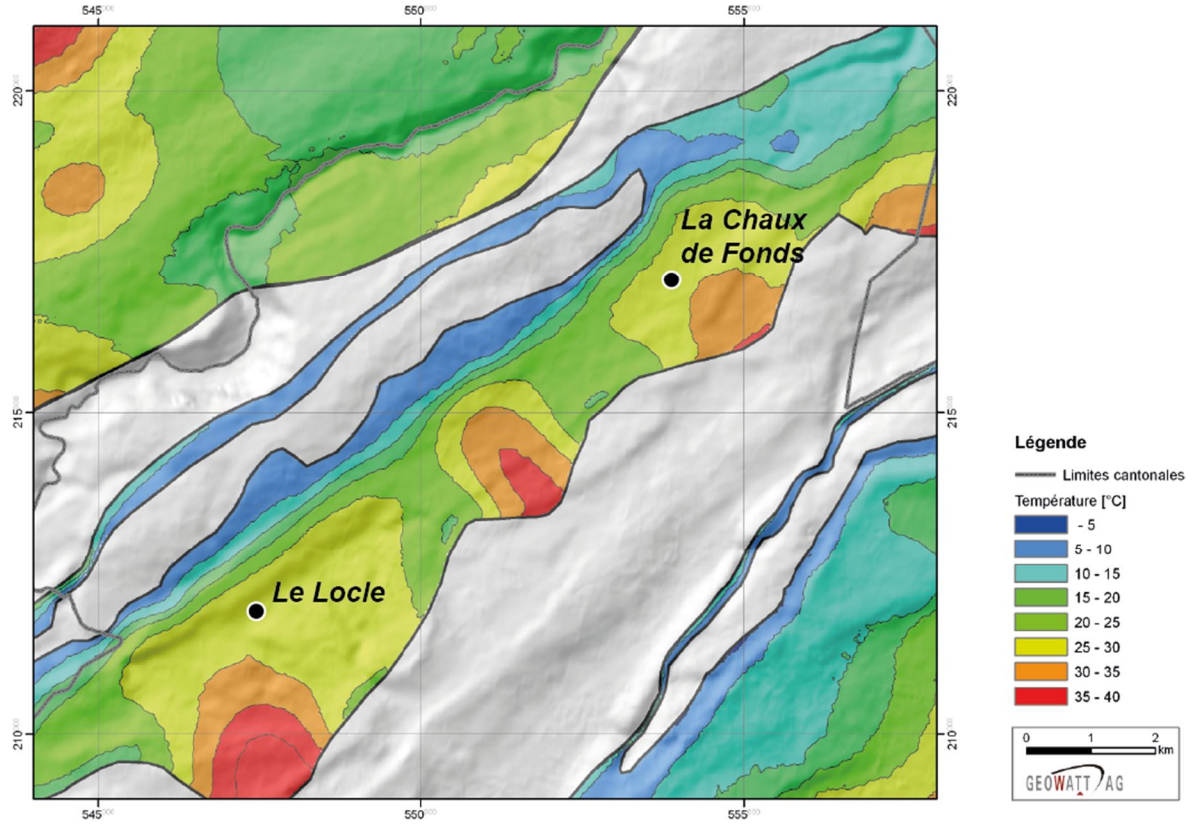



*Figure IV - 30. Température calculée au toit du Dogger (modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds)*

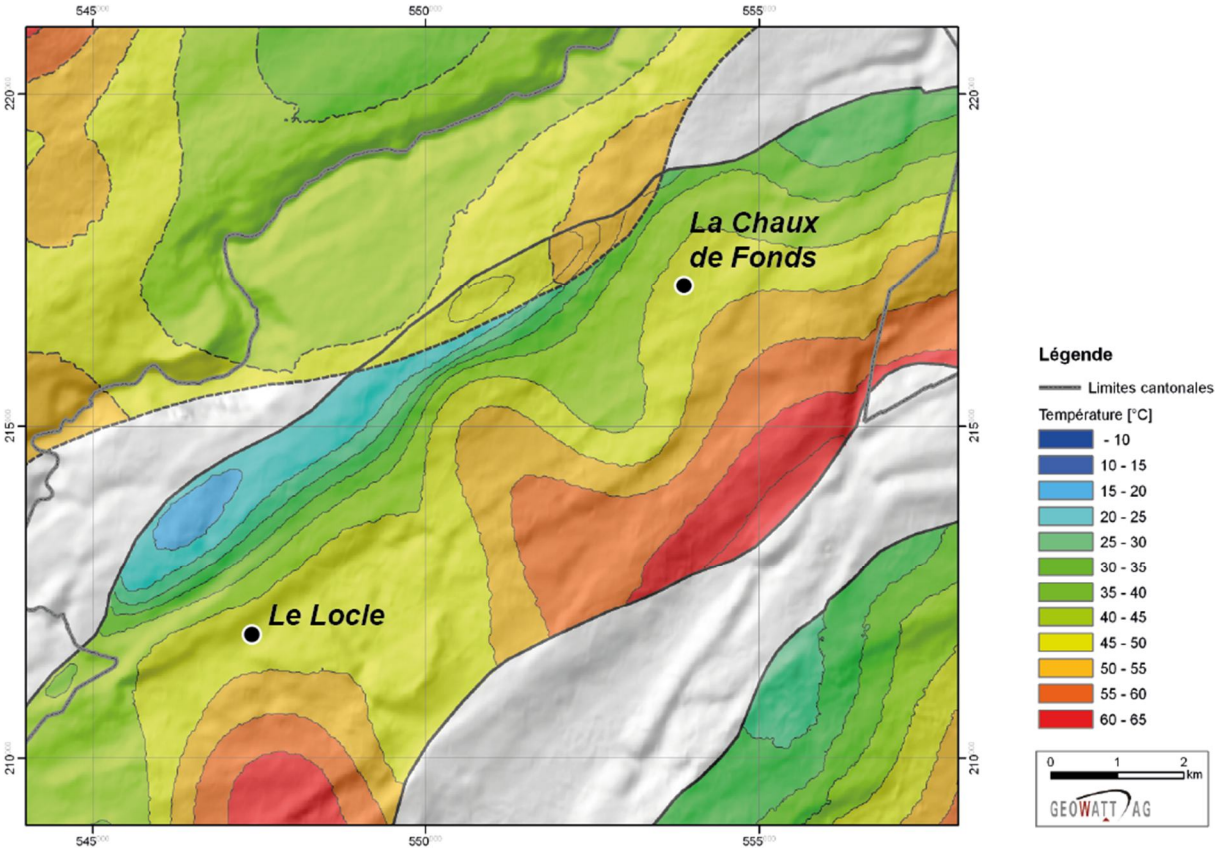



*Figure IV - 31. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle régional Le Locle - La Chaux-de-Fonds)*

## 4.2 Modèles thermiques de détail

### 4.2.1 Paramètres des modèles

Les modèles ont été réalisés à l'aide du module de modélisation directe de température du logiciel Geomodeller (BRGM, Intrepid geophysics). Le modèle géologique 3D utilisé est le modèle Détail 2 (cf §2), qui prend en compte avec plus de détail la structure géologique. Les paramètres de conductivité thermique et de production de chaleur sont ceux présentés au Chapitre II.

La température à la surface a été fixée à 8°C pour les modèles normaux (sans effet du karst), ce qui correspond à la moyenne annuelle des températures enregistrées par les stations météorologiques cantonales pour le nord du canton. Cette température est fixe, quelle que soit l'altitude, car le logiciel ne permet pas d'inclure de variations Pour pouvoir déterminer le flux de chaleur à la base du modèle, il est nécessaire de fixer la valeur de ce flux à la surface du modèle. Basé sur les données de la littérature le flux de chaleur a été fixé à 75 $mW.m^{-2}$ à la surface du modèle (Données de l'Atlas de la Suisse et de Medici & Rybach, 1995). Le résultat obtenu à la base du modèle, c'est-à-dire à -2500 m.s.m, indique que le flux calculé est de 68 $mW.m^{-2}$. Un détail de la procédure de calcul est décrit dans le Chapitre II.

Pour les modèles incluant l'effet potentiel de circulation d'eaux froides dans le Malm, la température a été fixée à 10°C à la base du Malm supérieur. Cette hypothèse correspond à un scénario extrême où les écoulements dans le karst annulent totalement le gradient géothermique, ce qui est peu réaliste. Cependant elle permet de calculer des températures minimales pour les différents aquifères. Cette température est en bon accord avec la température observée dans le forage de

Martel-Dernier, situé dans un contexte géologique similaire, où la température mesurée à 300 m de profondeur est de 10.8°C dans l'aquifère du Malm (Schärli & Kohl, 2002). Les paramètres des différents modèles sont résumés dans le Tableau IV - 2.

*Tableau IV - 2. Paramètres utilisés pour les modèles thermiques détaillés de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds.*

| **Zone - Site** | **Flux base du modèle ($mW.m^{-2}$)** | **T Surface (°C)** | **T Base Malm sup. (°C)** |
|---|---|---|---|
| Le Locle - La Chaux de Fonds | 68 | 8 | |
| Site La Chaux de Fonds Est | 68 | | 10 |
| Site Crêt du Locle | 68 | | 10 |

## 4.2.2 Température dans les aquifères

La distribution des températures au toit des aquifères du Dogger et du Muschelkalk est présentée sur les Figure IV - 32 et Figure IV - 33 respectivement. On retrouve la même tendance que sur les modèles régionaux avec une augmentation de la température en direction du SE liée à la structure des couches sous le synclinal du Locle. Les températures estimées sont assez cohérentes entre les modèles régionaux et les modèles détaillés, avec de valeurs légèrement plus faibles pour les modèles détaillés, liées à une valeur de flux de chaleur inférieure. Les températures les plus élevées sont observées au SE de la Chaux-de-Fonds et atteignent ~35°C pour le Dogger et ~55°C pour le Muschelkalk.

Le Tableau IV - 3 présente la synthèse des estimations de température pour les sites potentiels de forage du Crêt-du-Locle et de La Chaux-de-Fonds Est. Pour les deux sites, le modèle karst montre des températures de 4 à 7°C inférieures au modèle normal. Ces valeurs sont des minima et ne correspondent pas forcément à la réalité.

*Tableau IV - 3. Bilan des températures estimées pour les sites de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds.*

| **Aquifère** | **Site Crêt-du-Locle** | | | **Site La Chaux-de- Fonds Est** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Profondeur moyenne (m)** | **Température moyenne et écart-type (°C)** | | **Profondeur moyenne (m)** | **Température moyenne et écart-type (°C)** | |
| | | Non karstifié | Karstifié | | Non karstifié | Karstifié |
| Malm | 250 | 13 ± 2 | 10 (fixé) | 200 | 12 ± 2 | 10 (fixé) |
| Dogger | 800 | 25 ± 2 | 18 ± 2 | 650 | 23 ± 2 | 18 ± 2 |
| Muschelkalk | 1500 | 44 ± 2 | 37 ± 2 | 1200 | 37 ± 2 | 32 ± 2 |
| Muschelkalk2 | - | - | - | 1650 | 46 ± 1 | 42 ± 1 |

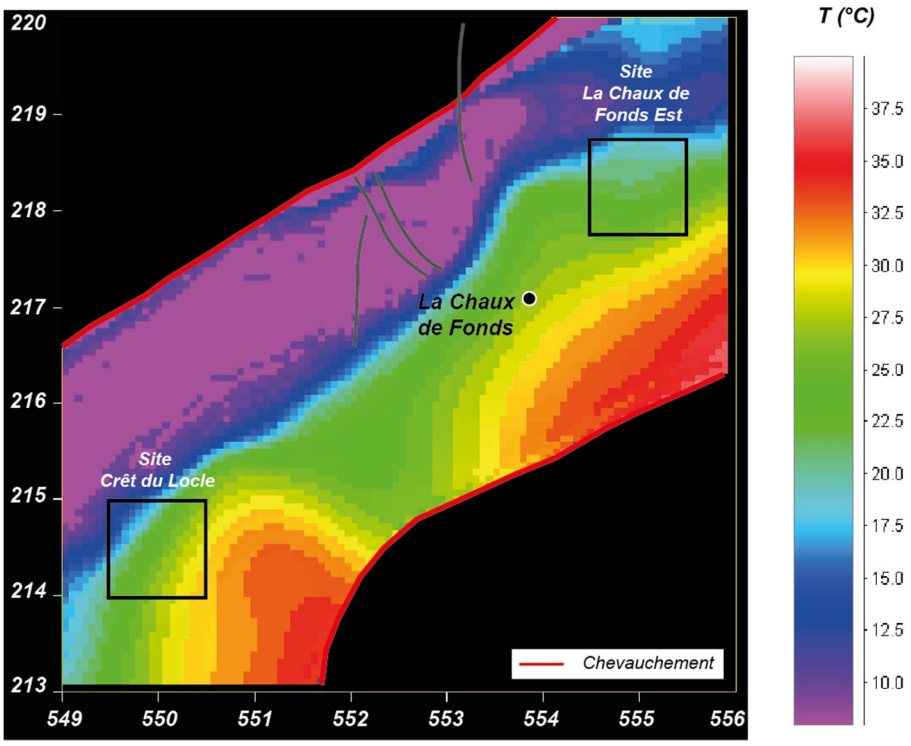



*Figure IV - 32. Température calculée au toit du Dogger (modèle détaillé Le Locle - La Chaux-de-Fonds). Les lignes rouges indiquent la bordure de l'aquifère modélisé et les zones noires cachent les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Dogger.*

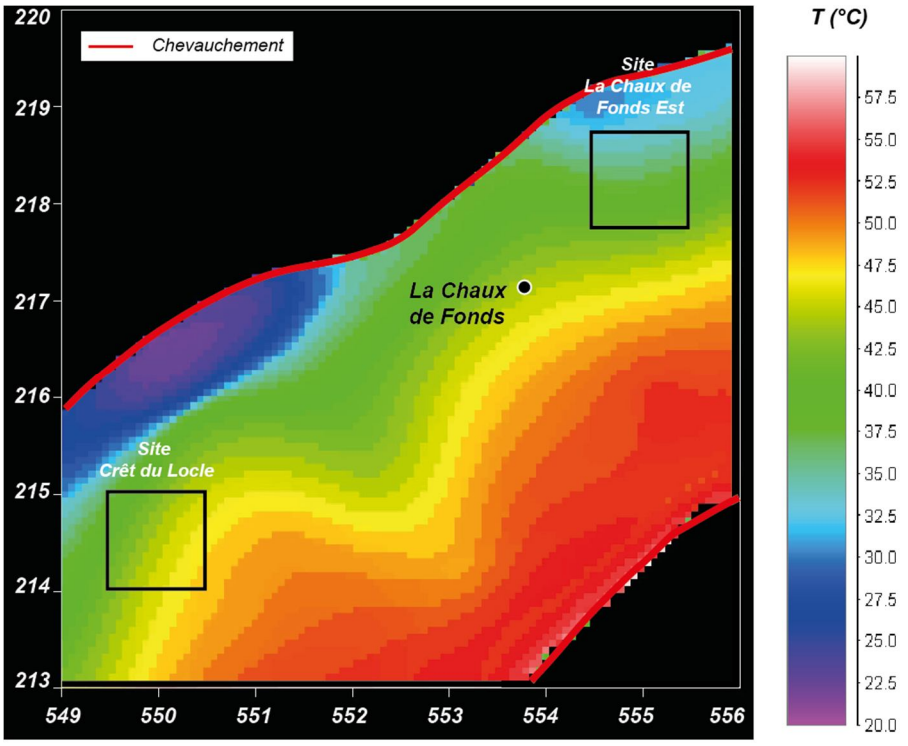



*Figure IV - 33. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle détaillé Le Locle - La Chaux-de-Fonds). Les lignes rouges indiquent la bordure de l'aquifère modélisé et les zones noires cachent les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Muschelkalk.*

# 5. Potentiel d'utilisation de la chaleur

## 5.1 Introduction

Une étude a été confiée au printemps 2011 au Laboratoire d'Energétique Industrielle (LENI), intitulée : Systèmes hybrides pour les installations de géothermie profonde : cas d'étude de La Chaux-de-Fonds. Le rapport final a été fourni en juin 2011 (Gerber & Maréchal, 2011).

Les objectifs de la présente étude étaient les suivants :

- Evaluer le potentiel d'intégration de la chaleur fournie par des forages géothermiques profonds dans les systèmes de chauffage à distance existants à La Chaux-de-Fonds.
- Evaluer le potentiel d'hybridation de la géothermie avec d'autres technologies pour la cogénération d'électricité.

Cette étude permet de simuler et d'intégrer les différentes composantes d'un système de conversion d'énergie géothermique, en prenant en compte les variations saisonnières de la demande en services énergétiques. Une fois les différents modèles créés et couplés, elle permet également de calculer les conditions optimales d'exploitation d'un système par rapport à un ou plusieurs indicateurs de performance économique, thermodynamique ou environnementale selon le problème à résoudre. Le cadre général de la méthodologie est résumé par la Figure IV - 34.

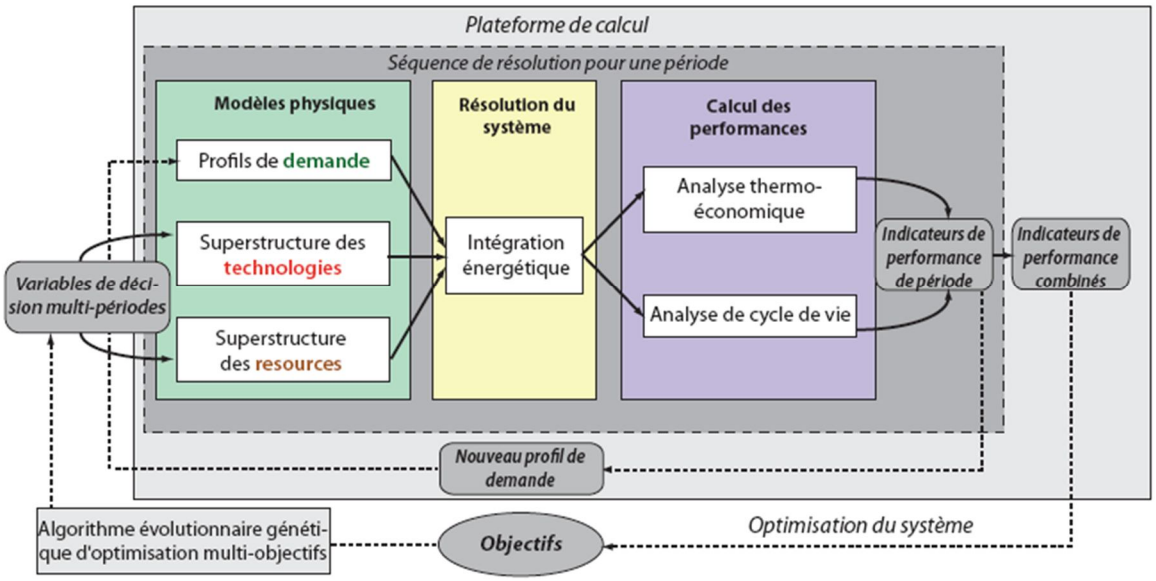



*Figure IV - 34. Cadre général de la méthodologie (Gerber & Maréchal, 2011)*

Les données thermiques de base telles que la demande en chaleur et les températures de départ et de retour sont celles du CAD existant à La Chaux-de-Fonds. Les données géologiques (profondeur, débit et température des deux aquifères potentiels du Dogger et du Muschelkalk) proviennent du rapport final PDGN (Groupe de travail PDGN, 2010).

# 5.2 Etude des systèmes hybrides pour valoriser la ressource géothermique à La Chaux-de-Fonds

## 5.2.1 Scénarios envisagés

Trois types de scénarios ont été envisagés pour la valorisation d'un forage géothermique à La Chaux-de-Fonds, avec ou sans cogénération d'électricité à partir de la géothermie.

### UTILISATION DE POMPES A CHALEUR

Ce scénario a mis en évidence l'intérêt économique d'utiliser la chaleur provenant d'un forage géothermique pour fournir une partie des besoins en chaleur du CAD, via un système de deux pompes à chaleur (PAC) en série permettant de relever suffisamment le niveau de température (Figure IV - 35).

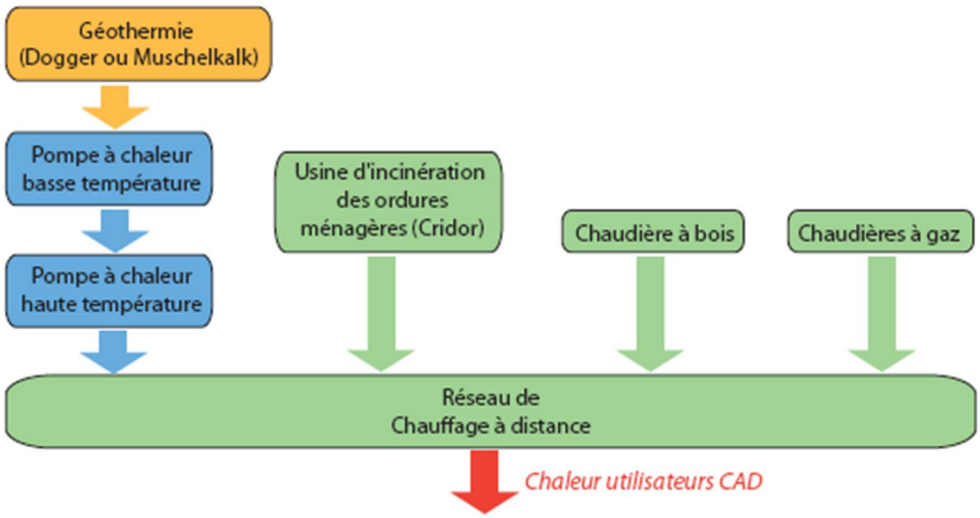



*Figure IV - 35. Schéma du scénario utilisant les PACs pour transmettre la chaleur du forage géothermique au réseau de CAD (Gerber & Maréchal, 2011)*

### COGENERATION DE CHALEUR ET D'ELECTRICITE

Une autre possibilité est la production combinée de chaleur et d'électricité à partir des ressources géothermiques. Les niveaux de température du Dogger et du Muschelkalk étant trop bas pour produire de l'électricité, même avec un cycle binaire opérant à basse température, il faut donc envisager une hybridation avec une autre ressource permettant de fournir de la chaleur à plus haute température. Deux ressources apparaissent intéressantes dans cette optique : l'usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) et le bois provenant de l'exploitation et de l'entretien des pâturages boisés, appelé « bois de débrosse ».

Une possibilité est de passer par le réseau de CAD qui a un niveau de température suffisant pour fournir de la chaleur à un cycle binaire opérant à basse température qui serait construit à proximité du forage géothermique et dont on utiliserait également la chaleur pour la production d'électricité. C'est la solution retenue pour l'utilisation indirecte de la chaleur de l'UIOM, et c'est une deuxième possibilité pour l'utilisation de la chaleur provenant des bois de débrosse, que l'on peut à ce moment-là simplement ajouter à la chaudière à bois existante, ce qui a pour avantage de ne pas devoir construire une nouvelle installation (Figure IV - 36).

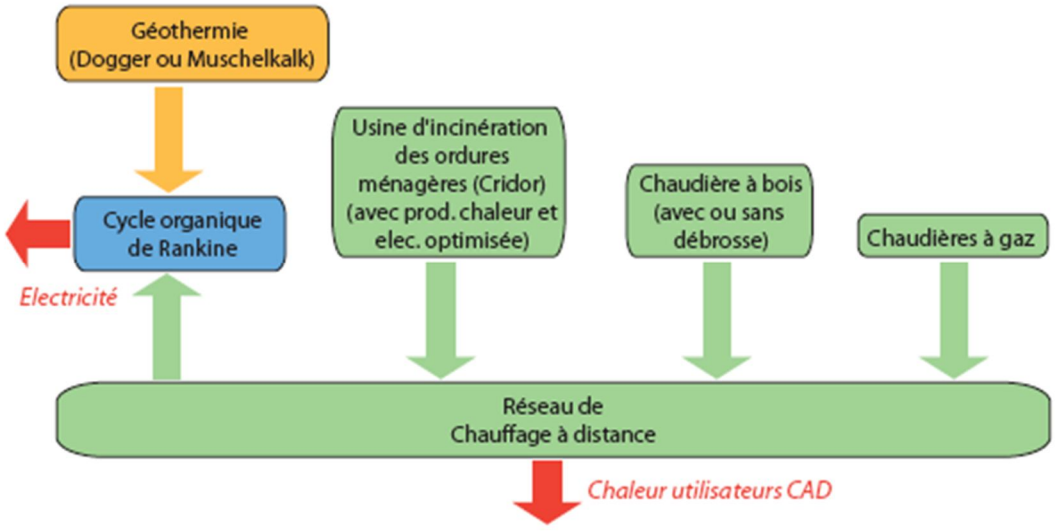



*Figure IV - 36. Schéma du scénario où l'UIOM ou la chaudière à bois, via le réseau CAD, ainsi que le forage géothermique, fournissent de la chaleur à un cycle organique de Rankine pour la production d'électricité (Gerber & Maréchal, 2011)*

### UTILISATION DIRECTE

Finalement, il ne faut pas oublier que le Muschelkalk, pour lequel on s'attend à une température d'environ 50 °C, pourrait être utilisé directement pour fournir de la chaleur à un nouveau quartier remplissant les standards Minergie, avec un nouveau réseau de CAD à basse température qui serait alors découplé du réseau de CAD existant. Cette configuration du système est montrée à la Figure IV - 37. Bien qu'intéressant ce dernier cas ne sera cependant pas traité dans la présente étude, car il nécessiterait des données géographiques et de planification détaillées pour le système de CAD à basse température.

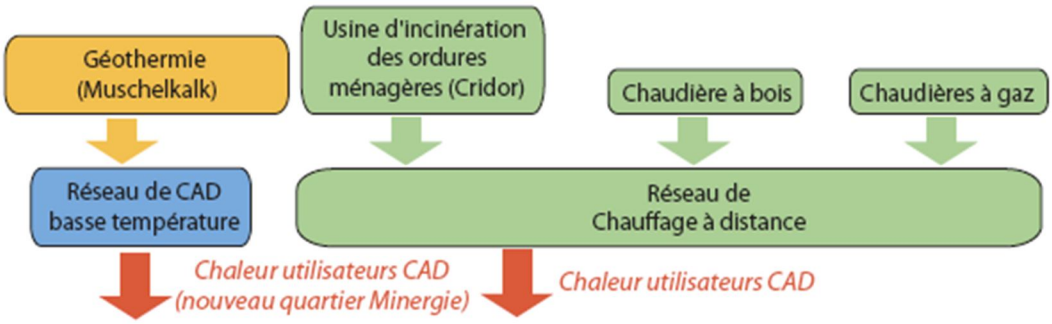



*Figure IV - 37. Schéma du scénario où le forage géothermique fournit directement de la chaleur à un nouveau réseau de CAD basse température pour les quartiers Minergie (Gerber & Maréchal, 2011)*

## 5.2.2 Résultats

Tous les scénarios étudiés ici présentent une amélioration par rapport à la situation actuelle en termes de profits annuels générés. Ceci est dû principalement à la substitution du gaz naturel, plus coûteux que les autres ressources, actuellement utilisé en plus grande quantité que dans les scénarios envisagés. Pour savoir si l'investissement peut être amorti, il faut cependant considérer la durée de vie envisagée et le taux d'intérêt, qui peuvent être variables.

De manière générale, il apparaît que l'utilisation de la géothermie dans des scénarios hybrides ne présente que peu d'avantages économiques, dans le cas d'étude présent et les scénarios considérés. Son utilisation a pour conséquence de faire grimper fortement les coûts d'investissement, pour une augmentation des profits annuels limitée par rapport aux solutions n'utilisant pas la géothermie mais uniquement l'autre ressource. En effet, dans le cas présent, ce sont ces autres ressources, bois de débrosse ou chaleur résiduelle en surplus de l'UIOM, qui sont limitées en disponibilité, ce qui a pour conséquence de limiter la taille des cycles vapeur et ORC. De ce fait, les solutions utilisant la géothermie n'utilisent pas tout son potentiel pour la préchauffe, mais seulement une faible partie. Dans un cas où les ressources potentielles pour l'hybridation seraient disponibles en plus grande quantité, il est possible que la géothermie devienne plus intéressante pour un système hybride de production d'électricité. Ce pourrait être le cas notamment si la capacité de l'UIOM est doublée, ce qui est un scénario envisagé par la société VADEC. Ce pourrait également être le cas si la ressource en biomasse était augmentée, soit par une partie du bois utilisé à présent dans la chaudière du système de CAD, ou si d'autres ressources viennent s'y ajouter.

La performance plus élevée en termes de coûts et d'investissement pour les scénarios utilisant l'ORC provient de l'optimisation du fonctionnement de l'UIOM, qui utilise la chaleur disponible à faible coût opératoire en plus grande quantité et réduit ainsi les coûts liés à l'utilisation de gaz naturel.

Au vu des résultats actuels, il apparaît donc que l'utilisation de PACs reste pour l'instant la meilleure solution pour valoriser un forage géothermique dans un aquifère profond dans la zone de La Chaux-de-Fonds, qu'il s'agisse du Dogger ou du Muschelkalk.

### 5.2.3 Analyse de quelques configurations avec PAC

#### CONFIGURATION 1 - AQUIFERE DU DOGGER ET PAC UNIQUE

L'investissement est limité par l'achat d'une seule PAC, mais les coûts de forage et de canalisation restent les mêmes. Le temps de retour de l'investissement est de l'ordre de 20 ans, ce qui rend cette configuration peu intéressante. Le coefficient de performance annuel (COPA) est de 2.2 (Figure IV - 38).

#### CONFIGURATION 2 - AQUIFERE DU DOGGER ET DEUX PACS

Cette configuration est plus coûteuse, en raison de l'achat de deux PACs, une à basse température et l'autre à haute température. Le retour sur investissement est deux fois plus court, avec 10 ans au maximum. Le COPA est nettement meilleur que dans le cas précédent avec une valeur de 3.6 (Figure IV - 37).

#### CONFIGURATION 3 - AQUIFERE DU MUSCHELKALK ET DEUX PACS

Cette configuration est bien sûr la plus coûteuse, avec des coûts de forage plus élevés et des PACs plus grosses. Cependant, le retour sur investissement de l'ordre 9 ans et le COPA atteint également une valeur de 3.5 (Figure IV - 38).

Les performances des trois configurations pourraient également être encore améliorées en diminuant la température du CAD, ce qui aurait pour effet d'augmenter le COP et réduire les dépenses liées à la consommation d'électricité des PACs.

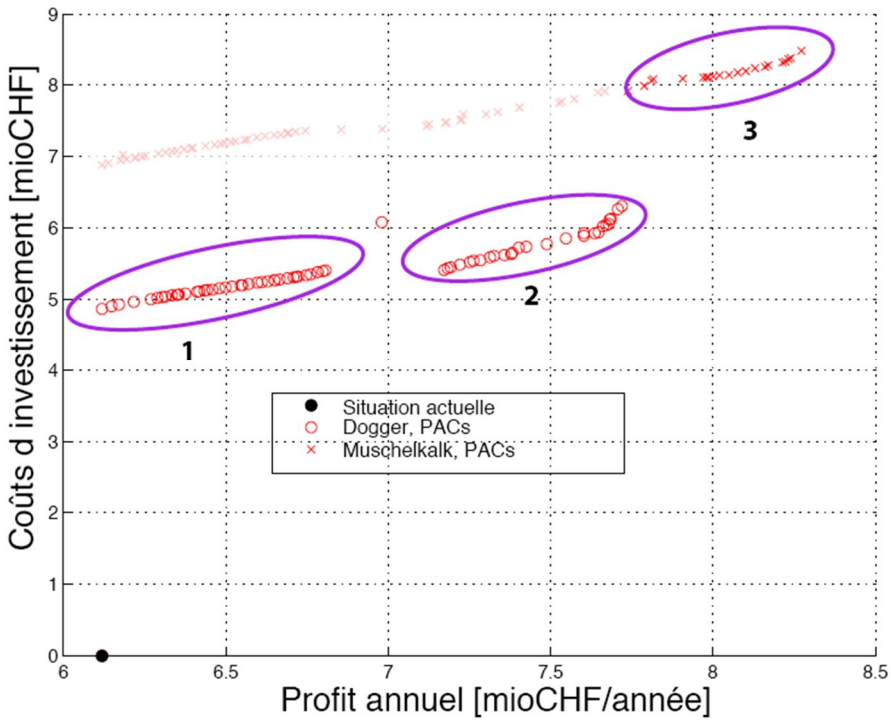



*Figure IV - 38. Comparaison des coûts d'investissement avec le profit annuel. Zone 1 : Investissements les plus faibles pour le Dogger ; Zone 2 : Investissements moyens pour le Dogger; Zone 3 : Investissements les plus élevés pour le Muschelkalk (Gerber & Maréchal, 2011).*

## 5.3 Synthèse des résultats

Afin d'étudier les possibilités de valorisation de la géothermie profonde et son intégration dans des systèmes de chauffage urbains existants, plusieurs scénarios avec ou sans système hybride de génération d'électricité ont été investigués pour le cas d'étude de la ville de La Chaux-de-Fonds. Les ressources géothermiques profondes identifiées comme potentiellement intéressantes dans une précédente étude du CREGE (PDGN, 2010), soit les aquifères du Dogger et du Muschelkalk, ont été utilisés comme ressources potentielles.

Trois scénarios principaux ont été investigués :

1. L'intégration de la géothermie dans le système de chauffage à distance existant via un système de pompes à chaleur.

2. L'utilisation dans un cycle organique de Rankine hybride pour la production d'électricité, utilisant comme deuxième source de chaleur les bois de débrosse brûlés dans la chaudière à bois existante et la chaleur résiduelle de l'usine d'incinération des ordures ménagères.

3. L'utilisation dans un cycle vapeur hybride pour la production combinée de chaleur et d'électricité, avec comme deuxième source de chaleur les bois de débrosse brûlés dans une nouvelle chaudière à bois.

Bien que cette étude puisse être poursuivie et améliorée sur de nombreux points, quelques tendances se dégagent de l'optimisation et de l'analyse de ces différents scénarios.

Il apparaît tout d'abord que l'utilisation des bois de débrosse dans une nouvelle chaudière pour alimenter un cycle vapeur en combinaison avec la géothermie n'offre que peu d'intérêt. En effet, la faible disponibilité de la ressource en bois de débrosse ne permet d'utiliser qu'une faible partie du

potentiel de la géothermie, ce qui nécessiterait des investissements importants pour une augmentation des profits moindres.

Une conclusion similaire peut être tirée pour le scénario utilisant le cycle organique de Rankine (ORC) avec la chaleur résiduelle de l'usine d'incinération des ordures ménagères. Il faut cependant garder à l'esprit que ce scénario se base sur un usage optimisé de la chaleur résiduelle disponible à l'usine d'incinération des ordures ménagères, et non pas sur les conditions opératoires actuelles. Il est donc logique que la chaleur soit tout d'abord utilisée pour satisfaire les besoins du chauffage à distance, puis la production directe d'électricité, ce qui laisse une faible partie disponible pour alimenter le cycle organique de Rankine. Afin d'augmenter la disponibilité en chaleur de l'usine d'incinération des ordures ménagères pour le cycle organique de Rankine, il serait intéressant d'étudier à nouveau le même scénario en doublant la capacité de l'usine, ce qui est une possibilité actuellement envisagée dans un futur proche.

L'intégration dans le système existant de chauffage à distance via un système de pompes à chaleur semble en revanche plus prometteur, et permet une réduction importante des coûts opératoires annuels. Le calcul du prix de revient de la chaleur pour trois configurations différentes a démontré que par rapport au prix de vente actuel de la chaleur, un tel système est profitable si l'on investit dans un système de pompes à chaleur permettant de valoriser l'ensemble de la ressource géothermique durant toute l'année. Une comparaison des trois configurations indique également que les ressources plus profondes, ici le Muschelkalk, semblent être légèrement plus profitables que les ressources moins profondes, ici le Dogger, même si l'investissement est plus élevé. Cette différence provient cependant de la température plus élevée du Muschelkalk et donc d'une disponibilité en chaleur plus élevée à débit égal, et non pas d'une augmentation significative du coefficient de performance de la pompe à chaleur. Si l'on est confronté à un cas où les débits varient entre les différentes ressources potentielles, alors il est possible que les résultats mènent à une conclusion totalement différente.

Un dernier point important à mentionner est l'effet du niveau de température du réseau de chauffage à distance, qui est relativement élevé et pénalise le coefficient de performance du système de pompes à chaleur. Il serait par conséquent intéressant d'étudier la possibilité de diminuer la température du réseau de chauffage à distance, voire de construire un deuxième réseau indépendant du premier fonctionnant à basse température dans le cadre de l'extension du réseau existant. Si cette dernière option est étudiée, il pourrait être envisagé d'utiliser directement la chaleur provenant du Muschelkalk sans l'aide de pompes à chaleur, ce qui réduirait de manière importante l'investissement et les coûts opératoires liés à l'intégration de la géothermie dans le système de chauffage urbain de La Chaux-de-Fonds.

# 6. Projet d'une campagne sismique

## 6.1 Profils sismiques synthétiques prévisionnels

Dans la région de La Chaux-de-Fonds, les deux sites d'intérêt retenus se situent respectivement au niveau de l'entrée Est de la ville du côté de Bikini Test, ainsi qu'au Crêt-du-Locle. Dans cette région, deux profils sismiques synthétiques d'orientation NO-SE, perpendiculaires aux directions majeures de chevauchement ont été générés au travers du modèle géologique « détail 2 » (Figure IV - 39). L'un de ces profils (A-A') intercepte le site de Chaux-de-Fonds Est, alors que le deuxième (B-B') coupe la ville en son centre. Le site du Crêt-du-Locle s'est ajouté plus tardivement au projet et aucun profil sismique synthétique n'a été effectué sur cette zone. Cependant à l'échelle du modèle, les grandes structures chevauchantes sont sensiblement les mêmes et cela ne fait pratiquement pas de différence. Il va de soi néanmoins, qu'une ligne sismique réelle devra être acquise au niveau du Crêt-du-Locle, comme suggéré dans le chapitre suivant, si ce site devait être prospecté de manière détaillée. Finalement, un troisième profil sismique synthétique, d'orientation SO-NE est également établi dans l'axe de la vallée (profil C-C'). De par son orientation perpendiculaire à la direction des chevauchements, ces derniers ne sont pas identifiables.

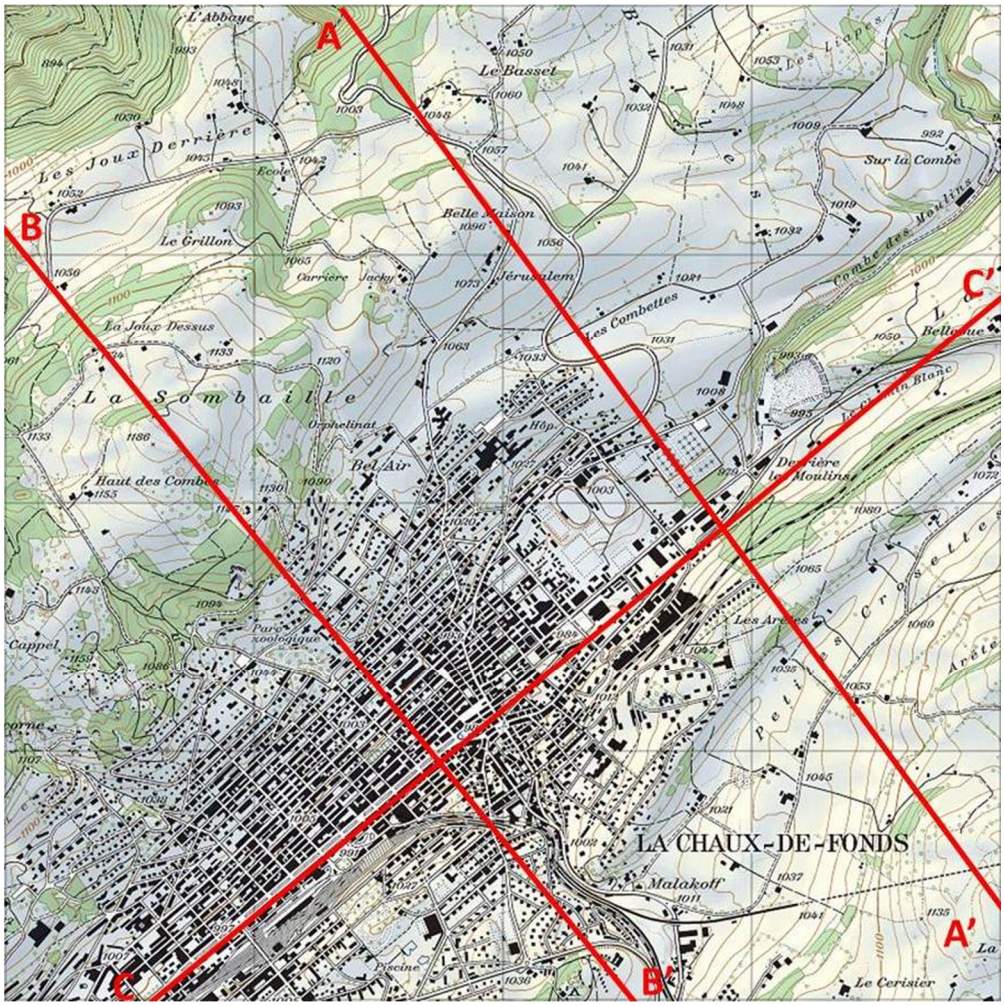



*Figure IV - 39. Localisation des profils sismiques synthétiques sur la région de La Chaux-de-Fonds. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

Contrairement au bas du Canton, aucune faille majeure connue n'affecte la région de La Chaux-de-Fonds et n'est donc incorporée dans le modèle. Néanmoins, l'absence de leur manifestation en surface n'exclut pas la présence possible de failles plus profondes, dont l'orientation présumée devrait osciller autour d'un axe N-S. Pour les mettre en évidence, il serait donc judicieux d'acquérir une ligne sismique longitudinale, similaire au profil synthétique C-C', d'où l'importance d'évaluer la faisabilité d'une telle ligne.

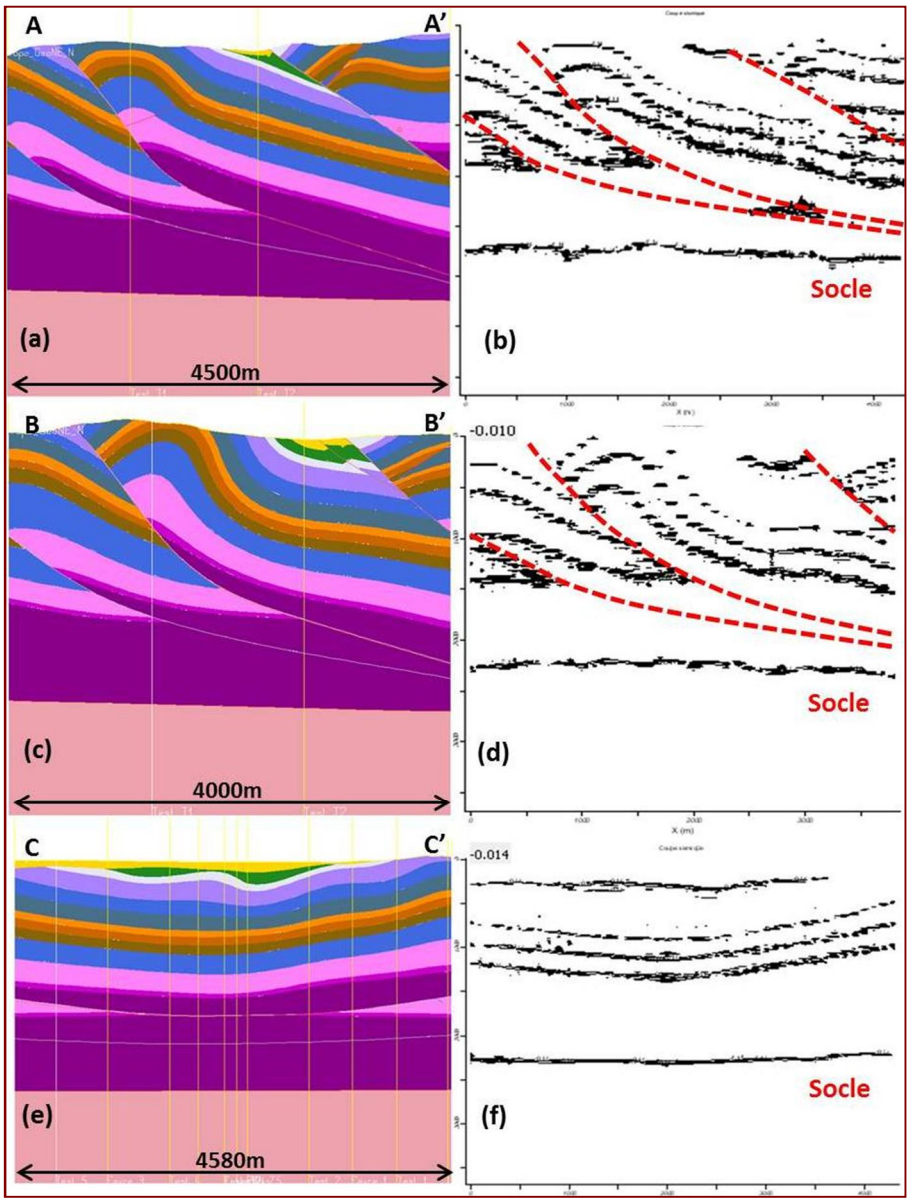



*Figure IV - 40. Coupes et profils sismiques synthétiques correspondants sur la région de La Chaux-de-Fonds issus du modèle géologique « Détail 2 » avec interprétation des principaux plans de chevauchement (en rouge). (a) coupe AA' ; (b) profil sismique synthétique AA', (c) coupe BB' ; (d) profil sismique synthétique BB' ; (e) coupe CC' ; (f) profil sismique synthétique CC'. Se référer à la Figure IV - 39 pour leur localisation et orientation.*

Moyennant les incertitudes structurales et de profondeur liées au modèle géologique utilisé pour leur génération, ces profils sismiques synthétiques permettent de mettre en évidence les principales formations ainsi que les structures de chevauchement présentes dans le modèle géologique (Figure IV - 40). Il est à noter que sur cette figure, l'échelle verticale des coupes au travers du modèle est donnée en profondeur alors que celle des profils sismiques synthétiques correspondants est en

« temps double », ce qui explique le décalage vertical des différentes interfaces entre chaque coupe et son profil synthétique équivalent. Les profils sismiques réels obtenus suite à une campagne d'acquisition seront eux convertis en profondeur par le biais d'un modèle de vitesse, lui-même déterminé par l'analyse des résultats multitraces.

## 6.2 Planification d'une campagne d'acquisition de mesures sismiques

Sur la région de La Chaux-de-Fonds – Crêt-du-Locle, les résultats des profils sismiques synthétiques montrent qu'il serait possible d'obtenir les informations recherchées par l'acquisition de mesures sismiques 2D. Ces informations en profondeur permettraient de combler certaines incertitudes quant à l'épaisseur, la profondeur et la géométrie des différentes formations géologiques et des chevauchements qui forment et affectent le sous-sol. De plus, l'acquisition d'une série de lignes sismiques pourrait également révéler la présence de systèmes de failles profonds, jusque-là inconnus de par l'absence de leur manifestation en surface. Avec l'amélioration de la perméabilité qu'elles engendrent dans leurs abords immédiats (broyage de la roche), les failles ouvertes, qui dans la région sont présumées plus ou moins perpendiculaires aux plis qui forment le Jura, représentent des cibles potentielles pour l'exploitation de la géothermie profonde.

L'acquisition de lignes sismiques sur cette région pourrait également amener de précieuses informations au niveau du toit du socle cristallin et sur la présence potentielle de fossés d'origine permo-carbonifères qui l'affectent en certains endroits. En effet, le socle cristallin est encore très mal connu en Suisse de par le nombre très limité de forages qui l'atteignent et la mauvaise qualité de sa réponse sismique sur la plupart des lignes existantes. Néanmoins, sa profondeur assurant des températures élevées, ainsi que la présence suggérée de zones d'altération dans sa partie superficielle susceptibles d'offrir de bonnes perméabilités, font de cette formation une cible potentiellement intéressante en vue de son exploitation pour la géothermie profonde. Les sédiments anciens (datant du Carbonifère et du Permien) qui remplissent ces fossés sont également très peu connus mais pourraient présenter des propriétés d'aquifère intéressantes. Finalement, les failles de socle qui en théorie bordent ces fossés d'extension pourraient également faire l'objet de cibles potentielles.

Dans cette section, nous posons quelques bases et recommandations en vue de la planification d'une campagne d'acquisition sismique 2D sur la région de La Chaux-de-Fonds – le Crêt-du-Locle. Les coûts indiqués (Tableau IV - 4) ne sont mentionnés qu'à titre informatif, visant à donner un ordre de grandeur du prix que coûterait une telle campagne, mais ne correspondent à aucune offre concrète. De même, les lignes proposées à ce stade de l'étude sont localisées à titre indicatif (Figure IV - 41), sous réserve d'être modifiées suite aux conseils d'experts de manière à en simplifier l'acquisition et en augmenter la qualité.

De manière générale et pour des résultats optimaux, il est important que les profils sismiques soient le plus rectiligne et continus possible, moyennant une compatibilité avec les contraintes d'accès en surface (champs, forêts, zones urbanisées, fortes dénivellations, etc.) pour les camions vibreurs et le déploiement des lignes de géophones (flûte sismique). L'orientation des lignes doit également être choisie avec soin sur la base des connaissances géologiques locales, afin de recouper de manière optimale les structures géologiques visées. De plus, pour une meilleure interprétation, il est aussi recommandé que les différentes lignes sismiques se recoupent entre elles. Finalement, pour des raisons de géométrie du système d'acquisition, il est nécessaire d'étendre les lignes sismiques d'environ 1 km à chacune de leurs extrémités afin d'obtenir le meilleur signal possible sur la portion d'intérêt.

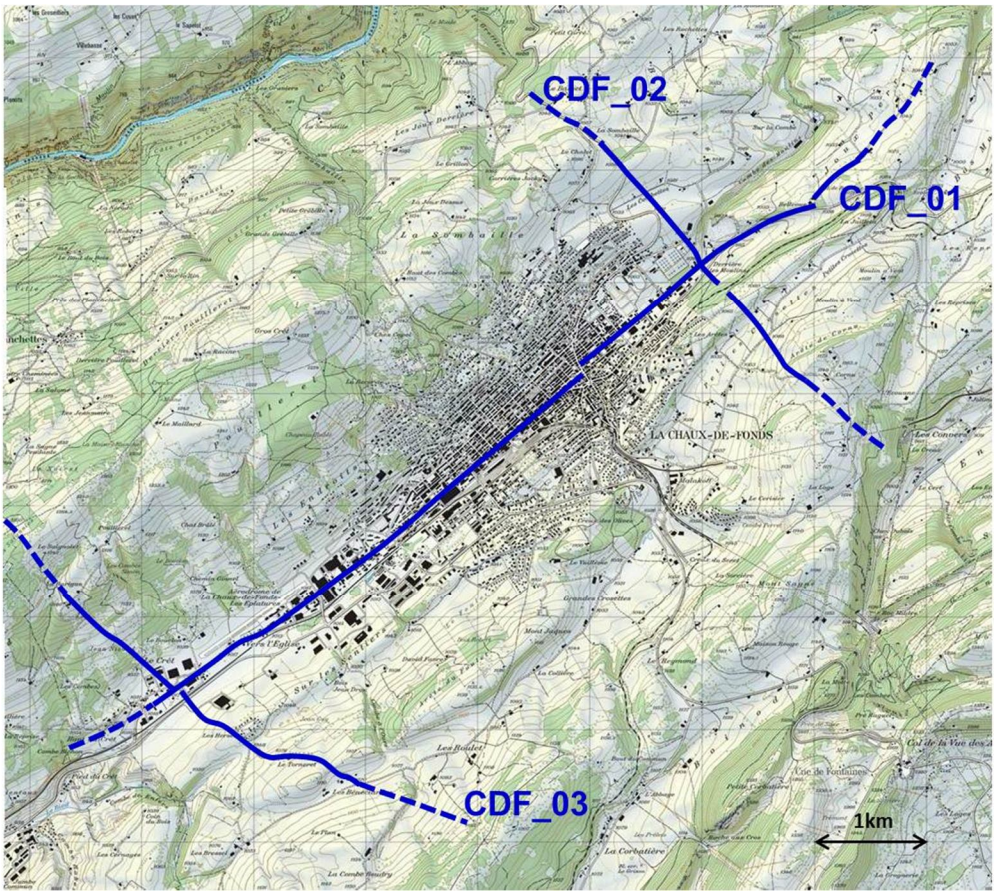



*Figure IV - 41. Localisation des lignes sismiques suggérées pour la région de La Chaux-de-Fonds – le Crêt-du-Locle. Le trait plein représente la portion des lignes sur laquelle le signal sera optimal. Pour obtenir cette couverture maximale sur la zone d'intérêt, il est nécessaire d'étendre l'acquisition sur environ 1 km à chaque extrémité des lignes (traits discontinus). Au total : CDF_01 = 10 km, CDF_02 = 4.5 km et CDF_03 = 5 km. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

Sous réserve de modification de leur tracé suite à l'avis d'expert en acquisition sismique, trois lignes sismiques totalisant une distance d'environ 20 km sont proposées pour la région de La Chaux-de-Fonds – le Crêt-du-Locle (Figure IV - 41). La topographie, l'occupation du sol et les accès routiers semblent rendre possible l'acquisition d'une ligne sismique longitudinale orientée SO-NE suivant le fond de la vallée (ligne CDF_01). Par contre, l'acquisition des deux lignes transversales proposées d'orientation NO-SE (lignes CDF_02 et CDF_03) risquent de poser plus de difficultés puisque pour être le plus rectilignes possible, elles impliquent de nombreuses portions à travers champs. La faisabilité technique de ces lignes sera très certainement réévaluée par les experts en acquisition sismique:

- La ligne CDF_01, d'une longueur de 10 km vise à identifier d'éventuels systèmes de failles profonds actuellement inconnus de par l'absence de leur manifestation en surface. Régionalement, les grands systèmes de failles montrent une orientation préférentielle oscillant autour d'une direction N-S. Cette ligne présente donc une orientation perpendiculaire optimale pour la mise en évidence de telles structures, dans le cas où ces dernières seraient présentes dans cette région. Finalement, cette ligne aidera également à lier les deux lignes transversales (CDF_02 et CDF_03) entre elles ainsi qu'à contraindre les profondeurs et épaisseurs des couches géologiques dans la direction de la vallée.
- La ligne CDF_02, d'une longueur de 4,5 km et passant par le site retenu de La Chaux-de-Fonds Est, est orientée perpendiculairement aux directions de chevauchement de manière à identifier

au mieux leur géométrie en profondeur, ainsi que la profondeur et l'épaisseur des différentes formations dans cette zone.

- La ligne CDF_03, d'une longueur de 5 km se situe au niveau du site du Crêt-du-Locle. Tous comme la ligne CDF_02, de par son orientation NO-SE, cette ligne vise à mettre en évidence les structures de chevauchement, ainsi que les profondeurs et épaisseurs des différentes couches géologiques dans cette zone.

*Tableau IV - 4. Enumération non exhaustive des principales étapes d'une campagne d'acquisition sismique 2D avec leurs prix approximatifs par unité, puis calculés pour la campagne d'acquisition proposée pour la région de La Chaux-de-Fonds – Le Crêt-du-Locle.*

| **Opérations** | **Coût approximatif (CHF)** | **Coût approximatif pour la région La Chaux-de-Fonds – Le Crêt-du-Locle (20 km ; 6 jours de mission) (CHF)** |
|---|---|---|
| Permittage | ~ 1'000.- / jour | --- (nb de jours nécessaires inconnu) |
| Acheminement du matériel sur site | ~ 100'000.- | ~ 100'000.- |
| Acquisition sismique 2D | ~ 5'000 – 10'000.- / km | ~ 100'000 – 200'000.- |
| Test de début de mission (1 journée) | ~ 30'000.- | ~ 30'000.- |
| Contrôle de qualité en temps réel | ~ 1'000.- / jour | ~ 6'000.- |
| Traitement des données | ~ 500 – 1'000.- / km | ~ 10'000 – 20'000.- |
| Correction de la zone altérée de surface par analyse de la réfraction | ~ 1'000 – 1'500 / base (1 base tous les 500 à 1000m) | ~ 23'000 – 63'000.- |
| « Standby » (Immobilisation de l'équipe et du matériel en cas de trop mauvais temps) | ~ 3'000.- / heure (1/10 du coût du test de début de mission) | --- |

Une telle campagne d'acquisition nécessiterait le déploiement de trois camions vibreurs (cf. Chapitre II, Figure II - 23) ainsi que de flûtes sismiques de 300 à 600 canaux. Avec un intertrace (distance entre chaque point de tir ou chaque géophone) suggéré à 20 mètres et une moyenne de 200 tirs par jour, il est envisageable de couvrir environ 4 km de ligne par jour, ce qui représente 5 jours d'acquisition. A cela s'ajoute une journée de tests en début de mission visant à calibrer le matériel ainsi qu'à ajuster les différents paramètres d'acquisition. Ainsi, pour les 20 km de ligne proposés pour cette région, la phase d'acquisition durant laquelle le matériel lourd est mobilisé totaliserait une mission d'une durée de 6 jours.

Sur la base des chiffres articulés dans le Tableau IV - 4, les phases d'acheminement du matériel sur site, d'acquisition et de traitement des données pour une telle campagne représenteraient un coût d'un ordre de grandeur compris entre 270'000 et 420'000 CHF. A ceci s'ajouteraient les coûts

associés d'une part aux phases préliminaires de planification de la campagne et des démarches de permittage et d'autre part aux coûts éventuels de « standby » (immobilisation de l'équipe et du matériel sur site en cas de météo trop mauvaise).

Comme le montre le Tableau IV - 4, l'acheminement du matériel sur site représente une part non-négligeable du coût total d'une telle opération. Il serait donc fortement recommandé d'acquérir toutes les lignes nécessaires sur une même région en une seule campagne d'acquisition, y compris les lignes suggérées dans la région de Neuchâtel – St, Blaise, discutées dans le chapitre III.

# 7. Conclusions et recommandations

## 7.1 Comparaison des zones de La Chaux-de-Fonds Est et Crêt-du-Locle

Pour la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds, deux zones ont été étudiées : Zone de La Chaux-de-Fonds et zone du Crêt-du-Locle (Figure IV - 7). Pour chacune des zones, cette étude a mis en évidence les aspects suivants :

- Dans la zone de la Chaux-de-Fonds et dans la zone du Crêt-du-Locle, les anomalies gravimétriques ne montrent pas de zone de fracture dans lesquelles la densité des roches aurait diminué (Figure IV - 8 et Figure IV - 9) ;

Présentée dans cette étude, l'analyse de la qualité du modèle géologique 3D de détail par la gravimétrie a montré que ce modèle géologique de la région Le Locle - La Chaux-de-Fonds est validé pour :

- la géométrie des grandes structures, tel que les grands anticlinaux ;
- la répartition et les limites des différents chevauchements ;
- la géométrie relative des couches en profondeur.

En revanche, des incohérences demeurent sur :

- la profondeur exacte des différents formations ne peut pas être confirmée en revanche pour les aquifères profonds ;
- L'orientation exacte des structures le long des plans de rétro-chevauchement et de chevauchement, lorsque les inclinaisons de ces plans sont très faibles.

Ces lacunes dans le modèle géologique 3D sont dues au manque d'information géologique sur les orientations et les épaisseurs des structures géologiques. Les informations concernant les effets du karst sur la température des eaux et du débit de l'aquifère restent à déterminer lors des forages.

Ce modèle géologique 3D représente une base indispensable dans l'étude du potentiel géothermique. Toutefois des variations existent entre le modèle et la réalité et ces incertitudes sur la profondeur exacte de chaque aquifère devrait être levées par la réalisation de deux profils sismiques 2D dans la région du Locle – La Chaux-de-Fonds. Ces profils permettront d'apporter les informations complémentaires à cette étude, qui sont nécessaires avant la réalisation de forage.

L'étude du potentiel thermique des aquifères profonds a mis en évidence que la diffusion thermique était contrôlé par la géométrie des formations géologiques, ainsi que par la présence de karst dans l'aquifère du Malm (Tableau IV - 3). La présence de karst a un effet non négligeable sur les températures estimées de chacun des aquifères profonds, pour chacune des zones de Crêt-du-Locle et de La Chaux-de-Fonds Est. Toutefois, cette étude permet de mettre en évidence, que d'un point de vue géologique, même dans le cas d'une karstification du Malm, les températures des aquifères profonds sont toujours plus élevées dans la zone de La Chaux-de-Fonds Est, en allant puiser dans l'aquifère du Muschelkalk (Muschelkalk 2, Tableau IV - 3) qui se trouve à 1650 m environ de profondeur. Les températures estimées sont de l'ordre de 42°C en cas de karstification du Malm et de 46°C en l'absence de karstification.

D'un point de vue de la valorisation de la chaleur, l'étude menée sur le secteur de La Chaux-de-Fonds Est a testé plusieurs scénarios avec ou sans système hybride de génération d'électricité. Les scénarios

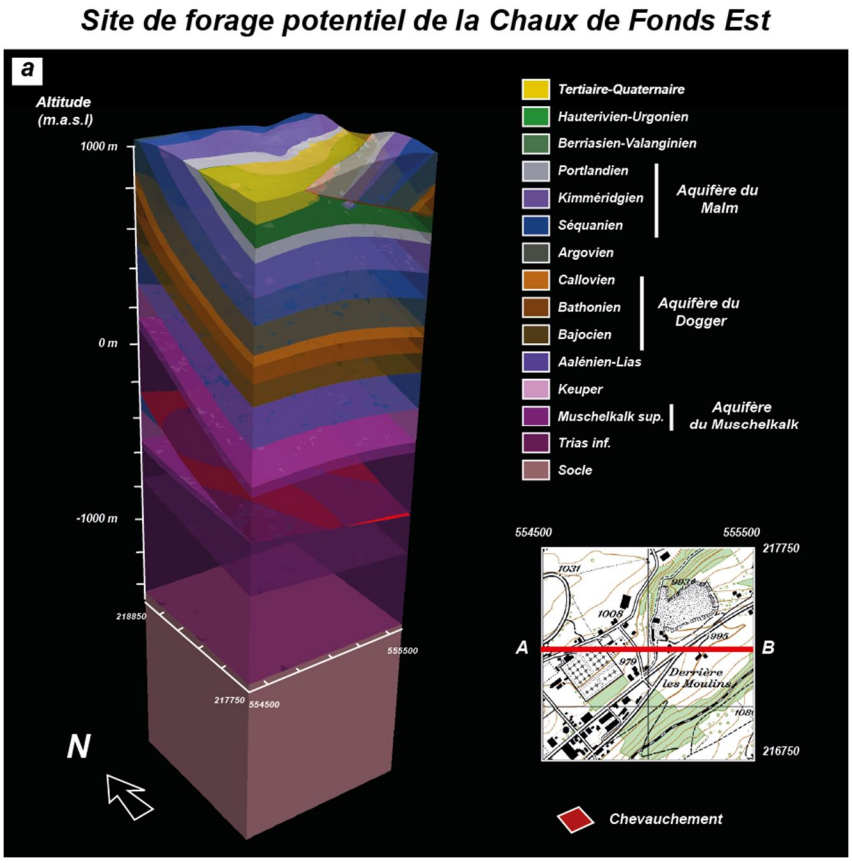
ont pris en compte la possibilité d'intégrer la géothermie dans des systèmes de chauffage urbains existants.

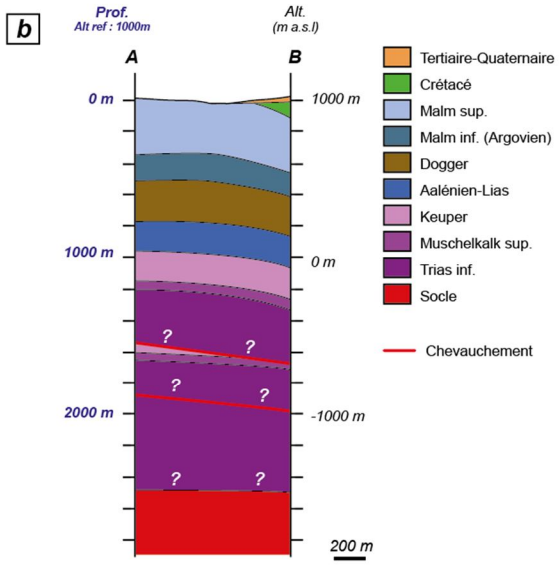
L'intégration dans le système existant de chauffage à distance via un système de pompes à chaleur semble la méthode la plus prometteuse, et permet une réduction importante des coûts opératoires annuels. Le calcul du prix de revient de la chaleur pour trois configurations différentes a démontré que par rapport au prix de vente actuel de la chaleur, un tel système est profitable si l'on investit dans un système de pompes à chaleur permettant de valoriser l'ensemble de la ressource géothermique durant toute l'année. Une comparaison des trois configurations indique également que les ressources dans le Muschelkalk, les plus profondes, semblent être légèrement plus profitables que les ressources des autres aquifères. Bien que l'investissement soit plus élevé pour le Muschelkalk, la température plus élevée du Muschelkalk offre une disponibilité en chaleur plus élevée à débit égal, et non pas d'une augmentation significative du coefficient de performance de la pompe à chaleur.

Un dernier point important à mentionner est l'effet du niveau de température du réseau de chauffage à distance, qui est relativement élevé et pénalise le coefficient de performance du système de pompes à chaleur. Il serait par conséquent intéressant d'étudier la possibilité de diminuer la température du réseau de chauffage à distance, voire de construire un deuxième réseau indépendant du premier, fonctionnant à basse température dans le cadre de l'extension du réseau existant. Si cette dernière option est étudiée, il pourrait être envisagé d'utiliser directement la chaleur provenant du Muschelkalk sans l'aide de pompes à chaleur, ce qui réduirait de manière importante l'investissement et les coûts opératoires liés à l'intégration de la géothermie dans le système de chauffage urbain de La Chaux-de-Fonds.

## 7.2 Sélection d'un site de forage

Basé sur les résultats de cette étude, un site de forage dans la zone de La Chaux-de-Fonds Est semble être le site le plus prometteur pour l'exploitation de la géothermie profonde en utilisant la ressource du Muschelkalk se trouvant à 1650 m (Figure IV - 42). Un modèle 3D synthétique, présenté en Figure IV - 42, regroupe les informations sur la structure de la géologie à partir d'un log synthétique de forage, ainsi que la profondeur attendue des chacun des aquifères. Ce log synthétique de forage est présenté pour aider à planifier le futur forage et pour connaître à quelles profondeurs théoriques se situent chacune des formations géologiques présentées dans le modèle. Il est important de tenir compte des incertitudes importantes sur les profondeurs des aquifères profonds.




c

| Aquifères potentiels | Profondeur (Toit) | Incertitude |
|---|---|---|
| ***Malm sup.*** | 0-100 m | ±50 m |
| ***Dogger*** | 500-700 m | ±100 m |
| ***Muschelkalk sup.*** | 1150-1250 m | ±200 m |
| | 1600-1700 m | ±300 m |

*Figure IV - 42. (a) Modèle géologique 3D. (b) Colonne synthétique de forage. (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation sur la Figure IV - 20.*

## 7.3 Recommandations

Comme il a été présenté dans cette étude, les avancées dans la connaissance des structures géologiques 3D ont permis d'estimer le potentiel de chaleur (Figure IV - 32 et Figure IV - 33), ainsi que de sélectionner un site de forage (Figure IV - 42) sur le site de La Chaux-de-Fonds Est. De plus cette étude a permis de chiffrer une estimation des investissements nécessaires pour la valorisation de la chaleur (Figure IV - 38).

Toutefois, des incertitudes restent sur la profondeur exacte des aquifères profonds, ainsi sur la température et le débit réels des aquifères.

C'est pourquoi, basé sur les résultats du projet GeoNE, l'étude du potentiel géothermique de la zone de La Chaux-de-Fonds Est devrait être complétée par un ou deux profils sismiques (Figure IV - 41), ainsi qu'un forage d'exploration de type slimhole.

Tout d'abord, une campagne sismique doit être réalisée pour affiner les profondeurs et les épaisseurs des aquifères. Ensuite, un forage devra être exécuté et complété par des diagraphies et des tests de production qui permettront de définir les propriétés physiques, hydrauliques et chimiques des aquifères potentiels.

## 7.4 Références bibliographiques

Dessor E. & Gressly A., 1859. Mémoire de la Société des Sciences Naturelles de Neuchâtel, tome 4.

Favre J., 1911. Description géologique des environs du Locle et de la Chaux-de-Fonds. Thèse, Université de Génève.

Gerber L. & Maréchal F., 2011. Systèmes hybrides pour les installations de géothermie profondes : cas d'étude de La Chaux-de-Fonds. Rapport LENI-EPFL, 36 pp.

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

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.

Klingele E. & Olivier R., 1980. La nouvelle carte gravimétrique de la Suisse (anomalie de Bouguer).

Medici F. & Rybach L., 1995. Geothermal map of Switzerland 1995. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse. Géophysique N° 30, 27 pp.

Sommaruga A, 1997. Geology of the central Jura and the molasse basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. Mémoire de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, tome XII, 176 pp.

Suter H., 1920. Geologische Untersuchungen in der Umgebung von Les Convers - Vue des Alpes (Canton de Neuchâtel), Inaugural-Dissertation, Université de Zurich, 45 pp.

Suter H. & Lüthi E., 1969. Atlas géologique de la Suisse 1 :25000, Feuille 1144 Val de Ruz. Notice. Commission géologique Suisse.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

## Rapport final de la Phase 1

## Chapitre V.
## Résultats de la prospection géothermique de la région Auvernier - Boudry

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

CHAPITRE V. RESULTATS DE LA PROSPECTION GEOTHERMIQUE DE LA REGION AUVERNIER - BOUDRY 175

1. INTRODUCTION ..... 175

2. MODELISATION GEOLOGIQUE 3D ..... 176

2.1 INTRODUCTION ..... 176

2.2 MODELE DE LA REGION AUVERNIER– BOUDRY ..... 176

2.3 VALIDATION DU MODELE GEOLOGIQUE PAR LA GRAVIMETRIE ..... 177

3. MODELISATION DES ZONES DE FORAGE POTENTIELLES ET ANALYSE DES ZONES DE FRACTURATION ..... 185

3.1 MODELE POUR LE SITE DE COTTENDART ..... 185

3.2 ETUDE DE SITES DE FORAGE POTENTIEL POUR LE SITE DE COTTENDART ..... 186

4. POTENTIEL GEOTHERMIQUE ..... 188

4.1 MODÈLES THERMIQUES DE DÉTAIL ..... 188

5. POTENTIEL D'UTILISATION DE LA CHALEUR ..... 191

5.1 INTRODUCTION ..... 191

5.2 TRAVAUX REALISES ..... 191

5.3 MODES D'EXPLOITATION DE LA CHALEUR GEOTHERMIQUE ..... 191

5.4 POSSIBILITES DE VALORISATION A COLOMBIER ..... 192

5.5 CONCLUSIONS ..... 194

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS ..... 195

6.1 CONCLUSION ..... 195

6.2 SELECTION D'UN SITE DE FORAGE ..... 196

6.3 RECOMMANDATIONS ..... 196

6.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 198

## LISTE DES FIGURES

Figure V - 1. Carte tectonique de la zone d'étude avec localisation des modèles 3D et des coupes utilisées (modifiée d'après groupe de travail PGN, 2008).....176

Figure V - 2. Extrait du Modèle 3 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km). .....177

Figure V - 3. Carte gravimétrique résiduelle de la région de Auvernier - Boudry pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée pour l'obtenir est présentée dans le Chapitre II. Méthodologie.....178

Figure V - 4. Carte gravimétrique calculé à partir du modèle géologique (modèle 1, Figure V - 2) et des paramètres de densité présenté dans le Tableau V - 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir (Chapitre II, Figure II - 19).....179

Figure V - 5. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure V - 4) par la carte gravimétrique résiduelle de la région de Neuchâtel-St Blaise (Figure V - 3). Voir texte pour détails.....181

Figure V - 6. Comparaison du profil gravimétrique A-B sur la zone de Cottendart (Figure V - 3). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après corrections des valeurs mesurées (courbe bleue). Valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire).En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure V - 2).Une description du log géologique est présentée dans le log du modèle 3 (Figure V - 2). .....183

Figure V - 7. Comparaison profile gravimétrique C-D sur la zone de Cottendart (Figure V - 3). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après corrections des valeurs mesurées (courbe bleue). Valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire).En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure V - 2).Une description du log géologique est présentée dans le log du modèle 3 (Figure V - 2). .....184

Figure V - 8. Localisation des modèles réalisés pour la région Auvernier-Boudry. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....185

Figure V - 9. (a) Modèle géologique 3D pour le site de Cottendart. (b) Colonne synthétique de forage pour le site de Cottendart (c) Profondeur du toit de aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure 8.....187

Figure V - 10. Température calculée au toit du Dogger (modèle Auvernier – Boudry). La ligne rouge indique la bordure de l'aquifère modélisé et la zone noire cache les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Dogger.....189
Figure V - 11. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle Auvernier - Boudry). La ligne rouge indique la bordure de l'aquifère modélisé et la zone noire cache les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Muschelkalk.....190
Figure V - 12. (a) Modèle géologique 3D pour le site de Cottendart. (b) Colonne synthétique de forage pour le site de Cottendart (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure V - 8.....197

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau V - 1. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région de Auvernier - Boudry. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). *Valeur mesurée dans le projet IGS-NE. # Valeur de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. +Valeur basée sur la littérature. ‡Utilisée dans le modèle normal permettant de reproduire au mieux les anomalies gravimétriques mesurées.....180
Tableau V - 2. Données d'une sélection de forages profonds dans le canton de Neuchâtel pour la zone littorale (d'après données de Groupe de travail PDGN, 2010 et Archives CHYN).....188
Tableau V - 3. Paramètres utilisés pour les modèles thermiques détaillés de la région Auvernier-Boudry.....188
Tableau V - 4. Bilan des températures estimées pour le site de la région Auvernier – Boudry.....190
Tableau V - 5. Scénarios retenus pour la zone Neuchâtel – Monruz avec intégration de la géothermie au réseau de distribution de la chaleur du CUM.....193

# Chapitre V. Résultats de la prospection géothermique de la région Auvernier - Boudry

## 1. Introduction

La région Auvernier-Boudry a été sélectionnée en cours de projet après discussion avec l'entreprise VADEC, en raison de l'annonce de la fermeture de l'incinérateur de Cottendart prévu en 2015 et de la substitution de la chaleur qui alimente le réseau de chauffage à distance Cadbar.

La région Auvernier-Boudry se situe sur le premier pli anticlinal du Jura neuchâtelois, qui vient chevaucher la terminaison SO du synclinal du Val de Ruz. La région correspond à la continuité de l'anticlinal de Chaumont, présent au nord de Neuchâtel, mais le pli est ici beaucoup moins marqué. De plus aucun accident décrochant n'a été ici identifié. La zone d'étude s'étend du littoral à Rochefort afin de mieux prendre en compte la structure régionale. Le site de forage potentiel est situé au niveau de l'usine d'incinération des ordures ménagères de Cottendart.

Différentes études ont été réalisées pour la région Auvernier-Boudry :

- Modélisation de la structure géologique en 3D (§2)
- Validation de la modélisation géologique 3D par la gravimétrie (§2.3)
- Estimation du potentiel géothermique (§4)
- Étude du potentiel d'utilisation de la chaleur (§5)

# 2. Modélisation géologique 3D

## 2.1 Introduction

Différents modèles géologiques 3D ont été réalisés avec le logiciel 3D GeoModeller (BRGM, Intrepid geophysics) (Figure V - 1) :

- Un modèle détaillé entre Auvernier et Boudry (Modèle 3)
- Un log de forage synthétique pour le site de Cottendart.

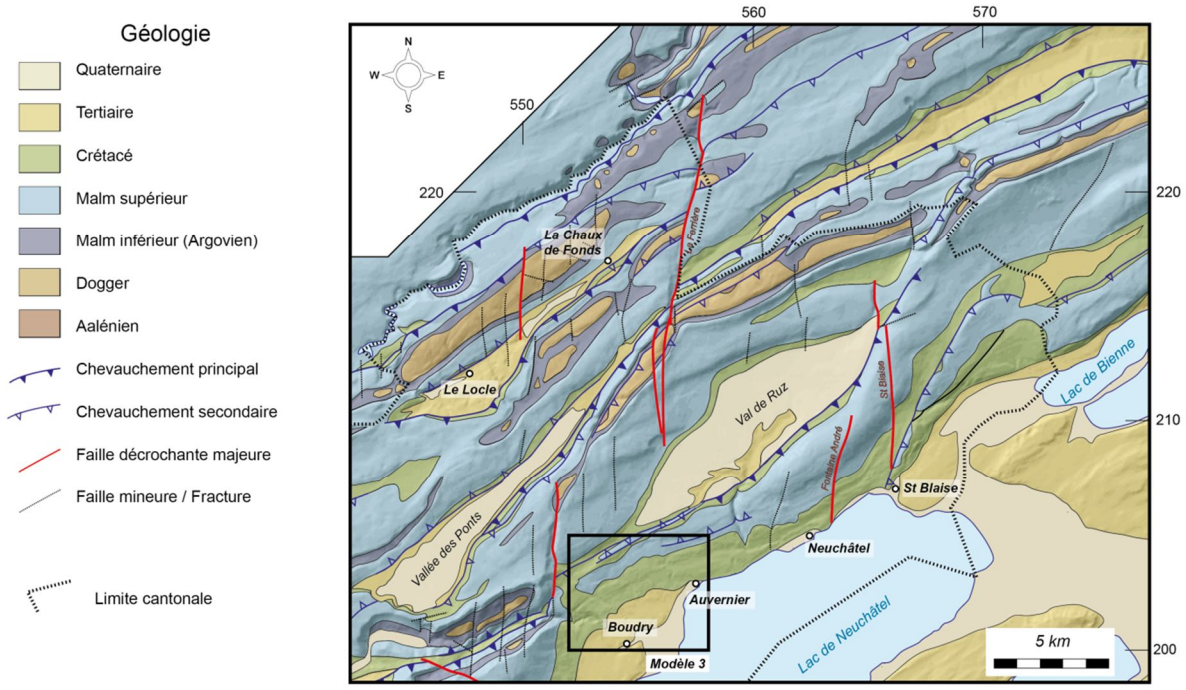



*Figure V - 1. Carte tectonique de la zone d'étude avec localisation des modèles 3D et des coupes utilisées (modifiée d'après groupe de travail PGN, 2008).*

## 2.2 Modèle de la région Auvernier– Boudry

Le site de Cottendart ayant été sélectionné plus tardivement durant le déroulement du projet GeoNE, seul un modèle de détail (Modèle 3) a été réalisé pour la région d'Auvernier - Boudry. Le Modèle 3 couvre une zone de 6 x 5 km entre Auvernier et Boudry (Figure V - 1) et s'étend de la surface jusqu'à une profondeur de 2.5 km. Il a été réalisé à partir du modèle numérique de terrain à 25 m (MNT25) (MNT,25V-Swisstopo 2011), et des cartes géologiques au 1:25'000 de cette zone (Val de Ruz et Neuchâtel)(Suter et Lüthi, 1969). La stratigraphie a directement été considérée dans le détail pour ce modèle. La structure géologique en profondeur de cette zone a été modélisée à partir des coupes réalisées à l'échelle du canton dans le cadre de l'étude PGN (Groupe de travail PGN, 2008). Le modèle a été calculé avec une résolution de 100 m horizontalement et 50 m verticalement. La Figure V - 2 montre un aperçu du Modèle 3, avec la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk et leurs relations géométriques avec les structures tectoniques.

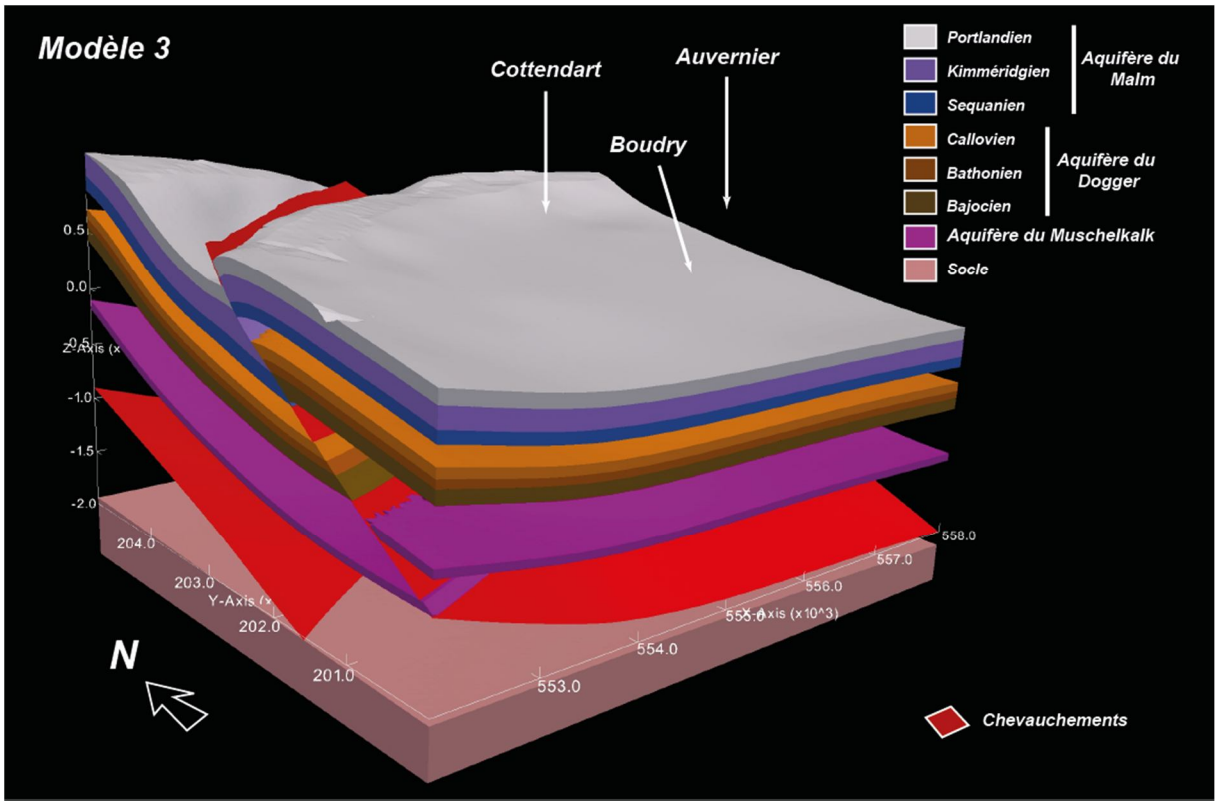



*Figure V - 2. Extrait du Modèle 3 montrant la géométrie des aquifères du Malm, du Dogger et du Muschelkalk ainsi que des principaux accidents tectoniques (coordonnées en km).*

## 2.3 Validation du modèle géologique par la gravimétrie

Pour valider le modèle géologique de la région d'Auvernier – Boudry (Figure V - 2), une cartographie gravimétrique a été réalisée (cf. Chap. II) sur une surface de 4 x 4 km (Figure V - 3) et regroupe 186 stations. Une description complète de la cartographie gravimétrique réalisée dans le projet GeoNE, ainsi qu'une description des corrections et des incertitudes est décrite en Chapitre II. Les analyses et interprétations présentées ci-dessous sont toutes basées sur la carte d'anomalie gravimétrique résiduelle, telle que présentée dans le Chapitre II Méthodologie (Chapitre II, Figure II - 19).

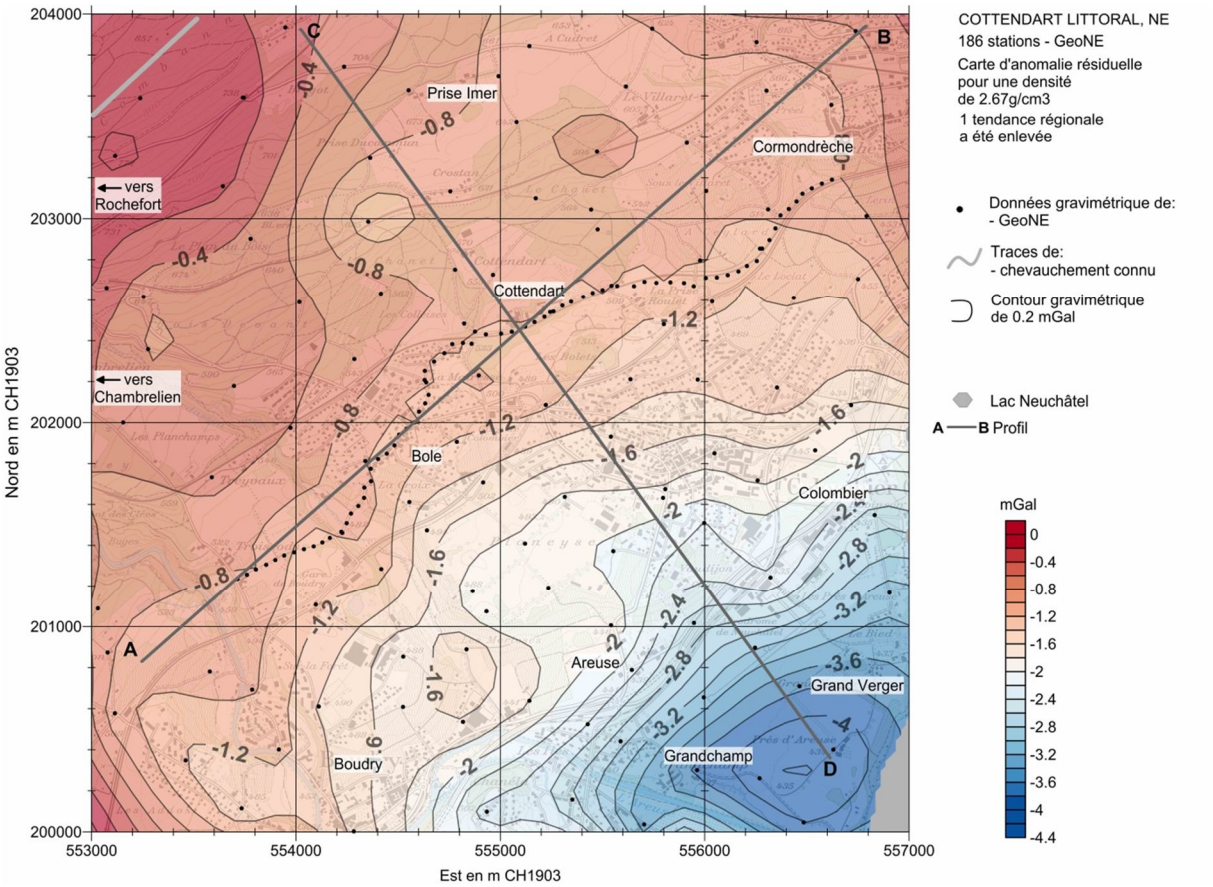



*Figure V - 3. Carte gravimétrique résiduelle de la région de Auvernier - Boudry pour une densité de référence de 2.67 g.cm$^{-3}$. La méthodologie utilisée pour l'obtenir est présentée dans le Chapitre II. Méthodologie.*

## 2.3.1 Anomalies gravimétriques résiduelles mesurées

Pour la région de d'Auvernier – Boudry, les 16 km$^2$ couvert par la cartographie gravimétrique permet après corrections et suppressions de la tendance régionale (filtre à 35 km de longueur d'onde) de mettre en évidence (Figure V - 4) :

- L'absence de structure gravimétrique associée à des failles ou à des zones de fracturation, qui est marqué par une relativement bonne orientation des isolignes gravimétriques perpendiculairement à l'inclinaison des formations géologiques formant le chevauchement.
- Une tendance gravimétrique décroissante vers le S-E, qui est due à la structure du chevauchement. Au niveau de la structure géologique, la bordure nord-ouest de la région d'Auvernier - Boudry (203000 à 203500 Nord et 553000 à 553500 Est en CH1903,Figure V - 3) marque la bordure nord de l'anticlinal chevauchant. Cette limite structurale n'est pas visible sur la carte d'anomalies résiduelles, puisqu'aucun point de mesure n'a été fait en dehors du chevauchement.
- Sur le bas du delta de l'Areuse (Grandchamp et Grand Verger, Figure V - 3), l'accentuation de la diminution gravimétrique est due à l'épaississement des dépôts fluviaux et fluvoglaciaires dans le delta.

## 2.3.2 Anomalies gravimétriques obtenues à partir du modèle géologique

Les couches sédimentaires du Mésozoïque (Figure V - 2, Tableau V -1), qui forment les plissements et les chevauchements du Jura Neuchâtelois, sont faites d'alternances de formations rocheuses allant du calcaire massif aux marnes en passant par les formations marno-calcaires. Le bas de la pile géologique est quant à lui composé d'une couche de gypse. Par conséquent, comme indiqué dans le Tableau V - 1, les variations de densités entre les différentes formations rocheuses sont le plus souvent faibles. Cela se traduit par de faibles variations gravimétriques au sein des formations du Mésozoïque comme cela apparaît sur le haut du chevauchement (Figure V - 3). Ces faibles variations gravimétriques deviennent plus visibles sur l'ensemble de la région d'Auvernier– Boudry, lorsque les effets gravimétriques des sédiments post-mésozoïques sont soustraits (méthode du stripping) à la carte gravimétrique résiduelle (Annexe, Figure 16). Cette méthode et ces résultats sont présentés dans le Chapitre II Méthodologie.

Pour pouvoir valider le modèle géologique 3D (Figure V - 2) à partir des anomalies gravimétriques résiduelles (Figure V - 3), il est nécessaire de calculer la réponse gravimétrique du modèle géologique 3D. Dans ce but, plusieurs modélisations normales (Forward modeling) ont été réalisées en faisant varier les valeurs de densité des différentes formations géologiques (Tableau V - 1 V - 1). Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le Chapitre II Méthodologie de ce rapport.

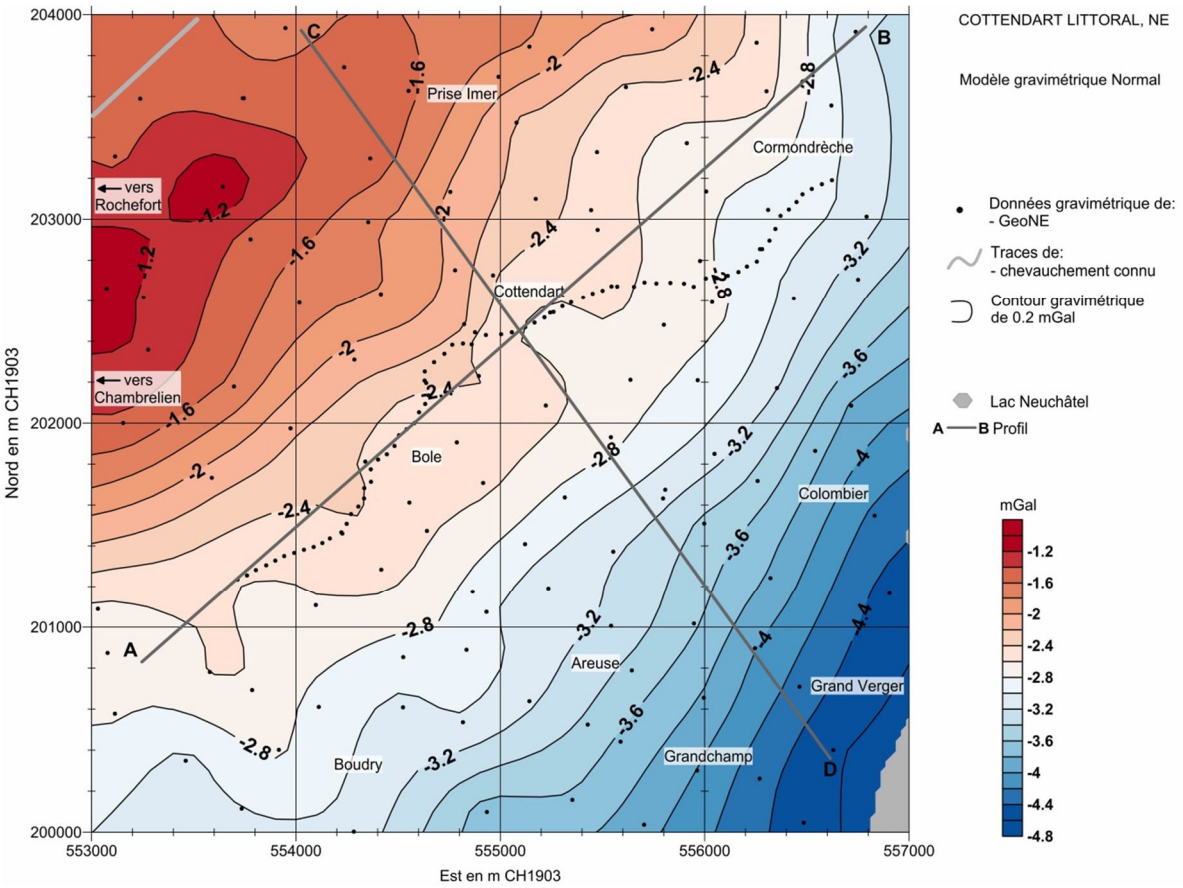



*Figure V - 4. Carte gravimétrique calculé à partir du modèle géologique (modèle 1, Figure V - 2) et des paramètres de densité présenté dans leTableau V - 1 Tableau V - 1. Voir texte pour détails et pour la méthodologie voir (Chapitre II, Figure II - 19).*

*Tableau V - 1. Quantification des densités des roches formant les couches géologiques pour le modèle géologique de la région de Auvernier - Boudry. Les valeurs ci-dessous sont basées sur les données de la littérature, ainsi que sur les mesures de densité réalisées sur des roches calcaires dans le canton de Neuchâtel dans le cadre du projet IGS-NE (Cf. chapitre II gravimétrie). *Valeur mesurée dans le projet IGS-NE. # Valeur de densité obtenue dans les logs de forage du Jura et du Plateau Molassique. + Valeur basée sur la littérature. ‡ Utilisée dans le modèle normal permettant de reproduire au mieux les anomalies gravimétriques mesurées.*

| **Formation géologique** | **Type de roche** | **Source d'information** | **Valeurs de densité ($g.cm^{-3}$)** | **Valeurs de densité utilisées dans le modèle ($g.cm^{-3}$)‡** |
|---|---|---|---|---|
| Post- Mésozoïque du littoral | Graviers, sédiments lacustres, sédiments fluviaux, moraines, marnes, dépôts fluvioglaciaires | Observation géologique | 2.10+ - 2.89# | 2.6 |
| Crétacé (Albien-Berriasien-Valanginien-Hauterivien) | Calcaire | Observation géologique | 2.64* - 2.69* | 2.5 - 2.67 |
| Malm supérieur (Portlandien-Kimméridgien) | Calcaire micritique et Marne (minoritaire) | Observation géologique | 2.65* - 2.71* | 2.67 |
| Malm-Argovien | Marne - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.57# | 2.65 |
| Dogger (Callovien- Bathonien-Bajocien) | Calcaire spathique – Marne- Calcaire oolithique - Calcaire corallien (minoritaire) | Observation géologique | 2.61* - 2.67* | 2.66 |
| Aalénien-Lias | Marne | Hypothèse | 2.12# - 2.60# | 2.67 |
| Keuper | Marne | Hypothèse | 2.10# - 2.73# | 2.6 |
| Muschelkalk supérieur | Calcaire | Hypothèse | 2.53# - 2.83# | 2.66 |
| Muschelkalk-Trias inférieur | Gypse | Hypothèse | 2.13# - 2.83# | 2.58 |
| Socle cristallin | Roche cristalline | Hypothèse | 2.60# - 2.83# | 2.69 - 2.75 |

La réponse gravimétrique du modèle géologique 3D reproduisant au mieux les variations gravimétriques mesurées est présentée en Tableau V – 1 et les densités attribuées à chaque formation géologique sont présentées dans le Tableau V - 1 .

## 2.3.3 Validation et limites de la modélisation géologique 3D

Au niveau de la structure globale (pour une surface de 4 x 4 km), la réponse gravimétrique calculée reproduit bien les grandes structures géologiques avec le bassin sédimentaire post-mésozoïque formant le delta de l'Areuse (Grandchamp et Grand Verger, Figure V - 4). De même, la réponse gravimétrique calculée est capable de bien reproduire les effets gravimétriques, qui sont liés à l'inclinaison des formations géologiques formant le chevauchement (Figure V - 4).

D'un point de vue quantitatif, la dynamique des variations gravimétriques calculées est très similaire de celle de la carte d'anomalies résiduelles mesurées. Pour la carte résiduelle mesurée, la dynamique gravimétrique est d'environ 4.6 mGal (Figure V - 3) et elle est de 3.6 mGal pour la carte gravimétrique modélisée (Figure V - 4). La carte de Misfit obtenue en soustrayant la carte gravimétrique calculée avec la carte gravimétrique résiduelle mesurée confirme la bonne correspondance du modèle avec la réalité (Figure V - 5).

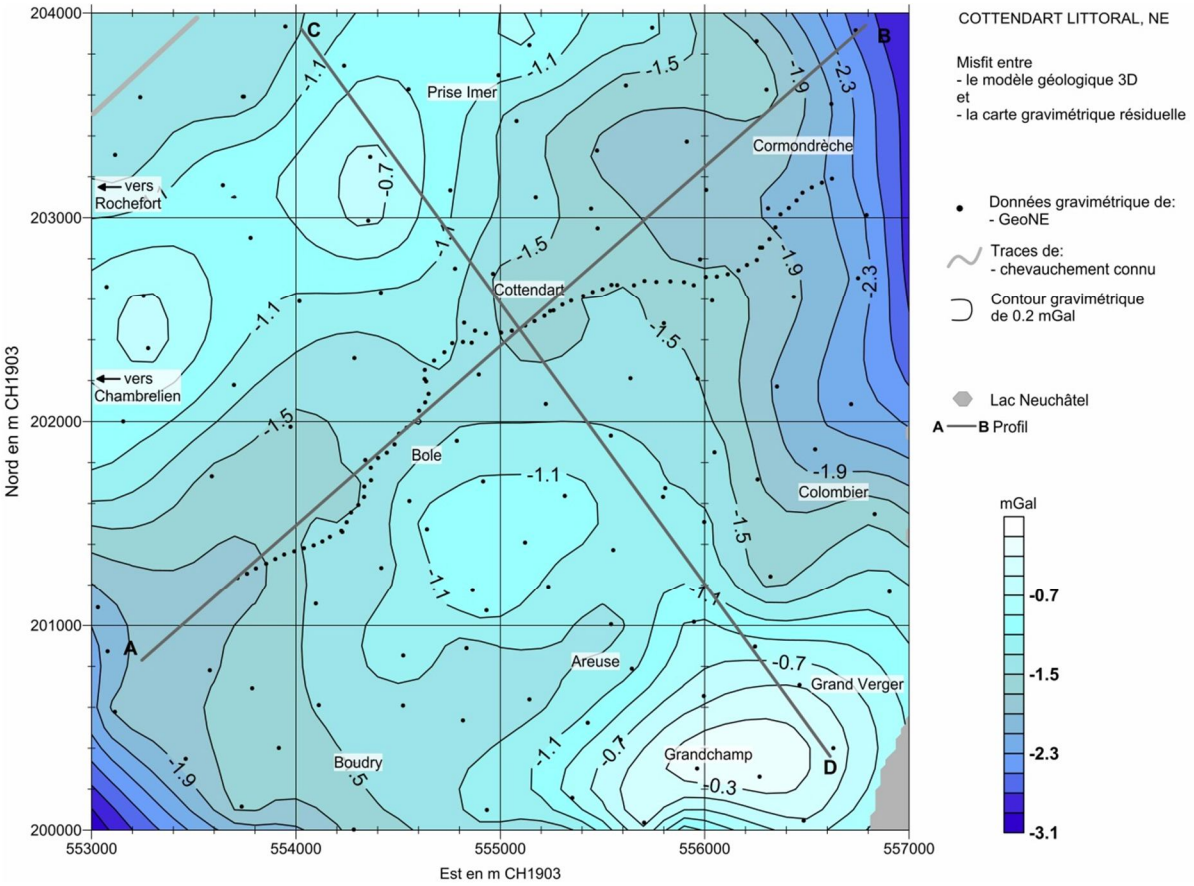



*Figure V - 5. Misfit obtenu par soustraction de la carte gravimétrique calculée (Figure V - 4) par la carte gravimétrique résiduelle de la région de Neuchâtel-St Blaise (Figure V - 3). Voir texte pour détails.*

*De plus, les valeurs de densité des formations géologiques utilisées (Tableau V - 1) dans le modèle sont assez similaires aux valeurs de densité des types de roches trouvées dans la littérature, ainsi que de celles mesurées (Projet IGS-NE). Il est à noter que les valeurs de densité mesurées (Projet IGS-NE) ont été faites sur des échantillons de roches non fracturées et non karstifiées, qui ont été prélevées dans la région de Neuchâtel – St Blaise et dans la région de La Chaux-de-Fonds – Le Locle. Par conséquent ces valeurs de densité mesurée sont considérées comme des valeurs maximales. Les données de la littérature proviennent essentiellement de logs de forage, qui ont été exécutés dans le Jura, ainsi que sur le Plateau molassique. Pour chaque formation géologique, il peut exister de*

*grandes variations de profondeur entre le contexte géologique du Plateau molassique et celui du Jura dans le canton de Neuchâtel. De ce fait, les données de la littérature provenant des logs de forage ne peuvent être considérées que comme une information générale.*

Pour pouvoir quantifier plus précisément la qualité du modèle géologique à reproduire les structures gravimétriques mesurées, deux profils 2D ont été extraits de la carte gravimétrique résiduelle (Figure V - 3), de la carte gravimétrique calculée (Figure V - 4), ainsi que de leur différence (Figure V - 5). Le profil topographique a été obtenu à partir du MNT 25 m de la Suisse (MNT,25V-Swisstopo 2011)

Le premier profil, appelé Cottendart A-B, est parallèle à la structure du chevauchement (Figure V - 6). Ce profil ne présente que de toutes petites variations gravimétriques (< 0.150 mGal) et de très courtes longueurs d'ondes (<0.5 km). Ces anomalies ne sont pas organisées selon une direction préférentielle, ce qui supporte le fait qu'il n'y a pas de faille recoupant le chevauchement. Par ailleurs, ces variations ne peuvent pour les mêmes raisons pas correspondre à des zones de fracturation. Ce fait est supporté par le modèle gravimétrique qui, basé sur le modèle géologique 3D, reproduit assez bien plusieurs de ces courtes variations (Figure V - 6). Les densités dans le modèle gravimétrique étant homogènes au sein d'une même formation, ce dernier ne reproduit pas les zones de fracturation. Il est très vraisemblable que ces courtes variations gravimétriques soient dues à des variations locales dans les calcaires du Crétacé ou encore à la présence de niveaux sédimentaires post-mésozoïques (plus épais que ce qui a été modélisé localement). L'incertitude des mesures gravimétriques étant de 0.077 mGal, cette étude ne peut par conséquent que caractériser des structures gravimétriques ayant des amplitudes plus grandes que 0.150 mGal. C'est pourquoi, il n'est pas possible d'interpréter avec certitude ces petites variations gravimétriques.

Le deuxième profil, appelé Cottendart C-D, est perpendiculaire à la structure du chevauchement (Figure V - 7) et le modèle gravimétrique reproduit bien les variations gravimétriques mesurées. Les différences existantes sont vraisemblablement dues à une légère différence qu'il doit exister entre les densités choisit pour le modèle et les densités réelles des roches. Comme pour le profil Cottendart A-B (Figure V - 6), les variations gravimétriques inférieures à 0.150 mGal ne peuvent pas être interprétées comme étant l'expression de variations dans la structure géologique formant l'anticlinal.

Le chevauchement formant un relief topographique, il est probable qu'il soit en partie karstifié, toutefois, les effets du karst sont généralement estimés dans la région de Neuchâtel à environ 2% du volume total de roche. Cette estimation du taux de karstification ne tient pas en considération les quelques gouffres ou cavernes qui existent dans le canton de Neuchâtel. À ce stade, cette étude ne peut pas mettre en évidence l'existence de quelconques gouffres ou cavernes, qui pourraient éventuellement être présents dans les couches calcaires les plus superficielles du chevauchement.

Dans son ensemble le modèle géologique 3D (Figure V - 2) reproduit bien la structure stratigraphique, ainsi que les structures tectoniques (chevauchement) de la région de Auvernier – Boudry.

Finalement, basé sur la comparaison de la réponse gravimétrique du modèle géologique avec la carte gravimétrique résiduelle, il apparait que la réponse gravimétrique reproduit bien la structure du chevauchement, ainsi que l'inclinaison des formations géologiques. Les différences, qui sont locales, correspondent principalement à de très légères différences dans la géométrie. Comme cela est montré par le modèle géologique 3D, la carte gravimétrique résiduelle met en évidence l'absence totale de failles, ainsi que l'absence de zone de fracturation en profondeur.

Dans son ensemble le modèle géologique 3D (Figure V - 2) reproduit bien la structure stratigraphique, ainsi que les structures tectoniques (chevauchement, anticlinal) de la région de Auvernier – Boudry.

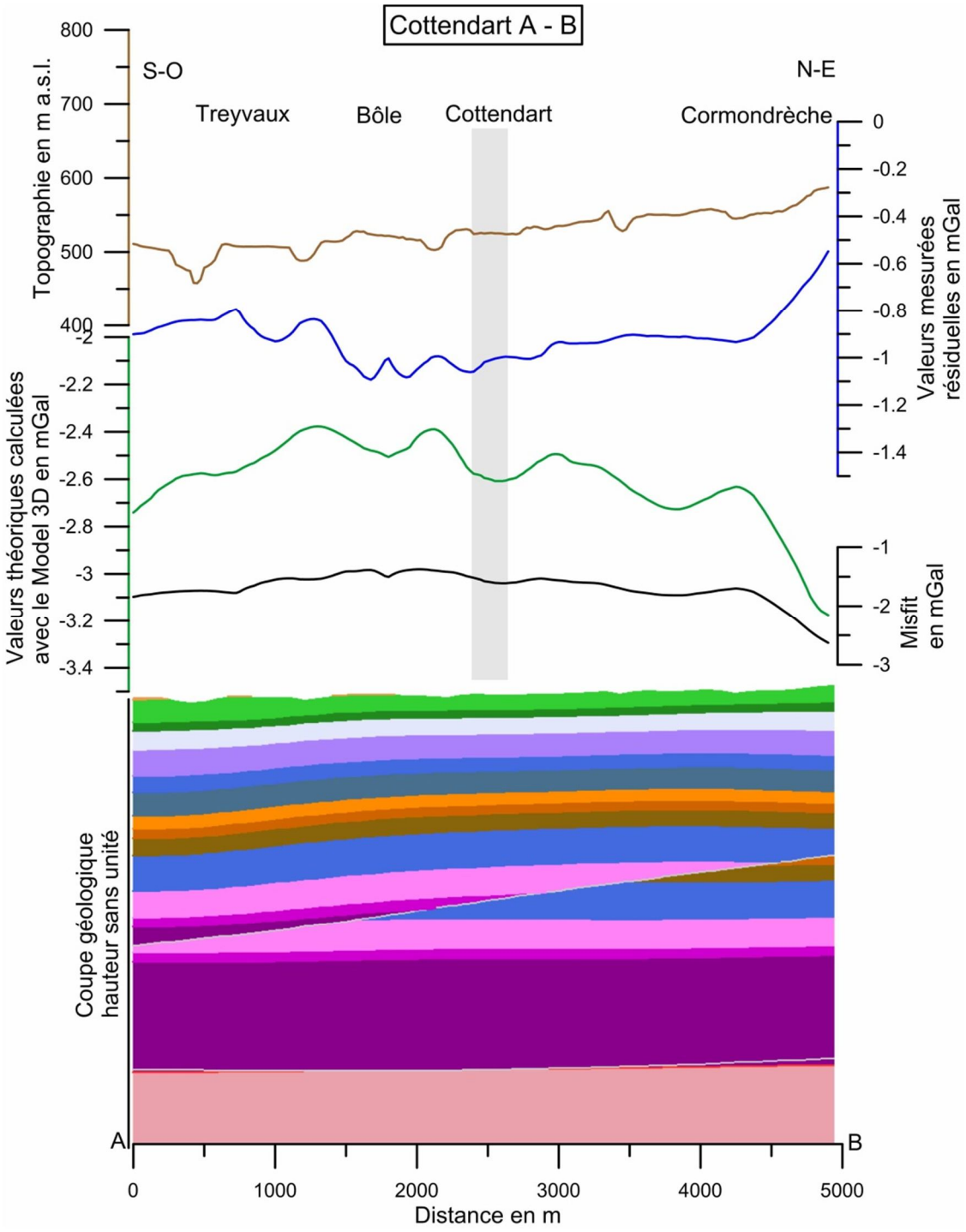



*Figure V - 6. Comparaison du profil gravimétrique A-B sur la zone de Cottendart (Figure V - 3). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après corrections des valeurs mesurées (courbe bleue). Valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire).En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure V - 2).Une description du log géologique est présentée dans le log du modèle 3 (Figure V - 2).*

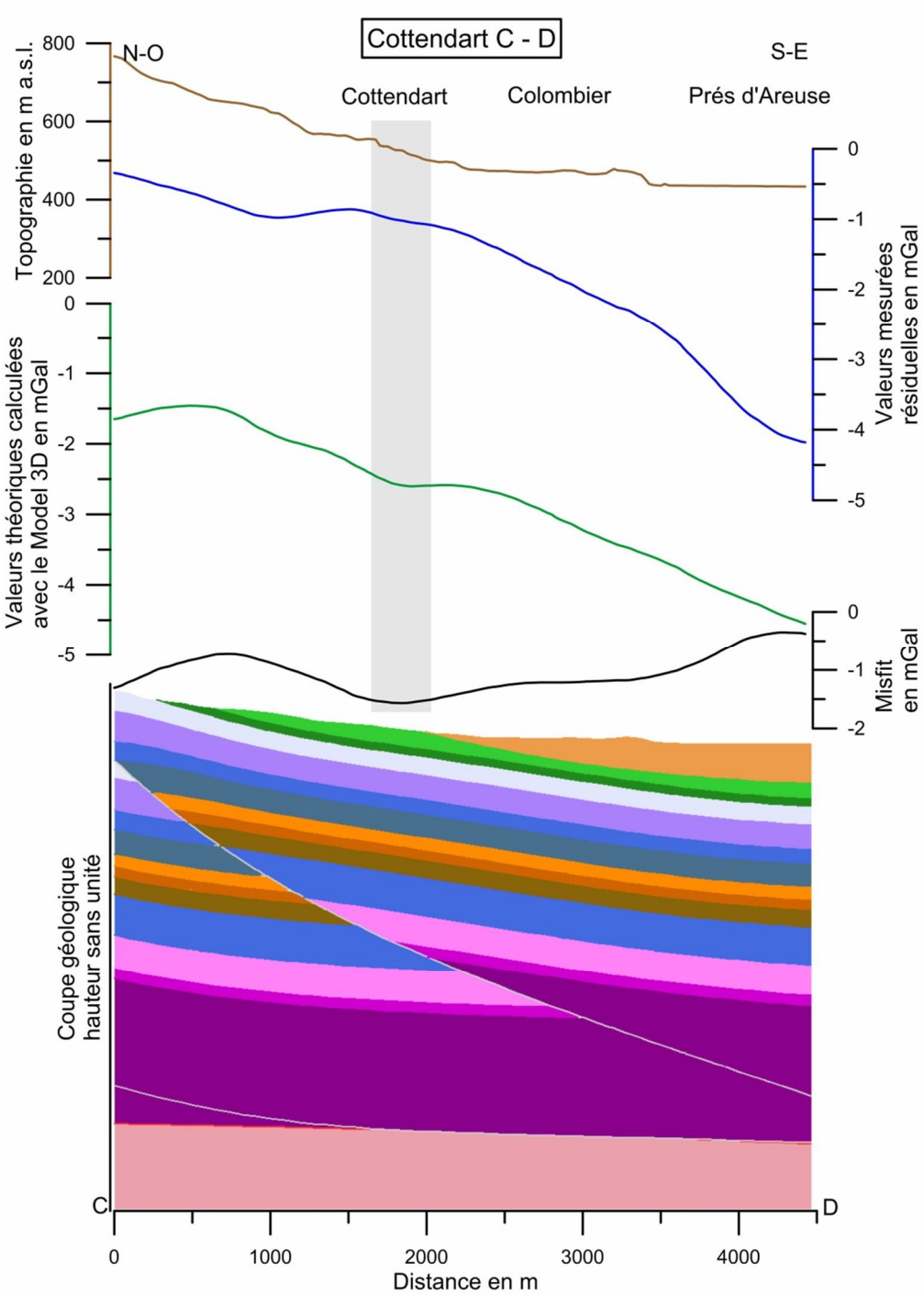



*Figure V - 7. Comparaison profile gravimétrique C-D sur la zone de Cottendart (Figure V - 3). En haut : Topographie. Au centre : Valeurs gravimétriques résiduelles obtenues après corrections des valeurs mesurées (courbe bleue). Valeurs gravimétriques théoriques obtenues à partir du modèle géologique 3D (courbe verte). Misfit obtenu par soustraction de la courbe théorique par la courbe résiduelle (courbe noire).En bas : Coupe géologique 2D extraite du modèle géologique 3D (Figure V - 2).Une description du log géologique est présentée dans le log du modèle 3 (Figure V - 2).*

# 3. Modélisation des zones de forage potentielles et analyse des zones de fracturation

## 3.1 Modèle pour le site de Cottendart

Un calcul plus fin, avec une résolution de 50 m horizontalement et verticalement, a également été effectué à l'intérieur du Modèle 3, autour du site de Cottendart. Un log synthétique de forage a été réalisé sur une zone de 1 x 1 km autour de l'usine d'incinération (Figure V - 8).

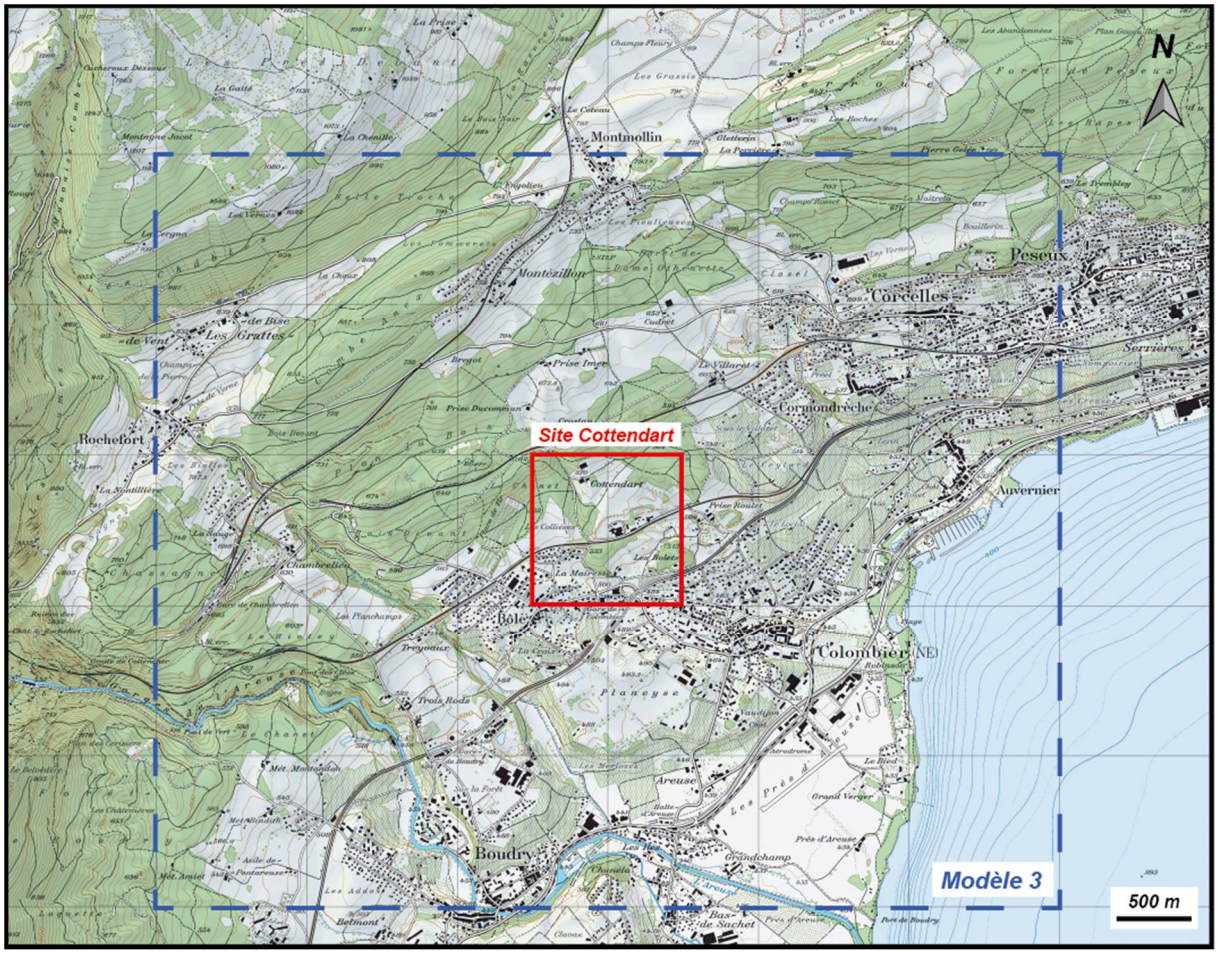
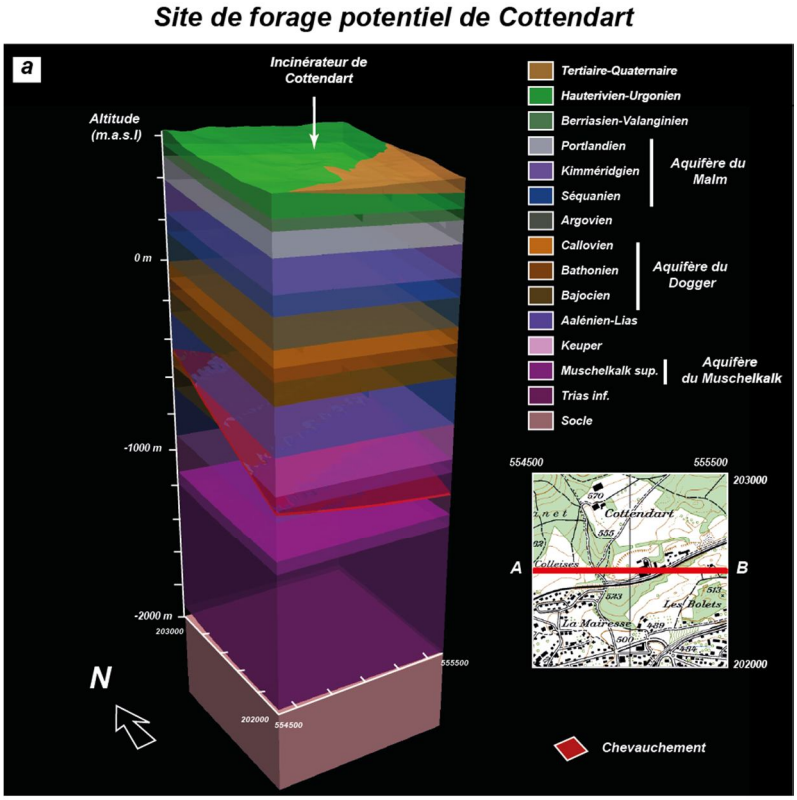
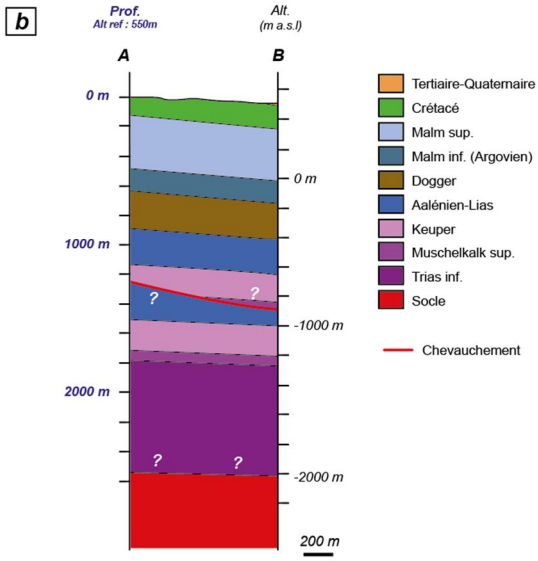



*Figure V - 8. Localisation des modèles réalisés pour la région Auvernier-Boudry. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

## 3.2 Etude de sites de forage potentiel pour le site de Cottendart

La Figure V - 9a montre la géométrie en 3D de l'ensemble de la pile stratigraphique. La Figure V - 9b correspond à un log de forage synthétique représentatif de la zone, et la Figure V - 9c donne la profondeur du toit des trois aquifères potentiels dans la zone sélectionnée. L'aquifère du Muschelkalk est sur ce site présent à deux profondeurs différentes. Les incertitudes sur les profondeurs sont estimées à partir de la variabilité des épaisseurs de chaque formation. La position du plan de chevauchement est hypothétique ainsi que l'interface entre le socle et la couverture (Figure V - 9b).




c

| Aquifères potentiels | Profondeur (Toit) | Incertitude |
|---|---|---|
| **Malm sup.** | 100-200 m | ±50 m |
| **Dogger** | 600-700m | ±100 m |
| **Muschelkalk sup.** | 1300-1400 m | ±200 m |
| | 1700-1800 m | ±300 m |

*Figure V - 9. (a) Modèle géologique 3D pour le site de Cottendart. (b) Colonne synthétique de forage pour le site de Cottendart (c) Profondeur du toit de aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la*

*Figure V - 8.*

# 4. Potentiel géothermique

## 4.1 Modèles thermiques de détail

### 4.1.1 Paramètres des modèles

Les modèles ont été réalisés à l'aide du module de modélisation directe de température du logiciel Geomodeller (BRGM, Intrepid geophysics). Le modèle géologique 3D utilisé est le Modèle 3 (cf. §2). Les paramètres de conductivité thermique et de production de chaleur sont ceux présentés au Chapitre II.

La température à la surface a été fixée à 10°C pour les modèles normaux (sans effet du karst), ce qui correspond à la moyenne annuelle des températures enregistrées par les stations météorologiques cantonales pour la région du littoral. Cette température est fixe, quelle que soit l'altitude, car le logiciel ne permet pas d'inclure de variations. Pour pouvoir déterminer le flux de chaleur à la base du modèle, il est nécessaire de fixer la valeur de ce flux à la surface du modèle. Basé sur les données de la littérature le flux de chaleur a été fixé à 80 $mW.m^{-2}$ à la surface du modèle (Données de l'Atlas de la Suisse et de Medici & Rybach, 1995). Le résultat obtenu à la base du modèle, c'est-à-dire à -2500 m.s.m, indique que le flux calculé est de 75 $mW.m^{-2}$. Un détail de la procédure de calcul est décrit dans le Chapitre II.

Pour le site de Cottendart, ou le karst affleure à la surface, la température a été fixée à 12°C à la base du Malm supérieur. Cette température correspond à un gradient géothermique faible (5-10°C/km) pour la zone karstifiée et est en accord avec les données de forages proches dans l'aquifère du Malm (Tableau V - 2). Les paramètres des différents modèles sont résumés dans le Tableau V - 3.

*Tableau V - 2. Données d'une sélection de forages profonds dans le canton de Neuchâtel pour la zone littorale (d'après données de Groupe de travail PDGN, 2010 et Archives CHYN)*

| **Forage** | **Température du réservoir (°C)** | **Débit ($l \cdot s^{-1}$)** | **Profondeur (m)** | **Aquifère** |
|---|---|---|---|---|
| Bevaix | 9 - 14 | 75 | 300 | Malm |
| St-Aubin | | | | |
| SA1 | 11 - 13 | 31 | 313 | |
| SA2 | 13 - 14 | 20 | 380 | Malm |
| SA3 | 12 - 13 | 20 | 315 | |

*Tableau V - 3. Paramètres utilisés pour les modèles thermiques détaillés de la région Auvernier-Boudry.*

| **Région - Site** | **Flux base du modèle ($mW.m^{-1}$)** | **T Surface (°C)** | **T base Malm sup. (°C)** |
|---|---|---|---|
| Auvernier - Boudry | 75 | 10 | |
| Site Cottendart | 75 | | 12 |

### 4.1.2 Température dans les aquifères

La distribution des températures au toit des aquifères du Dogger et du Muschelkalk est présentée sur les Figure V - 10et Figure V - 11 respectivement. On peut y observer une augmentation de la température en direction du littoral liée à la structure du premier pli du Jura. Les températures les plus élevées sont observées pour la zone littorale et atteignent ~35°C pour le Dogger et ~55°C pour le Muschelkalk.

Le Tableau V - 4présente la synthèse des estimations de température pour le site potentiel de forage de Cottendart. Le modèle karst montre des températures de ~10°C inférieures au modèle normal. Ces valeurs sont des minima et ne correspondent pas forcément à la réalité.

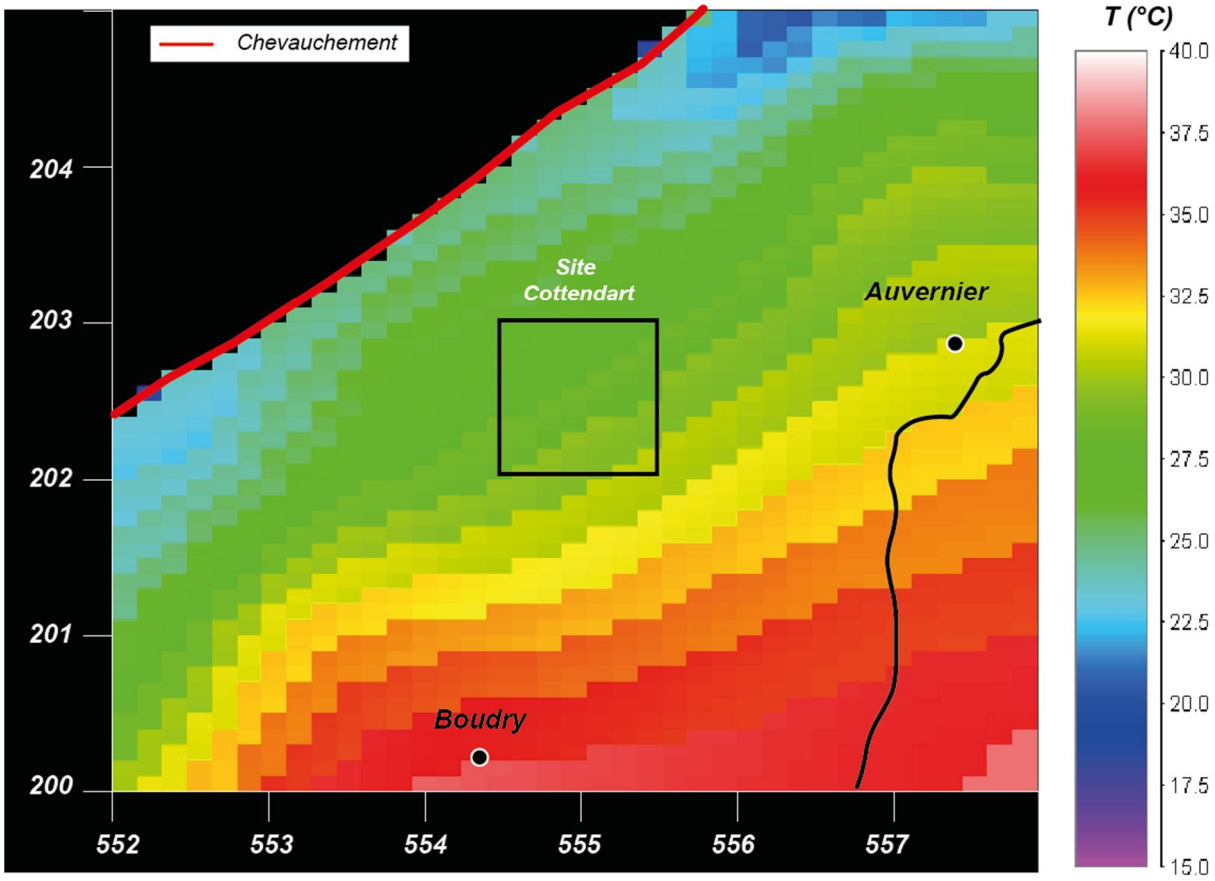



*Figure V - 10. Température calculée au toit du Dogger (modèle Auvernier – Boudry). La ligne rouge indique la bordure de l'aquifère modélisé et la zone noire cache les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Dogger.*

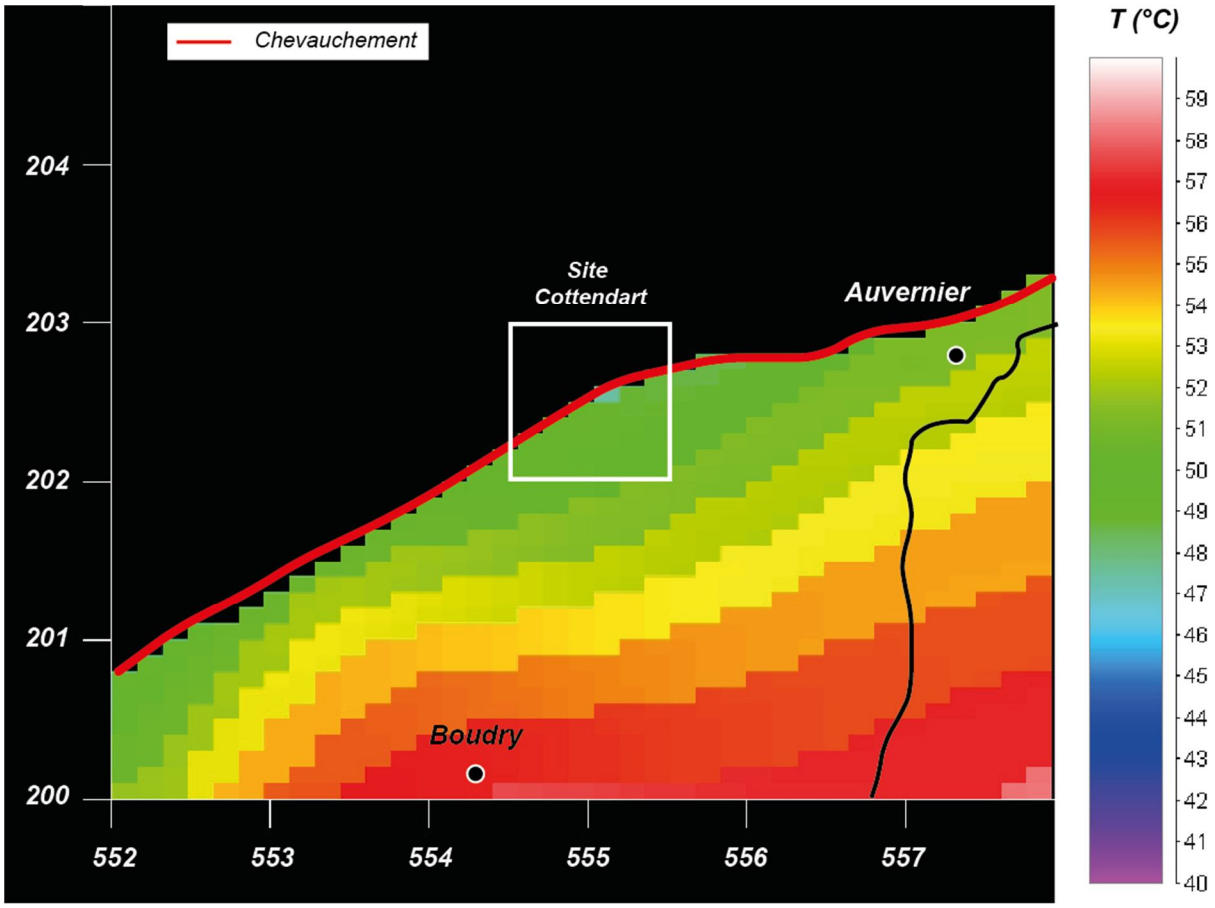



*Figure V - 11. Température calculée au toit du Muschelkalk (modèle Auvernier - Boudry). La ligne rouge indique la bordure de l'aquifère modélisé et la zone noire cache les formations géologiques n'appartenant pas à l'aquifère du Muschelkalk.*

*Tableau V - 4. Bilan des températures estimées pour le site de la région Auvernier – Boudry.*

| **Aquifère** | **Site Cottendart** | | |
|---|---|---|---|
| | **Profondeur moyenne (m)** | **Température moyenne et écart-type (°C)** | |
| | | Non karstifié | Karstifié |
| Malm | 300 | 19 ± 3 | 12 (fixé) |
| Dogger | 800 | 31 ± 2 | 21 ± 2 |
| Muschelkalk | 1350 | 50 ± 1 | 41 ± 1 |
| Muschelkalk2 | 1750 | 59 ± 1 | 50 ± 1 |

# 5. Potentiel d'utilisation de la chaleur

## 5.1 Introduction

L'étude confiée au bureau Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA avait pour buts d'analyser les scénarios d'exploitation à mettre en œuvre pour valoriser la ressource géothermique au voisinage des sites potentiels envisagés en priorité par le projet GeoNE pour des forages profonds sur le Littoral Neuchâtelois dans les zones de Neuchâtel-Monruz et de Saint-Blaise-Marin.

En raison des réflexions menées actuellement sur la zone de Colombier, liées à l'arrêt programmé de l'incinérateur de Cottendart, il faudra trouver une énergie de substitution pour livrer de la chaleur au réseau de chauffage à distance Cadbar. Dans cette optique, une évaluation très préliminaire des opportunités de valorisation de la géothermie pour le CAD Cadbar a été conduite dans ce mandat.

Contrairement aux possibilités plus immédiates et mieux connues de la valorisation de la chaleur à température élevée (utilisation en direct de la chaleur géothermique à plus de 80°C), la mise en valeur de la chaleur à basse température n'est pas spontanément évidente. Les systèmes projetés et les exemples de réalisation sont rares, parfois peu performants et mal adaptés aux conditions géologiques du littoral neuchâtelois. Récemment, plusieurs projets prometteurs ont été menés en vue d'exploiter en réseau à très basse température sur les sites de la Béroche (NE) et de St-Imier (BE), avec des températures de la ressource comprise entre 12 et 20 °C. Le contenu de cette section provient essentiellement du rapport du bureau Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA (2011).

## 5.2 Travaux réalisés

L'intégration de la région Auvernier – Boudry et la proposition de remplacer la chaleur de l'incinérateur de Cottendart par la géothermie profonde n'étant intervenues que dans la dernière partie du projet GeoNE, seule une évaluation préliminaire a été réalisée sur la possibilité de valoriser une ressource géothermique pour le CAD Cadbar. Par contre, les investigations générales menées pour les zones de Neuchâtel et St-Blaise – Marin peuvent dans une certaine mesure être extrapolées au cas de Cottendart.

En effet, pour les deux zones de Neuchâtel et St-Blaise-Marin, les scénarios d'exploitation les plus représentatifs et probables en termes de débit-température de la ressource, et pour chaque aquifère potentiellement exploitable ont fait l'objet d'études techniques et économiques détaillées (cf. Cahpitre III). Ensuite, des modèles de calcul ont été établis, permettant de calculer les paramètres-clés techniques et économiques de la production et la distribution de chaleur en fonction des caractéristiques de la ressource. Les résultats peuvent être étendus aux scénarios d'exploitation possibles pour le réseau de chaleur Cadbar.

## 5.3 Modes d'exploitation de la chaleur géothermique

### 5.3.1 Critères de base

L'objectif doit être que le réseau de distribution, qu'il soit existant ou à construire, fournisse un maximum d'énergie géothermique. Il s'agit également de minimiser les pertes et que le recours sans doute indispensable à des pompes à chaleur garantisse des coefficients de performance les plus élevés possibles et donc des rendements énergétiques à même de justifier cette forme d'énergie.

L'utilisation de pompes à chaleur combinées à des couplages chaleur-force à gaz garantissant l'autosuffisance de l'approvisionnement en électricité nécessaire à la production de chaleur est apparue comme le mode de valorisation le mieux adapté aux conditions de débit/température attendues.

Les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire des bâtiments situés sur les secteurs de distribution potentiels étudiés dans la présente étude nécessitent d'avoir une ressource géothermique à une température d'au moins 85°C pour alimenter le réseau de distribution utilisant la chaleur de la ressource directement sans machine thermique.

Considérant les températures attendues de la ressource géothermique (50 à 60°C au maximum), le recours à des machines thermiques, qu'elles soient centralisées sur site de forage ou décentralisées chez les consommateurs, est inévitable, si l'on veut assurer l'ensemble des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.

### 5.3.2 Description des systèmes

Dans la pratique, la valorisation de la géothermie en ayant recours à des machines thermiques peut être réalisée selon deux systèmes principaux.

#### RESEAU A BASSE ENTHALPIE (NOUVEAU RESEAU)

La chaleur est transportée jusqu'aux consommateurs à la température de la ressource géothermique (20-50°C) via un réseau de conduites enterrées. L'élévation de la température au niveau demandé par le consommateur pour le chauffage et l'eau chaude est ensuite réalisée par des machines thermiques (PAC) décentralisées en fonction des besoins thermiques de chaque immeuble. Cette forme de distribution de la chaleur géothermique sous forme de réseaux « froids » est peu répandue, malgré ses avantages en termes d'efficacité énergétique. On peut citer en exemple les projets de St-Imier (BE) et de St-Aubin (NE) fonctionnant sur ce principe.

#### SYSTEME DE DISTRIBUTION A HAUTE TEMPERATURE (RESEAU CADBAR EXISTANT)

Le niveau thermique du fluide pompé est élevé dans une centrale de chauffe située idéalement à proximité du forage et composée d'un système de machines thermiques (PAC) et d'un système d'appoint et de secours (CCF et chaudière) puis distribué via un réseau de conduites enterrées isolées vers des consommateurs. La combinaison d'une pompe à chaleur électrique et d'un couplage chaleur-force est appelée PAC-Gaz.

En évaluant les avantages et les inconvénients de ces deux systèmes, on peut voir que la basse enthalpie a l'avantage d'une meilleure efficacité énergétique, ceci d'autant plus que la production d'électricité est compensée, mais coûte plus cher en termes d'investissements. Donc la variante basse enthalpie est la plus pertinente au plan énergétique si l'on souhaite valoriser au maximum la ressource géothermique.

## 5.4 Possibilités de valorisation à Colombier

Dans un proche avenir, le CAD Cadbar de Cottendart (Colombier-Bôle) ne devrait plus être alimenté par l'incinération d'ordures ménagères, dont l'élimination sera centralisée à La Chaux-de-Fonds (VADEC). Les conditions géologiques à Bôle-Colombier ne sont pas à priori défavorables à la réalisation de forages géothermiques profonds. Les conditions de température et profondeur de forage ont été évaluées dans les chapitres précédents. Par contre la réalisation d'un forage géothermique à proximité de l'usine de Cottendart reste du domaine de l'exploration pure.

D'après l'entreprise Viteos, les caractéristiques du réseau actuel Cadbar sont les suivantes :

- Puissance souscrite : 11.1 MW
- Vente annuelle d'énergie : 19.8 GWh/an
- Température départ : CAD 85 à 105°C
- Température retour : CAD 60 à 70°C (envisageable à 55°C)
- Nombre de clients raccordés : 103
- Prix de vente de l'énergie : 11 ct/kWh.

En termes de puissance, le réseau Cottendart est de taille similaire au réseau CUM de Neuchâtel dans son état actuel. On peut donc imaginer d'alimenter le réseau Cottendart en suivant le même principe qu'à Neuchâtel, c'est-à-dire en intégrant la géothermie au réseau existant. La géothermie pourrait être compétitive au plan financier et permettrait une économie de combustible (gaz, bois ou autres combustibles) de l'ordre de 22 % si l'on considère un objectif géothermique minimal de 15 l/s à 40°C, et d'avantage si le forage se révèle particulièrement productif en termes de débit et de température.

Les calculs de l'investissement et du prix de revient de l'énergie n'ont pas été réalisés pour le site de Cottendart et le réseau Cadbar, mais les résultats des investigations sur les trois scénarios retenus dans l'étude de la zone Neuchâtel – Monruz sont rappelés dans le Tableau V - 5, à titre d'exemple.

*Tableau V - 5. Scénarios retenus pour la zone Neuchâtel – Monruz avec intégration de la géothermie au réseau de distribution de la chaleur du CUM*

| **Aquifère considéré** | **No scénario** | **Débit (l/s)** | **Température (°C)** | **Investissement (Mio CHF)** | **Prix revient de l'énergie (ct/kWh)** |
|---|---|---|---|---|---|
| Malm | N-Ma-2 | 15 | 21 | 4.9 | 18.5 (12.1*) |
| Dogger | N-D-2 | 10 | 37 | 8.4 | 16.0 |
| Muschelkalk | N-Mu-2 | 10 | 57 | 12.5 | 13.1 |

* En considérant la valorisation de l'eau pompée comme eau destinée à la consommation.

Pour mesurer la compétitivité de la chaleur géothermique délivrée, on peut la comparer au prix de vente de ~11 ct/kWh pratiqué sur le réseau Cadbar. On constate que dans l'ensemble, le prix de revient est proche, mais globalement légèrement supérieur au prix de vente du réseau Cadbar.

L'exploitation du Malm à 20°C (10 l/s et 15 l/s) est peu favorable (respectivement 25.6 ct/kWh et 20.3 ct/kWh), sauf en cas de revente d'eau potable.

L'exploitation du Dogger est quasi compétitive à partir de 15 l/s (15.6 à 11.6 ct/kWh).

L'exploitation du Muschelkalk est généralement compétitive (12 à 9.8 ct/kWh). Le surcoût lié aux forages plus profonds est en partie absorbé par l'amélioration de la performance (frais énergétiques) de l'installation lors de l'exploitation de la chaleur géothermique à >50°C (échangeur en direct sur les retours à 50°C).

## 5.5 Conclusions

Dans les années 1970, les exploitants français des champs géothermiques du bassin de Paris qui disposaient d'eau géothermale entre 50 et 70 °C sur des sites très habités avaient compris que l'exploitation de la chaleur en cascade était une condition fondamentale à la mise en valeur de la chaleur géothermique : bâtiments équipés de radiateurs, planchers chauffants puis pompes à chaleur.

La nécessité d'obtenir des retours au forage à la plus basse température possible est pour le réseau Cadbar aussi une condition de succès, impliquant donc de recourir à un système de pompe à chaleur. Deux options subsistent : un réseau modifié pour la basse température ou fournir la chaleur au réseau existant.

- Réseau de distribution à basse enthalpie (20 à 50 °C) avec élévation de la température de l'eau dans la chaufferie de chaque consommateur;
- Création d'une chaufferie centralisée avec pompes à chaleur et chaudière d'appoint délivrant de l'eau à 65°C et alimentant un réseau 65-50 °C en été et 80-45 °C en hiver.

Au plan de l'efficacité énergétique, l'étude démontre clairement que l'efficacité du réseau à basse enthalpie est la meilleure, c'est-à-dire que la part d'énergie géothermique valorisée est la plus élevée.

Au plan économique en revanche, en raison de la forte diminution du prix des pompes à chaleur qui est inversement proportionnel à leur puissance, la création d'un réseau à haute température est plus favorable.

Au plan économique aussi, il faut relever que la présence ou non d'un réseau existant est déterminante pour le choix de l'option retenue. Le réseau Cadbar appelle un apport géothermique valorisé dans la centrale elle-même (haute température).

Au plan économique et compte tenu du prix actuel des énergies conventionnelles (gaz, mazout) on doit admettre que la mise en valeur de la chaleur géothermique dont on pressent l'existence sous le territoire neuchâtelois exigera un appui financier extérieur pour que la vente de la chaleur soit compétitive. Des taxes ($CO_2$) sont d'ailleurs prévues à cet effet.

Dans tous les cas, les moyens de calcul mis en place dans le cadre de la présente étude seront à même de permettre de trouver la solution optimum à chaque situation. Priorité devra être donnée à la probabilité de succès géologique. Le planificateur (l'ingénieur) saura alors chaque fois comment tirer le meilleur parti de la ressource disponible en fonction des possibilités de consommation sur place.

# 6. Conclusions et recommandations

## 6.1 Conclusion

Le modèle géologique 3D (Détails 3, Figure V - 2) a mis en évidence l'existence d'une structure d'anticlinal sur un plan de chevauchement dans laquelle les formations géologiques deviennent plus profondes en direction du lac. Les observations de surface montrant l'absence de failles ont été supportées par les résultats de la cartographie gravimétrique (Figure V - 3), qui indique l'absence de zones de fracturation associée à des failles. La comparaison du modèle gravimétrique calculé à partir du modèle géologique (Figure V - 5) indique que les densités nécessaires pour reproduire les tendances gravimétriques mesurées sont tout à fait compatibles avec les valeurs de densité connues des différentes formations géologiques présentes (Tableau V - 1).

Par conséquent, l'analyse de la qualité du modèle géologique 3D de détail par la gravimétrie a montré que ce modèle géologique de la région d'Auvernier – Boudry est validé pour :

- la géométrie des grandes structures, tel que les grands anticlinaux ;
- la répartition et les limites des différents chevauchements ;
- la géométrie relative des couches en profondeur.

En revanche, des incohérences demeurent sur :

- la profondeur exacte des différentes formations, qui ne peuvent pas être confirmée pour les aquifères profonds ;

Ces lacunes dans le modèle géologique 3D sont dues au manque d'information géologique sur les orientations et les épaisseurs des structures géologiques. Les informations concernant les effets du karst sur la température des eaux et du débit de l'aquifère restent à déterminer lors des forages.

Ce modèle géologique 3D représente une base indispensable dans l'étude du potentiel géothermique. Toutefois des variations existent entre le modèle et la réalité et ces incertitudes sur la profondeur exacte de chaque aquifère devrait être levées par la réalisation de deux profils sismiques 2D dans la région d'Auvernier – Boudry. Ces profils permettront d'apporter les informations complémentaires à cette étude, qui sont nécessaires avant la réalisation de forage.

Au niveau du site de l'actuelle usine d'incinération de Cottendart, les modèles de température ont montré l'existence d'un réservoir de chaleur potentiel. Bien que l'aquifère du Dogger semble être trop froids pour une utilisation de la chaleur pour le réseau Cadbar, l'aquifère du Muschelkalk apparaît plus prometteur. Basée sur cette étude, à -1750 m.s.m., la température de l'aquifère du Muschelkalk est estimée à 50°C dans le cas où le Malm est karstifié (Tableau V - 4), sinon, sa température est estimée à 59°C au maximum.

Comme indiqué par l'étude préliminaire sur les modes d'exploitation de la chaleur géothermique dans la région d'Auvernier – Boudry, une température de 50°C ou plus de l'aquifère du Muschelkalk permettrait une utilisation intéressante de la chaleur pour le réseau Cadbar. Dans le cas actuel du réseau existant Cadbar, la ressource géothermique devra être combinée avec pompes à chaleur et chaudière d'appoint pour répondre au besoin du réseau. Dans le cas d'un nouveau réseau basse température (basse enthalpie : 20 à 50 °C), la température de la ressource devra être élevée au niveau de la température requise pour chaque bâtiment par des pompes à chaleur dans la chaufferie de chaque consommateur.

## 6.2 Sélection d'un site de forage

Basée sur les résultats des études réalisées dans le cadre de GeoNE (modèle géologique, gravimétrique, potentiel thermique et utilisation de la chaleur), le sous-sol de la région d'Auvernier – Boudry possède un potentiel géothermique, qui pourrait être exploité sous réserve que les forages confirment l'existence d'un débit suffisant.

Bien que les modèles de température (Figure V – 11), indiquent que la température est de quelques degrés plus élevés vers le littoral en raison du plongement de l'aquifère, cette étude propose comme site de forage le site de Cottendart à l'emplacement actuel de l'incinérateur.

La raison principale étant l'existence du terrain disponible pour la mise en place du forage, ainsi que l'existence des installations actuelles et tout particulièrement l'entrée du réseau de chauffage à distance Cadbar. Bien qu'il reste des incertitudes non négligeables sur la profondeur exacte de l'aquifère du Muschelkalk (Figure V - 12c), un log synthétique de forage a été réalisé (Figure V - 12a). Ce log décrit la géométrie en 3D de l'ensemble de la pile stratigraphique.

La Figure V - 12b correspond à un log de forage synthétique représentatif de la zone, et la Figure V - 12c donne la profondeur du toit des trois aquifères potentiels dans la zone sélectionnée. L'aquifère du Muschelkalk est sur ce site présent à deux profondeurs différentes. Les incertitudes sur les profondeurs sont estimées à partir de la variabilité des épaisseurs de chaque formation. La position du plan de chevauchement est hypothétique ainsi que l'interface entre le socle et la couverture (Figure V - 12b).

## 6.3 Recommandations

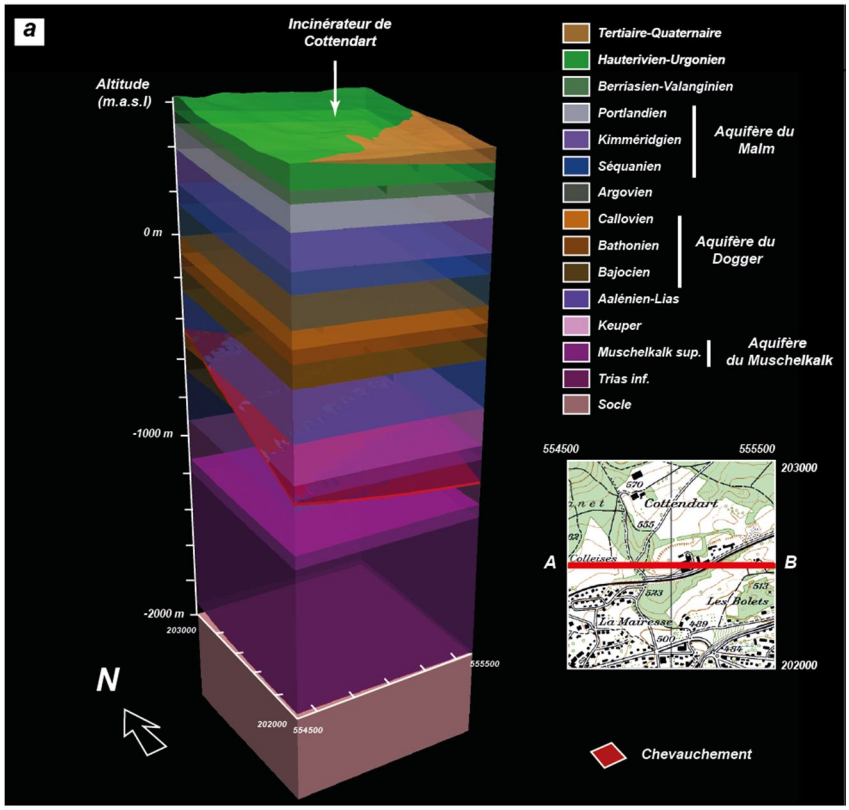
Comme il a été présenté dans cette étude, les avancées dans la connaissance des structures géologiques 3D ont permis d'estimer le potentiel de chaleur (Figure V - 10 et Figure V - 11), ainsi que de sélectionner un site de forage (Figure V - 9) sur le site de Cottendart. De plus cette étude a permis de chiffrer des investissements nécessaires pour la valorisation de la chaleur ainsi que le coût de revient de l'énergie (Tableau V - 5).

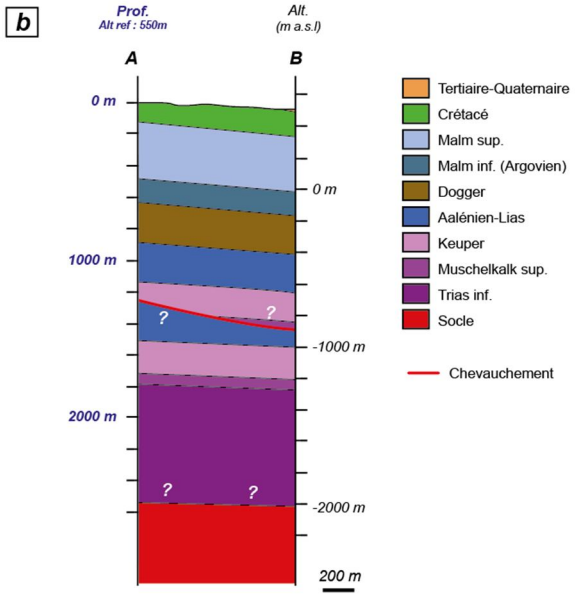
Toutefois, des incertitudes restent sur la profondeur exacte des aquifères profonds, ainsi sur la température et le débit réels des aquifères.

C'est pourquoi, basé sur les résultats du projet GeoNE, l'étude du potentiel géothermique de la zone de La Chaux-de-Fonds Est devrait être complétée par un ou deux profils sismiques, ainsi qu'un forage d'exploration de type slimhole.

Tout d'abord, une campagne sismique doit être réalisée pour affiner les profondeurs et les épaisseurs des aquifères. Ensuite, un forage devra être exécuté et complété par des diagraphies et des tests de production qui permettront de définir les propriétés physiques, hydrauliques et chimiques des aquifères potentiels.

**Site de forage potentiel de Cottendart**




c

| *Aquifères potentiels* | *Profondeur (Toit)* | *Incertitude* |
|---|---|---|
| ***Malm sup.*** | 100-200 m | ±50 m |
| ***Dogger*** | 600-700m | ±100 m |
| ***Muschelkalk sup.*** | 1300-1400 m | ±200 m |
| | 1700-1800 m | ±300 m |

*Figure V - 12. (a) Modèle géologique 3D pour le site de Cottendart. (b) Colonne synthétique de forage pour le site de Cottendart (c) Profondeur du toit des aquifères potentiels. Localisation du modèle sur la Figure V - 8.*

## 6.4 Références bibliographiques

Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA, 2011. Scénarios possibles à mettre en oeuvre pour valoriser l'eau de forages géothermiques sur le littoral neuchâtelois, en particulier dans les régions de Neuchâtel et de St-Blaise-Marin. Rapport T-1584.00.

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

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.

Medici F. & Rybach L., 1995. Geothermal map of Switzerland 1995. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse. Géophysique N°30 : 27 pp.

Suter H. & Lüthi E., 1969. Atlas géologique de la Suisse 1 :25000, Feuille 1144 Val de Ruz. Notice. Commission géologique Suisse.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

# Rapport final de la Phase 1

## Chapitre VI.

## Aspects technologiques

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

**CHAPITRE VI. ASPECTS TECHNOLOGIQUES 199**

**1. PROJET DE FORAGE ..... 199**

1.1 PHASES DES PROJETS DE GEOTHERMIE PROFONDE ..... 199

1.2 CHOIX D'UN SITE ET CONCEPT DE FORAGE ..... 201

1.3 APPAREILS ET CHANTIER DE FORAGE ..... 202

1.4 MESURES ET TESTS DES FORAGES ..... 205

1.5 EQUIPEMENT DES FORAGES ..... 205

1.6 COUT ET ECONOMIE DU PROJET ..... 206

**2. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX ..... 208**

2.1 INTRODUCTION ..... 208

2.2 EXAMEN DES PRINCIPAUX IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ..... 208

2.3 ACCEPTATION SOCIALE DU PROJET ..... 216

**3. ESTIMATION ET MINIMISATION DES RISQUES LORS DU DEVELOPPEMENT D'UN PROJET GEOTHERMIQUE ..... 217**

3.1 INTRODUCTION ..... 217

3.2 RISQUES GEOLOGIQUE ET D'EXPLORATION ..... 218

3.3 CLES POUR MINIMISER LES RISQUES D'UN PROJET ..... 218

3.4 RISQUES FINANCIERS ..... 219

**4. POTENTIEL DES SYSTEMES GEOTHERMIQUES STIMULES ..... 220**

4.1 CONCEPT TECHNIQUE ET ETAT DES CONNAISSANCES ..... 220

4.2 QUESTIONS EN SUSPENS ET PROBLEMES A RESOUDRE ..... 222

4.3 SITUATION DES PROJETS EGS DANS LE MONDE ..... 222

4.4 PROJECTIONS A MOYEN TERME ET SITUATION EN SUISSE ..... 224

4.5 POTENTIEL ET INTERET DES EGS POUR LE CANTON DE NEUCHATEL ..... 225

4.6 BIBLIOGRAPHIE ..... 226

## LISTE DES FIGURES

Figure VI - 1. Exemples d'appareils de forage capables d'atteindre diverses profondeurs.....203
Figure VI - 2. Rig de forage conventionnel de 200 tonnes au crochet pour la réalisation d'un doublet géothermique de 2'000 à 3'000 m (Ungemach, 2012). .....204
Figure VI - 3. Emprise du chantier de forage sans limitation de surface (4'000 $m^2$) pour la réalisation d'un doublet géothermique de 2'000 à 3'000 m de profondeur (Ungemach & Antics, 2009). .....204
Figure VI - 4. Doublet géothermique à Ferrare, Italie (à gauche) ; Tête de puits du forage de production Riehen-1 à Riehen, Bâle (à droite) .....205
Figure VI - 5. Schéma d'une tête de puits de production et de son tubage avec un traitement chimique par injection en fond de puits (Lemale & Jaudin, 1998). .....206
Figure VI - 6. Répartition de la consommation finale selon les agents énergétiques en Suisse en 2010 (OFEN, 2011) .....209
Figure VI - 7. Sismicité en Suisse : Localisation et magnitude des tremblements de terre mesurés entre 1975 et 200,2 ainsi que les séismes historiques prouvés depuis le 13$^e$ siècle (Haslinger et al., 2011). .....212
Figure VI - 8. Illustration du domaine de perméabilité pour divers systèmes géothermiques.....220
Figure VI - 9. Carte du risque sismique en Suisse. En rouge, les zones à risque élevé ; en vert/bleu, les zones à risque modéré (Haslinger et al., 2011).....226

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau VI - 1. Phasage d'un projet de géothermie profonde et situation pour le canton de Neuchâtel. En noir les études réalisées ; en bleu et italique les phases de projet à préparer.....200
Tableau VI - 2. Coût estimé en Suisse pour la réalisation de forages géothermiques équipés de 500 à 2'500 m de profondeur.....207
Tableau VI - 3. Coût estimé sur le plan international pour la réalisation en 2011 de forages géothermiques équipés de 1'500 à 2'500 m de profondeur.....207
Tableau VI - 4. Coût estimé de l'investissement pour l'exécution d'un doublet géothermique dans le Bassin parisien à une profondeur de 1'800 à 2'000 m (Ungemach, 2012).....207
Tableau VI - 5. Admission des forages géothermiques profonds en fonction des zones de protection des eaux souterraines (d'après OFEFP, 2004).....213
Tableau VI - 6. Risques géologiques principaux et leur estimation, en admettant que des investigations complètes ont été menées avant d'entamer le premier forage (d'après Schneider & Wirtz, 2005).....218
Tableau VI - 7. Synthèse des méthodes et technologies appliquées aux projets EGS (ENGINE Coordination Action, 2008 ; Tester et al., 2006 ; U.S. DOE, 2008).....221
Tableau VI - 8. Valeurs recherchées pour les principaux paramètres d'un réservoir EGS (Garnish, 2002).....222
Tableau VI - 9. Problèmes à résoudre et technologies à améliorer pour les systèmes EGS (Tester et al., 2006 ; U.S. DOE, 2008).....223

# Chapitre VI. **Aspects technologiques**

## 1. Projet de forage

### 1.1 Phases des projets de géothermie profonde

Afin d'assurer le maximum de chances de succès à un projet de géothermie profonde, sa réalisation doit passer par un certain nombre de phases lors de l'évaluation, de la prospection et de la réalisation proprement dite. La liste ci-dessous décrit brièvement et de manière générale ces différentes phases et leur tâches et les méthodes utilisées. Les premiers forages n'interviennent pas avant la Phase D, lorsque toutes les techniques indirectes depuis la surface ont été utilisées et leurs résultats exploités. En effet, celles-ci ne représentent qu'une fraction du coût du premier forage d'exploration.

#### CONCEPT

- Evaluation des données existantes du sous-sol, des consommateurs et du potentiel géothermique.
- Proposition pour l'étude de préfaisabilité (Phase A).

#### PHASE A : PREFAISABILITE

- Vérification des hypothèses géologiques avancées à ce jour pour obtenir une image de la géologie profonde aussi précise que possible, sur la base des documents géologiques disponibles (cartes, coupes, profils lithostratigraphiques, etc.), ainsi que de l'interprétation des lignes sismiques existantes.
- Déterminer la profondeur des cibles géothermiques sur les sites sélectionnés comme favorables par l'étude de valorisation de la chaleur (sites de forage à proximité des principaux utilisateurs de chaleur).
- Estimer le débit exploitable grâce aux informations hydrogéologiques disponibles et calculer le domaine de température des eaux sur la base du gradient géothermique.
- Au moyen des informations géologiques les plus réalistes, du débit exploitable et des coûts des forages profonds, déterminer le potentiel de valorisation économique de l'énergie en estimant le nombre et la densité des consommateurs potentiels.
- Proposition et recommandation pour l'étude de faisabilité (Phase B).

#### PHASE B : FAISABILITE

- Etude technico-économique : montage financier, business plan, étude de la valorisation de la chaleur, planification et estimation des coûts des forages, recherche de financement pour la phase C sur le(s) site(s) sélectionné(s).
- Campagnes de prospection géophysiques (si nécessaire), étude d'impact, information publique.
- Evaluation du potentiel géothermique local et sélection d'un site de forage.
- Proposition pour l'avant-projet (Phase C).

### PHASE C : AVANT-PROJET

- Appel d'offres pour la réalisation du premier forage, pour la préparation du chantier de forage et options pour le deuxième forage.
- Demandes d'autorisation pour les travaux.
- Finalisation du montage financier et du business plan.
- Etude détaillée du réseau de chauffage à distance (si nécessaire).
- Campagne d'information

### PHASE D : REALISATION DES FORAGES

- Forage du 1er puits, et du deuxième puits en cas de succès. Chaque forage étant achevé par des mesures, des tests et l'équipement du puits.
- Remise en état du site de forage.
- Information publique.

### PHASE E : CONSTRUCTION DE L'INSTALLATION ET MISE EN SERVICE

- Construction de la centrale et connexion au réseau de chauffage.
- Connexion des forages en surface (échangeur de chaleur, pompe de réinjection).
- Raccordement au réseau de chauffage.

La première phase dite de concept peut être exécutée simultanément sur plusieurs régions d'intérêt potentiel, aboutissant à la sélection d'une ou plusieurs zones prioritaires. C'est ce qui a été effectué par l'étude PGN (Groupe de travail PGN, 2008) (Tableau VI - 1).

*Tableau VI - 1. Phasage d'un projet de géothermie profonde et situation pour le canton de Neuchâtel. En noir les études réalisées ; en bleu et italique les phases de projet à préparer.*

| **Phase d'un projet de géothermie profonde** | **Etat pour le canton de Neuchâtel** |
|---|---|
| Concept | PGN (2007-2008) |
| Phase A : Préfaisabilité | PGN (2007-2008)<br>PDGN (2008-2010)<br>GeoNE Phase I (2010-2012) |
| Phase B : Faisabilité | GeoNE Phase I (2010-2012)<br>*GeoNE Phase II (2012 - 2013) …?* |
| Phase C : Avant-projet | *GeoNE Phase C (2012 - 2013) …?* |
| Phase D : Réalisation des forages | *GeoNE Phase D (2014 - 2016) …?* |
| Phase E : Construction de l'installation et mise en service | *GeoNE Phase E (2018 - 2020) …?* |

La phase suivante de préfaisabilité peut soit concerner encore un territoire important tel que le canton de Neuchâtel, soit devenir plus spécifique pour une ou plusieurs régions ou zones présélectionnées. C'est exactement ce qui a été réalisé par l'étude PDGN (Groupe de travail PGN, 2010) et pour partie par la Phase I du projet GeoNE. Dans le cadre du projet GeoNE Phase I (2010-2012) diverses techniques de prospection ont été menées sur trois régions sélectionnées (env. 10x10 km), lesquelles ont été ensuite réduites à des zones d'étude (env. 3x3 km), puis à des sites de forage (1x1 km). Le tableau 6.1 montre la situation actuelle de l'état des phases du projet de géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel.

Les premières études PGN 2008 et PDGN 2010 menées sur la géothermie profonde à Neuchâtel sont à cheval sur les phases Concept - Préfaisabilité, respectivement Préfaisabilité - Faisabilité. La Phase GeoNE II (2012 - 2013) est proposée dans la section 4 de ce chapitre. Les phases C, D et E n'ont pas encore été conçues et dépendent des choix qui seront effectués par les autorités à la suite des conclusions de ce rapport.

## 1.2 Choix d'un site et concept de forage

Les opérations de forage sont réalisées dans le but d'atteindre un réservoir géothermique et de pouvoir apporter à la surface le fluide caloporteur avec une température et un débit suffisant pour assurer la rentabilité économique du projet. Pendant le processus de foration, l'appareil de forage (rig, foreuse, plateforme de forage) remplit diverses tâches. Il doit notamment assurer la rotation de l'outil de forage (trépan, tricône) pour atteindre la zone de production du réservoir géothermique. Il doit permettre de remonter et descendre les trains de tiges à l'extrémité duquel se trouve l'outil de forage qui concasse la roche. L'appareil de forage permet également de soutenir des actions entre les phases de forage sensu stricto, telles que les essais de production/injection et les mesures diagraphiques (logging). D'autre part, la circulation de la boue de forage est vitale pour maintenir le forage ouvert et accessible et pour faire remonter les débris de roche (cuttings). Finalement, la puissance de l'appareil de forage doit permettre de retirer en tout temps le train de tiges hors du trou et d'assurer le contrôle du poids sur l'outil de forage pour garantir un taux de pénétration optimum.

Le choix d'un site précis de forage est généralement un compromis entre de nombreux paramètres :

- Situation géologique et tectonique la plus favorable pour rencontrer en profondeur la ressource prospectée.
- Parcelle de terrain accessible par des véhicules poids lourds et d'une superficie suffisante pour installer tous les équipements nécessaires pendant la durée du chantier.
- Zone autorisée pour la réalisation d'un forage (pas sur une zone de protection des eaux souterraines, ni sur un site pollué).
- Parcelle ne se trouvant pas trop proche de zones d'habitations.

Plusieurs types de forage peuvent être réalisés lors de projets de géothermie profonde (Thorhallsson, 2012) :

### FORAGE CONVENTIONNEL (REGULAR)

Le forage conventionnel est réalisé avec un diamètre de 8 ½ '' (216 mm) dans le réservoir. Il peut servir de forage d'exploration et ensuite, en cas de succès il devient un puits de production, respectivement d'injection. C'est de loin le type le plus fréquemment utilisé.

### FORAGE DE PETIT DIAMETRE (SLIMHOLE)

Le forage slimhole (ou de petit diamètre) est exécuté avec un diamètre ≤ 6 '' (≤152 mm) dans le réservoir. Il s'agit d'un forage d'exploration pour lequel tout est réduit, à commencer par le prix (-10 à -30%) : le rig de forage est plus petit, la superficie du chantier est plus restreinte, l'impact environnemental et le nombre de personnes le sont également (Vuataz, 1997). La technique de forage slimhole est particulièrement avantageuse au cas où une série de forage d'exploration doivent être réalisés dans une région donnée et dans un laps de temps considéré. Par contre, le petit diamètre de la zone de production engendre des pertes de charges et un slimhole ne peut produire un débit identique à celui d'un forage conventionnel. Théoriquement, lorsqu'un forage slimhole d'exploration a prouvé l'existence d'un réservoir géothermique, il est techniquement possible de le réaléser, c'est-à-dire d'augmenter son diamètre en forant par dessus. Cependant, cette opération

peut s'avérer risquée pour l'intégrité de l'ouvrage et coûteuse. Il vaut en général mieux forer un deuxième puits et utiliser le forage slimhole comme sondage d'observation ou à titre de deuxième puits de production, respectivement de réinjection. L'avantage économique du forage slimhole prend toute sa valeur lorsqu'il s'agit d'une campagne d'exploration comprenant plusieurs forages consécutifs dans une région donnée.

### FORAGE DE GRAND DIAMETRE (LARGE)

Le forage de grand diamètre est réalisé avec un diamètre de 12 ¼ '' (311 mm) dans le réservoir. On utilise ce type de forage de production quand un réservoir à forte perméabilité et grande productivité (≥ 100 $l.s^{-1}$) a été mis en évidence. Dans ce cas, le débit d'un puits conventionnel est également limité par son diamètre et la décision de passer à un forage de 8 ½ '' à un forage de 12 ¼ '' peut faire doubler le débit de production. Par contre, un rig plus puissant et donc de plus grande taille peut devenir nécessaire pour forer un puits de grand diamètre par rapport à un puits conventionnel. Donc son coût sera plus élevé.

Avant de prendre la décision du type de forage à réaliser, une étude ou au moins une évaluation économique se justifie pour en optimiser le choix.

## 1.3 Appareils et chantier de forage

Le choix d'un appareil de forage approprié est l'une des plus importantes décisions lors de la planification d'un forage. Le rig doit posséder une marge de sécurité suffisante (puissance) et des spécifications techniques appropriées au type de forage prévu (profondeur, diamètre). Les rigs utilisés pour des forages géothermiques profonds sont similaires à ceux qui sont engagés pour l'exploration pétrolière ou gazière, avec toutefois quelques différences.

En effet, les débits de production du fluide géothermique doivent être significativement plus élevés que ceux des hydrocarbures et par conséquent les diamètres de puits et de tubage sont généralement plus grands.

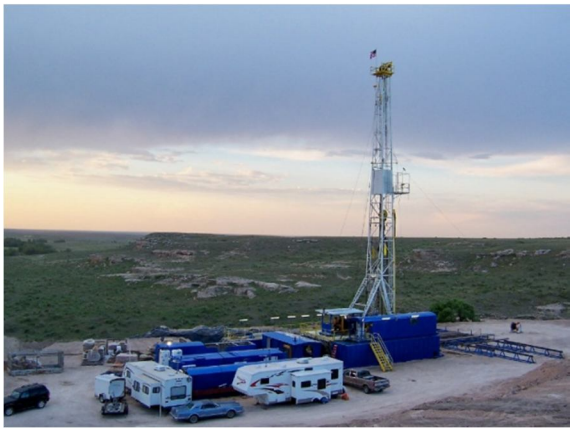
A titre d'exemple, les puits réalisés pour des doublets géothermiques dans le Bassin parisien nécessitent des appareils de forage permettant d'atteindre 2'000 m de profondeur avec une certaine marge de sécurité, c'est-à-dire un rig pouvant pénétrer au moins 2'500 m (Figure VI - 1). Une superficie de 4'000 $m^2$ est nécessaire à l'installation du chantier sans aucune restriction de place, mais elle peut être réduite de moitié en zone urbaine dense où les parcelles sont limitées en nombre et en surface (Figure VI - 2). De nouveaux types de rigs de forage plus compacts sont également disponibles et permettent de réduire encore la superficie nécessaire pour installer un chantier de forage en zone urbaine. Dans le canton de Neuchâtel, les réservoirs aquifères potentiels pour la géothermie se situent entre 1 et 2 km de profondeur environ, donc la superficie nécessaire pour installer les rigs de forage et leur équipement pourrait varier de 2'000 à 3'000 $m^2$ environ (Figure VI - 3).

La durée des opérations de forage est très variable et dépend évidemment de la profondeur finale mais également de la connaissance géologique préalable des terrains à perforer. Dans une région où de nombreux forages existent, la durée des opérations diminue sensiblement. Par exemple, un puits géothermique dévié dans l'aquifère du Dogger du Bassin parisien et réalisé avec un appareil de grande dimension prend actuellement 30 à 35 jours pour atteindre une profondeur verticale de 1'800 m (forage, diagraphies, complétion et tests), ce qui représente une vitesse moyenne de forage de 55 m/jour. Cette rapidité est due à l'excellente connaissance acquise durant les 40 ans d'expérience de la géothermie en Ile de France. Dans une zone de prospection peu ou pas connue, les durées de forage peuvent augmenter de 50 % en raison des surprises géologiques rencontrées (types de roche, épaisseurs, zones de fractures, etc.).

Lorsque le doublet géothermique est achevé, le chantier est démonté et le terrain est remis en état. Si la centrale de chauffage n'est pas construite sur la même parcelle, les têtes de puits et les conduites aller-retour peuvent, si nécessaire, être intégralement enterrées. Des plaques métalliques au sol pour accéder aux têtes de puits seront alors les seuls témoins de la présence du doublet.

Foraco BF830 : 1'500 m

Foraco BF831 : 1'500 m



Ideco H-525 : 2'000 m

Drillmec G-102 : 2'500 m

Ideco 1200 : 3'500 m

Terra Invader TI-350 : 5'000 m

*Figure VI - 1. Exemples d'appareils de forage capables d'atteindre diverses profondeurs*

*Figure VI - 2. Rig de forage conventionnel de 200 tonnes au crochet pour la réalisation d'un doublet géothermique de 2'000 à 3'000 m (Ungemach, 2012).*

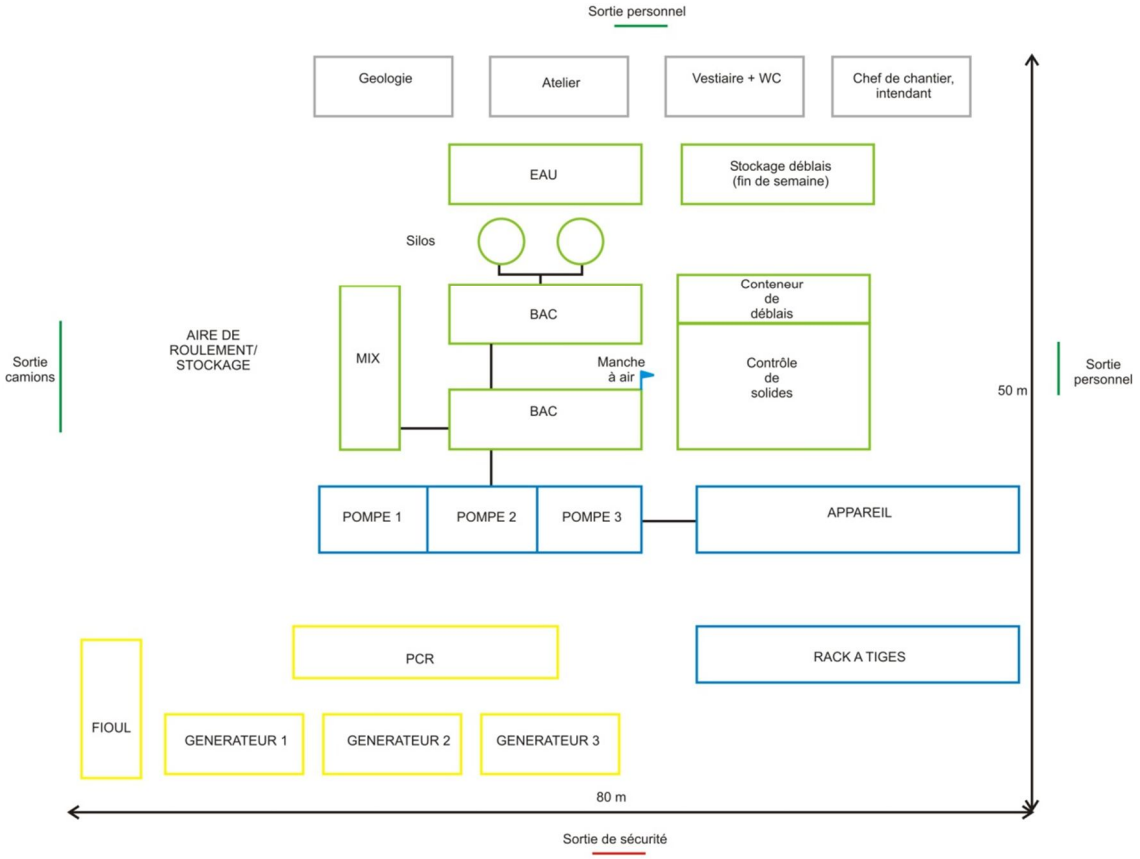



*Figure VI - 3. Emprise du chantier de forage sans limitation de surface (4'000 m$^2$) pour la réalisation d'un doublet géothermique de 2'000 à 3'000 m de profondeur (Ungemach & Antics, 2009).*

## 1.4 Mesures et tests des forages

Lorsque le forage profond est terminé ou lors d'une phase de tubage intermédiaire, on procède à des mesures de nombreux paramètres dans le forage au moyen d'outils de diagraphies géophysiques suspendus à un câble (logging). Ces opérations sont très importantes car elles apportent des renseignements détaillés sur les caractéristiques des formations géologiques et des aquifères rencontrés lors de la perforation. Elles ne doivent pas être négligées, car leur coût ne représente que 2 à 5 % du prix total du forage. De plus, les débris de roches (cuttings) sont déterminés visuellement en continu par le géologue de forage et certains échantillons peuvent être analysés de manière plus détaillée en laboratoire.

Afin de pouvoir estimer la productivité ou l'injectivité d'un forage, des tests hydrauliques sont engagés lorsqu'un réservoir potentiel est atteint en cours de forage ou à la fin de celui-ci, dans la partie non tubée du fond du puits. Le test le plus classique est l'essai de pompage par paliers de débits successifs, d'une durée allant de quelques heures à quelques semaines. Sa fonction est d'abord de nettoyer le forage et ensuite de pouvoir calculer le débit et la température de production à long terme lors de la future exploitation. D'autres tests plus complexes peuvent être engagés si nécessaire tels que des essais de production et/ou d'injection entre packers. Finalement, des prélèvements seront analysés pour connaître le chimisme du fluide géothermique et les risques de corrosion et/ou de dépôt de minéraux sur les parois des forages et des conduites de surface.

Dans le cas de réalisation d'un doublet géothermique, l'un des deux forages servira pour l'injection du fluide refroidi et donc un test d'injectivité permet également d'évaluer les performances de ce puits. En effet, malgré leur proximité dans l'aquifère profond (distance horizontale de 500 à 1'000 m), les deux puits n'auront pas exactement les mêmes caractéristiques thermiques, hydrauliques et chimiques.

## 1.5 Equipement des forages

L'équipement des forages (tubage, pompe, tête de puits) et les matériaux utilisés dépendent de la profondeur du puits et du débit de production, mais surtout des caractéristiques chimiques du fluide qui sera produit puis réinjecté. Si le fluide n'est pas corrosif, un matériel standard sera utilisé, mais des aciers spéciaux peuvent être considérés pour les tubages et la tête de puits si la salinité et la concentration en gaz du fluide géothermique sont élevées et/ou si les caractéristiques du fluide dans les conduites (après l'échangeur et dans le puits de réinjection) provoquent des phénomènes de corrosion et/ou de dépôt (Figure VI - 4).

*Figure VI - 4. Doublet géothermique à Ferrare, Italie (à gauche) ; Tête de puits du forage de production Riehen-1 à Riehen, Bâle (à droite)*

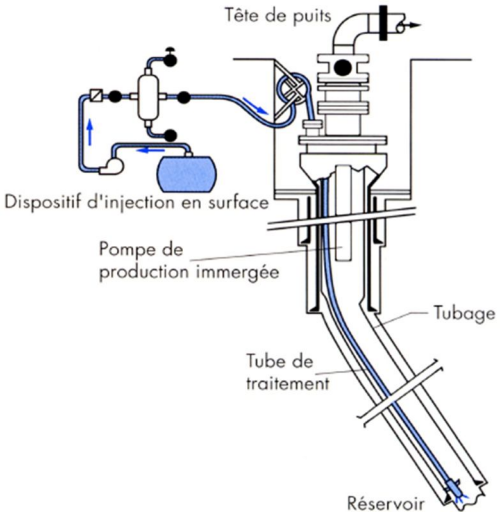



*Figure VI - 5. Schéma d'une tête de puits de production et de son tubage avec un traitement chimique par injection en fond de puits (Lemale & Jaudin, 1998).*

Si nécessaire, un traitement chimique peut être installé sur le puits de production. Il consiste en l'injection d'un inhibiteur de corrosion (composé organique de type phosphonate, polyacrylate) au fond du puits pour protéger l'ensemble de la boucle géothermale. La formation d'un film protecteur ralentit la corrosion et empêche la croissance cristalline de minéraux secondaires (Figure VI - 5).

Il existe de nombreux inhibiteurs de corrosion et la sélection est faite en fonction du chimisme de l'eau et de la présence plus ou moins abondante de gaz (surtout $H_2S$ et $CO_2$) et de bactéries. Les inhibiteurs de corrosion ont plusieurs fonctions : anti-corrosif, anti-dépôt, dispersant et biocide.

## 1.6 Coût et économie du projet

Les coûts de forage d'un doublet géothermique sont difficiles à quantifier au préalable, sans connaître le site du chantier et de la centrale, le nombre de forages, la profondeur finale, le choix d'une déviation et finalement de l'état du marché du forage. Tous ces critères influencent fortement les prix et seuls un appel d'offre préliminaire puis un appel d'offre détaillé permettent de préciser les coûts. Le prix du mètre de forage évolue rapidement en fonction de l'offre et de la demande sur le marché du forage pétrolier, et donc du prix du baril de pétrole ! La disponibilité des appareils de forage permettant une exploration entre 2'000 et 4'000 m de profondeur peut également atteindre un seuil critique et retarder la réalisation d'un projet de plusieurs mois (Tableau VI - 2). Actuellement, aucune compagnie en Suisse ne possède d'appareil de forage (rig) pouvant atteindre 2'000 m et plus.

Les prix des forages profonds sont fortement montés depuis le milieu des années 2000 et oscillent depuis ces dernières années, mais les ordres de grandeur peuvent être conservés. Certaines estimations plus ou moins précises, liées à des projets de géothermie profonde en Suisse autorisent des estimations. Les prix varient aussi selon les pays et sont généralement plus élevés en Suisse (Tableau VI - 3). Le coût total d'un projet géothermique dépend évidemment de l'existence, de la transformation ou de la construction d'un réseau de chauffage à distance.

Une étude de faisabilité technico-économique doit être réalisée simultanément au cours de la phase de faisabilité, mais avant la sélection du site de forage proprement dit. Cette étude doit permettre de quantifier les consommateurs potentiels de chaleur, la valorisation de la chaleur et le prix de vente prévisionnel du kWh thermique. Dans le Tableau VI - 4, les investissements d'un projet récent de doublet géothermique dans le Bassin parisien sont présentés. Pour le projet GeoNE, l'étude de valorisation et de faisabilité technico-économique a été réalisée par le Bureau B. Matthey Ing. Cons. SA pour la région de Neuchâtel - St Blaise (chapitre III).

*Tableau VI - 2. Coût estimé en Suisse pour la réalisation de forages géothermiques équipés de 500 à 2'500 m de profondeur.*

| **Profondeur du forage (m)** | **Coût moyen estimé d'un forage (Mio CHF)** | **Projet (référence)** |
|---|---|---|
| 500 | 1.2 ± 0.1 | Suisse en général (1) |
| 1'000 | 2.5 ± 0.2 | |
| 1'500 | 3.7 ± 0.4 | |
| 2'000 | 6.4 ± 0.6 | |
| 2'500 | 9.2 ± 1.0 | |
| 2'300 | 9.0 | AGEPP, Lavey-les-Bains (2) |
| Doublet à 2'500 | 13 ± 2.0 (pour 2 forages) | GP La Côte, Vaud (3) |

(1) Communication écrite de Geothermal Explorers Ltd., 2008 ; (2) Dewarrat & Bianchetti, 2009 ; (3) Bianchetti et al. 2009.

*Tableau VI - 3. Coût estimé sur le plan international pour la réalisation en 2011 de forages géothermiques équipés de 1'500 à 2'500 m de profondeur.*

| **Profondeur du forage (m)** | **Coût moyen estimé d'un forage** | **Référence** |
|---|---|---|
| Doublet à 1'800 m | 11 Mio CHF (9 Mio EUR) pour 2 puits déviés de 2'100 m de longueur chacun dans le Bassin parisien | (1) |
| 2'500 | 4 Mio CHF (4 Mio USD) | (2) |
| 1'500 à 2'500 | Puits d'exploration (slimhole) : 1'400 CHF/m (1'400 USD/m)<br>Puits de production (grand diamètre) : 2'000 CHF/m (2'000 USD/m) | (2) |

(1) Ungemach, 2012. ; (2) Thorhallsson, 2012a.

*Tableau VI - 4. Coût estimé de l'investissement pour l'exécution d'un doublet géothermique dans le Bassin parisien à une profondeur de 1'800 à 2'000 m (Ungemach, 2012)*

| **Equipements** | **Coût minimum (Mio EUR)** | **Coût maximum (Mio EUR)** |
|---|---|---|
| Doublet de forage et équipements | 8.5 | 9.0 |
| Boucle géothermale | 1.2 | 1.3 |
| Echangeur de chaleur | 0.3 | 0.4 |
| **Total opérations sous-sol** | **10.0** | **10.7** |
| Boucle secondaire | 0.6 | 0.7 |
| Chaufferie | 0.8 | 0.9 |
| Conduite du réseau de distribution (CAD) | 8.0 | 10.0 |
| Sous-stations | 2.5 | 3.0 |
| **Total opérations surface** | **11.9** | **14.6** |
| **Total des investissements** | **21.9** | **25.3** |

# 2. Aspects environnementaux

## 2.1 Introduction

L'impact positif des installations de géothermie en aquifères profonds est principalement attribué à la substitution des combustibles fossiles par une ressource indigène, sans déchets ni stockage de matériaux dangereux, et sans émission de $CO_2$ ni d'autres gaz à effet de serre. Généralement, l'exploitation des aquifères profonds passe par un doublet, et par conséquent, l'intégralité du fluide géothermique (eau, gaz, sels dissous) est réinjecté dans la même formation après son usage thermique.

La principale question environnementale est généralement liée au chantier provisoire de forage. Comme tout chantier de construction, il engendre du trafic et du bruit supplémentaires. La différence fondamentale avec la construction d'un bâtiment est liée à la durée journalière du travail. En effet, afin de sécuriser les travaux de forage et de minimiser les coûts, un forage profond est presque toujours réalisé 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Des mesures anti-bruit doivent être prises dès la conception du projet de forage, telles que la localisation et l'organisation du chantier, le type de machines et les parois anti-bruit.

En amont des procédures d'autorisation auxquelles sera soumis le projet lors de sa concrétisation, un examen préalable des principaux impacts environnementaux devra être réalisé pour vérifier la faisabilité et la pertinence du projet du point de vue de la protection de l'environnement.

Selon l'Ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement (OEIE), un projet de géothermie profonde est assujetti à la procédure de l'étude d'impact sous le chiffre 21.4 de l'OEIE (installations géothermiques y compris celles qui exploitent la chaleur des nappes phréatiques) d'une puissance de 5 $MW_{th}$. Si le doublet géothermique délivre une puissance inférieure à 5 $MW_{th}$, ce qui sera vraisemblablement le cas pour un premier projet dans le canton de Neuchâtel, il sera soumis à une procédure plus légère (notice d'impact).

Cet examen préalable des principaux impacts environnementaux doit porter sur les différentes phases du projet : phase de mise en œuvre, phase d'exploitation et phase de mise hors service. Pour chacune d'entre elles, l'impact des critères suivants doit être examiné et quantifié : trafic routier, bruit et vibrations, sismicité induite, air, eaux de surface, eaux souterraines, milieu naturel et paysage, sols, sites pollués et gestion des déchets.

## 2.2 Examen des principaux impacts environnementaux

### 2.2.1 Approche générale

La production d'énergie géothermique se trouve de manière générale à l'origine de conséquences environnementales globalement bénéfiques durant la phase d'exploitation. En effet, la production de chaleur géothermique dans un réseau de distribution est souvent en substitution d'un combustible fossile. Il faut rappeler ici qu'en Suisse, un tiers de toute la consommation d'énergie est liée à la production de chaleur au moyen des combustibles fossiles (pétrole + gaz) pour des habitations et locaux divers (Figure VI - 6).

La géothermie peut être exploitée de manière durable à long terme et de nombreux exemples le démontrent de part le monde, tant pour des ressources de basse, moyenne et haute température. Le bilan énergétique d'un doublet géothermique est largement supérieur aux dépenses en énergie sur l'ensemble de son cycle de vie. Ce bilan s'accompagne de valeurs d'émissions de polluants

atmosphériques notablement plus faibles que celles des autres systèmes de production d'énergie, tels que le mazout et le gaz.

Au niveau local, un projet de géothermie profonde sera à l'origine de certaines nuisances et impacts, maîtrisables, limités dans le temps et réduits à un périmètre d'influence de faible ampleur. Dans les sections suivantes, ces effets, qui sont en général concentrés lors de la phase de mise en œuvre, seront discutés.

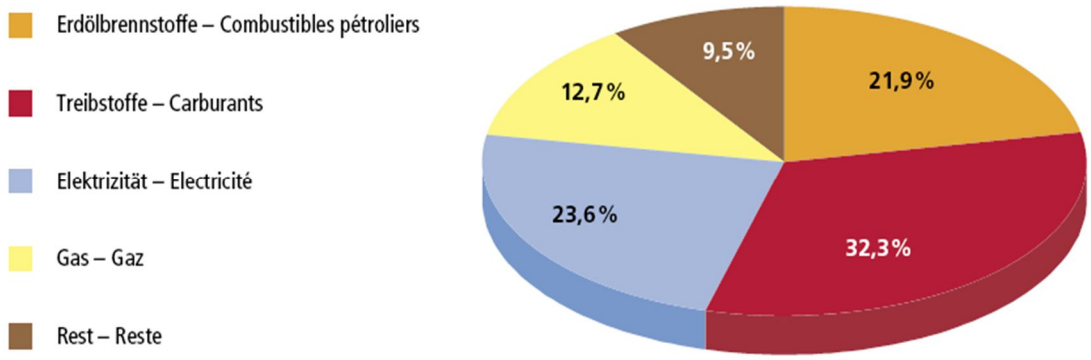



*Figure VI - 6. Répartition de la consommation finale selon les agents énergétiques en Suisse en 2010 (OFEN, 2011)*

## 2.2.2 Trafic

Le trafic induit par un projet de géothermie sera maximal pendant le montage et le démontage de la plateforme de forage. Pendant la phase intensive de montage, dont la durée est de l'ordre de 2 à 3 semaines, un trafic maximal de quelques dizaines de rotations de camions par jour est à considérer. Pendant les travaux de forage, un trafic de quelques rotations de camions par jour est à envisager. La démobilisation de l'appareil de forage et la remise en état du chantier générera un trafic additionnel similaire à celui de sa mise en place.

La phase d'exploitation ne génère aucun trafic de poids lourds. Seul un faible trafic supplémentaire de service est prévu pour les exploitants.

Le trafic lié à la phase de mise hors service ne sera pas supérieur à celui estimé pour la préparation du chantier.

Ainsi, de manière générale, le trafic induit par le projet, limité pendant la phase de chantier et négligeable pendant la phase d'exploitation ne devrait pas engendrer de problématique particulière.

## 2.2.3 Hygiène de l'air

Durant la phase de mise en œuvre, le site de forage sera la source de différentes émissions atmosphériques :

- Emissions dues au trafic induit ;
- Emissions liées aux machines de chantier, y compris les éventuels générateurs diesel ;
- Emissions de gaz explosibles ou toxiques depuis le sous-sol.

Les émissions de polluants atmosphériques générés par le trafic sont considérées comme faible, étant donné son ampleur réduite lors de la mise en œuvre et négligeable pendant la période d'exploitation.

Durant la phase de forage sensu stricto, certains rigs sont entièrement électriques et d'autres produisent leur énergie avec des générateurs diesel. En principe, les sites de forage potentiel prévus dans le canton de Neuchâtel se trouvent tous à proximité du réseau électrique et donc un rig électrique peut être envisagé.

Pendant l'avancement des forages, un échappement de gaz exceptionnel peut survenir (surtout $CO_2$ et $H_2S$) lors du percement d'une couche géologique spécifique. Une partie des gaz reste dissoute dans la boue de forage et les quantités sont généralement faibles. Ensuite, tubage et cimentation viennent sceller ces formations. Pendant la phase de chantier, les émissions de gaz du sous-sol sont un enjeu de sécurité du travail, qui est maîtrisé par la société de forage.

Lors de la phase d'exploitation, il n'y a aucune émission de gaz, car la totalité du fluide géothermique (gaz inclus) produite par un puits est réinjectée dans le réservoir au moyen du deuxième puits. De plus, la boucle géothermale de surface est maintenue à une pression suffisante pour garder les gaz sous forme dissoute dans le fluide.

Le gaz radioactif Radon (Rn) peut être présent dans un fluide géothermique, mais étant donné que l'ensemble du fluide produit est réinjecté, il n'aura aucune influence néfaste. D'autre part, la teneur en gaz radon est généralement beaucoup plus faible dans les aquifères profonds captés par forage que dans certaines sources thermales, où certains processus superficiels font augmenter la teneur en radon.

Les émissions liées à la phase de mise hors service ne seront pas supérieures à celles estimées pour la préparation du chantier et donc considérées de faible ampleur.

### 2.2.4 Bruit et vibrations

Le périmètre d'influence au bruit est défini en fonction des récepteurs sensibles et des degrés de sensibilité (DS) correspondants. Les prescriptions légales applicables dans le cas présent sont contenues dans la l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB). Seule la phase de mise en œuvre est concernée par les questions de bruit et donc les directives destinées à limiter le bruit des chantiers est à considérer.

Lors de la phase de mise en œuvre, les éléments du projet potentiellement sensibles en terme d'émission de bruit sont les suivants :

- Construction : machines de chantier et trafic induit ;
- Forage : rig de forage, tiges de forage, pompes, compresseurs, et générateurs éventuels ;

Comme indiqué sous 2.2.2, le trafic induit par le projet est de faible ampleur. En effet, pendant la phase intensive de préparation du chantier, un trafic maximal de quelques dizaines de rotations de camions par jour est à considérer. Pendant les travaux de forage, un trafic de quelques rotations de camions par jour est à envisager. Ainsi les nuisances sonores liées au trafic peuvent être considérées comme faibles.

La phase de forage constitue la période la plus bruyante du projet, notamment car le forage est exécuté de manière continue, 24/24 heures et 7/7 jours. Les manœuvres de remontée et de descente du train de tiges sont parmi les plus bruyantes. La manipulation des tiges creuses en acier émet également des bruits dérangeants. Une partie de ces nuisances sont limitées par la mise en place de parois anti-bruit autour du chantier de forage qui peuvent atteindre 5 à 10 m de hauteur, en fonction de la hauteur de la plateforme du rig de forage. Une digue anti-bruit faite avec la terre provisoirement décapée de la superficie du chantier peut également couvrir un de ses côtés.

De plus, afin de minimiser les nuisances de la période de chantier, le rig de forage devra être positionné si possible dans la partie la plus éloignée des récepteurs sensibles situés dans le périmètre d'influence du projet.

Lors de la phase d'exploitation d'un doublet géothermique pour la production de chaleur, les seuls éléments émetteurs de bruit sont les pompes : la pompe de production immergée dans le puits de production et la pompe d'injection placée en surface dans le bâtiment de la chaufferie, sur la conduite allant vers le puits d'injection. Donc, les émissions sonores de la phase d'exploitation sont considérées comme nulles.

La phase de mise hors service des installations du site générera un bruit lié aux activités de déconstruction de la centrale géothermique et de la plateforme des puits. D'une durée très limitée, ces nuisances seront beaucoup plus faibles que celles de la période de forage.

Les vibrations induites par les machines de chantier, le rig de forage et le trafic de camions relèvent des activités habituelles d'un chantier.

### 2.2.5 Sismicité induite

Dans la plupart des cas, la réalisation et l'exploitation de doublets géothermiques dans un réservoir aquifère en milieu sédimentaire ne génère aucune sismicité induite (Bassin parisien, Bassin aquitain, doublet de Riehen à Bâle, etc.).

Par contre, les projets de développement des systèmes EGS (Systèmes Géothermiques Stimulés) génèrent, de par leur mode de création et de fonctionnement, de nombreux micro-séismes dont l'immense majorité ne sont détectables que par des géophones implantés dans des forages profonds de contrôle. De très rares séismes peuvent être ressentis en surface par la population locale et sont évidemment dérangeants, même si aucun dégât n'est enregistré.

Au cours des projets EGS, c'est essentiellement la phase de création du réservoir géothermique qui génère des micro-séismes, lors de l'ouverture des fissures dans le granite fracturé par injection d'eau à forte pression.

Tous les projets EGS internationaux (France, Australie, etc.) ont aussi vécu ses phénomènes de sismicité induite. Actuellement, une intense recherche est menée afin de minimiser le risque sismique lié aux projets de géothermie profonde. Depuis des décennies, bien avant la réalisation de projets de géothermie de type EGS, les phénomènes de sismicité induite par les activités humaines ont été recensés: construction de tunnels, exploitation de barrages et de mines, injection de fluides, production de gaz, battage de pieux et trafic intense de poids lourds. Des événements sismiques peuvent se produire lors de ces activités avec une plus grande intensité que ceux observés lors de la stimulation des réservoirs EGS.

Dans le cadre du projet pionnier Deep Heat Mining de Bâle, le processus de stimulation hydraulique a créé une série de micro-séismes d'une magnitude maximale de 3.4 en décembre 2006. Après arrêt immédiat de l'injection d'eau sous haute pression, les effets se sont encore fait sentir pendant plusieurs semaines avec des magnitudes décroissantes. Un consortium international mandaté par le canton pour comprendre ce qui s'était passé et pour analyser le risque sismique de la région bâloise a rendu une étude très complète sur cette thématique (Baisch et al., 2009). Depuis, de nombreuses équipes de chercheurs en Suisse et à l'étranger tentent d'établir des méthodes et des procédés de stimulation qui minimisent et gardent sous contrôle la micro-sismicité induite par le développement de réservoirs EGS.

Finalement, à l'échelle de la Suisse, l'ensemble du canton de Neuchâtel est situé dans une région à faible activité sismique naturelle, tout comme l'arc jurassien et le bassin molassique (Figure VI - 7).

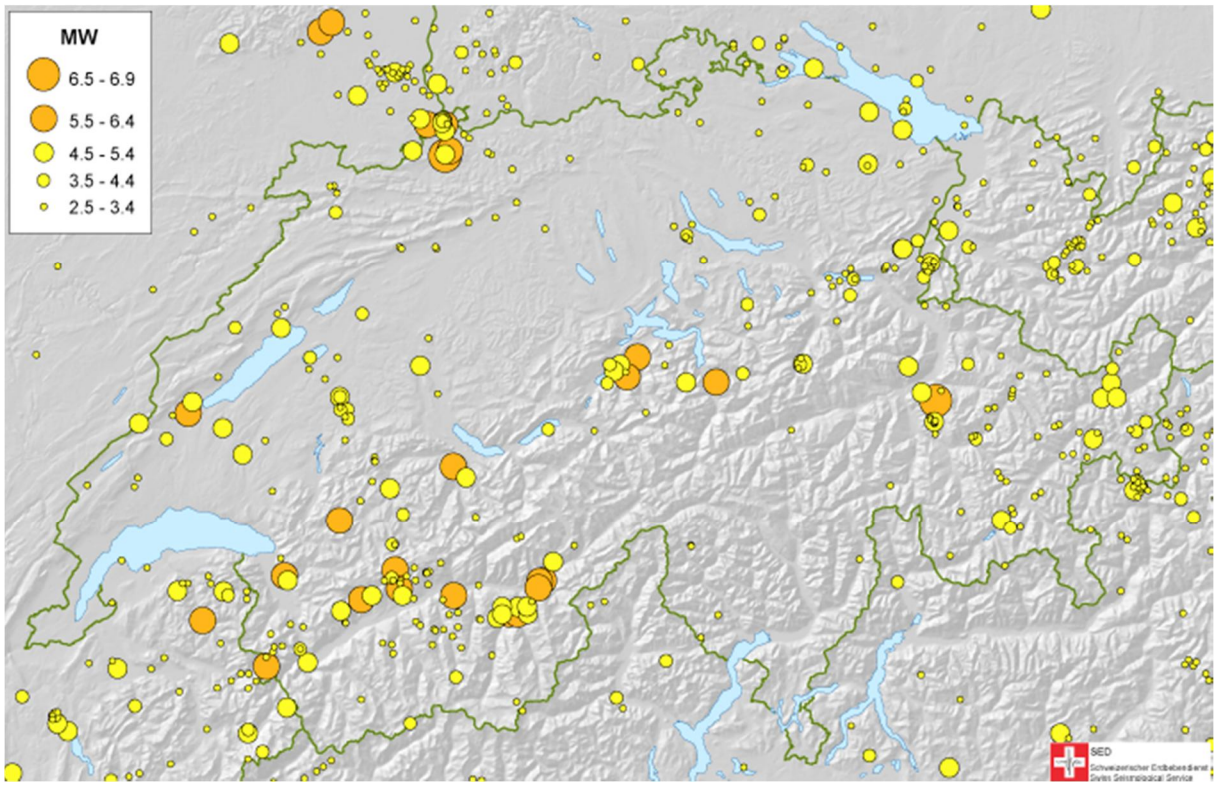



*Figure VI - 7. Sismicité en Suisse : Localisation et magnitude des tremblements de terre mesurés entre 1975 et 2002 ainsi que les séismes historiques prouvés depuis le 13$^{e}$ siècle (Haslinger et al., 2011).*

## 2.2.6 Eaux de surface

Seule la phase de chantier entraîne une consommation d'eau notable due aux activités de forage. Aucun des sites de forage n'est prévu à proximité d'un lac ou d'un cours d'eau. Par conséquent, les besoins en eau pour préparer la boue de forage seront vraisemblablement prélevés sur l'hydrant le plus proche du chantier. L'eau des boues de forage est recyclée dans les bacs de stockage qui sont disposés à cet effet sur le chantier, mais un apport continu est nécessaire pendant la durée des opérations de forage.

Aucun écoulement de fluide (eau, boue, carburant) ne peut ruisseler hors du chantier de forage et donc rejoindre un émissaire de surface. A la fin du chantier de forage, tous les fluides stockés sont évacués et traités selon leur qualité.

En phase d'exploitation du doublet géothermique, tout le fluide profond pompé est réinjecté dans la même formation et d'autre part, aucun fluide extérieur n'est amené sur le site des puits.

## 2.2.7 Eaux souterraines

Les sites de forage sélectionnés ne sont pas implantés dans des zones de protection des eaux souterraines. Cependant, le forage profond, avant d'atteindre sa cible (aquifère profond), peut rencontrer des zones perméables et productrices. La technique de forage rotary avec la mise en place de tubages télescopiques et leur cimentation permet d'isoler toutes les formations géologiques perméables ou non et d'éviter le contact entre ces dernières et le fluide géothermique exploité dans le puits. Une pratique dans les règles de l'art évite également des phénomènes de court-circuit entre les autres aquifères traversés par le forage.

Dans les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (OFEFP, 2004), il est dit que l'exploitation de l'énergie géothermique par des forages profonds est peu courante et que chaque

cas doit faire l'objet d'un examen particulier, pour déterminer leur faisabilité et pour fixer les conditions à respecter. Toujours d'après l'OFEFP (2004), les forages géothermiques profonds sont interdits ou admis dans les cas suivants présentés dans le Tableau VI - 5.

Aucun écoulement de fluide ne peut ruisseler hors du chantier de forage et donc s'infiltrer dans le sous-sol et rejoindre une nappe d'eau souterraine. A la fin du chantier de forage, tous les fluides stockés sont évacués et traités selon leur qualité.

En phase d'exploitation du doublet géothermique, tout le fluide profond pompé est réinjecté après son usage thermique dans la même formation et d'autre part, aucun fluide extérieur n'est amené sur le site des puits.

Seule l'exploitation de l'aquifère du Malm pourrait être envisagée sans réinjection de l'eau géothermale après refroidissement. En effet, la qualité de cette dernière permettrait de l'injecter ensuite dans le réseau d'eau potable.

*Tableau VI - 5. Admission des forages géothermiques profonds en fonction des zones de protection des eaux souterraines (d'après OFEFP, 2004)*

| **Secteur, aire, périmètre, zone** | **Réalisation de forage géothermique profond** |
|---|---|
| Autre secteur - üB | Sans problème du point de vue hydrogéologique ; ne nécessite pas une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux. |
| Secteur de protection des eaux - Au | En principe sans problème ; autorisation nécessaire en vertu de l'art. 32 OEaux. |
| Aire d'alimentation - Zu | Les cantons prescrivent les mesures à prendre dans les aires d'alimentation Zu. |
| Périmètre de protection des eaux souterraines - Péri | Interdit ; par exception, l'autorité compétente peut autoriser la construction d'une installation sur une surface correspondant à la zone S3. |
| Zone de protection éloignée - S3 | Interdit ; cependant, l'autorité compétente peut admettre une dérogation, après examen du cas particulier. |
| Zone de protection rapprochée - S2 | Interdit. |
| Zone de captage - S1 | Interdit. |

## 2.2.8 Sols, sites pollués et gestion des déchets

### SOLS

La préparation su chantier de forage consiste principalement à décaper le sol, au moins la terre végétale et à imperméabiliser provisoirement avec du bitume la surface sur laquelle l'appareil de forage sera installé avec l'ensemble de ses équipements. Les volumes de sol décapé sont regroupés sous forme de butte en bordure du chantier, qui fera office de protection visuelle et phonique. A la fin de la période de chantier, le sol est remis sur la surface originale.

Lors de la phase d'exploitation de la centrale géothermique, aucun impact sur les sols n'est à prévoir.

### SITES POLLUES

Il n'est pas envisagé d'implanter le chantier d'un forage profond sur ou à proximité d'un site pollué et donc le projet géothermique ne devra pas être coordonné avec l'assainissement du site de forage.

Il n'y aura de ce fait pas d'impact entre les phases d'un projet géothermique (mise en œuvre et exploitation) et la gestion d'un site pollué.

### GESTION DES DECHETS DE CHANTIER

Au cours de la mise en œuvre d'un projet de géothermie profonde, les déchets produits sont de deux types : les résidus issus des boues de forages (débris des roches forées, additifs pour la boue de forage, eau) et les déchets de chantier usuels pour un chantier de génie civil standard.

Lors de la mise en œuvre, les déchets de chantier usuels feront l'objet d'un tri à la source, conforme aux dispositions réglementaires fédérales et cantonales en vigueur. La quantité peut déjà être considérée comme faible.

Lors de la phase d'exploitation, les déchets générés peuvent être considérés comme quasi nuls, à l'exception de petits volumes de déchets pendant les travaux de maintenance des équipements de surface, mais ils sont gérés en routine par les entreprises de services.

## 2.2.9 Boues de forage

Les boues de forage ne concernent évidemment que la phase de mise en œuvre. Les boues de forage, dont le volume devra être évalué lors de la phase de l'avant-projet, seront partiellement traitées sur place, puis évacuées de manière adéquate par les entreprises spécialisées, conformément aux normes en vigueur.

La boue de forage constitue un élément clé de la réussite d'un forage : Elle est fabriquée sur le chantier de forage et stockée dans des bacs à côté du rig. La boue est injectée par les tiges de forage et ressort par les buses de l'outil de forage. Elle remonte ensuite le long des parois du forage non tubé, puis dans les différents tubages déjà mis en place pour être ensuite recyclée en surface. La boue de forage a plusieurs tâches essentielles : notamment refroidir l'outil de forage, lubrifier le train de tiges, remonter les débris de roche (cuttings), maintenir la stabilité des parois du trou nu et contrôler la pression des zones de production. Ces tâches ont pour but final d'assurer l'intégrité du trou et d'optimiser la vitesse d'avancement de l'outil de forage (Thorhallsson, 2012b).

Les boues de forage pour les projets de géothermie sont essentiellement de deux types : la boue à la bentonite (eau + argile) pour le forage des sections imperméables et la boue à l'eau claire (eau + épaississants) pour le forage des cibles aquifères. Les boues de forages peuvent contenir divers types d'additifs utilisés pour contrôler et régler les paramètres suivants (Neff, 2005) : densité, viscosité, floculation, pH, filtration, lubrification, bactéricide, anti-corrosif, stabilisateur des propriétés à haute température, etc. Ces additifs sont de plusieurs types : minéraux (barite, gypse, divers argiles, phyllosilicates, carbonates, hématite, etc.) ; organiques (cellulose, polyphosphates, divers polymères, détergents, savons, etc.).

Avec le recyclage continu de la boue dans les bacs ad hoc, ses propriétés sont ajustées avec l'eau et les composants nécessaires, alors que les cuttings sont séparés de la boue, stockés provisoirement dans des bourbiers ou bassins de décantation, puis évacués du chantier par des compagnies spécialisées pour être traités et déposés selon la législation et les procédures en vigueur. Ces derniers sont essentiellement formés de débris de roche, d'eau et d'argile ou de polymères organiques biodégradables. D'autres additifs peuvent être présents, bien qu'ils ne soient pas employés en permanence. De manière générale, les boues de forage utilisées en géothermie sont chimiquement beaucoup plus simples que celles employées dans des forages pétroliers ou gaziers, et elles contiennent surtout des composants naturels ou biodégradables. Le traitement et le dépôt des résidus de boues de forage géothermique s'avèrent nettement plus simple et comportent beaucoup moins de risque environnemental que leur équivalent dans l'industrie pétrolière et gazière. Ils peuvent prendre plusieurs formes, notamment par incinération mais également inclure le recyclage

de produits minéraux pour l'agriculture, ou encore comme matériau de construction (route, aménagement du paysage, etc.).

## 2.2.10 Milieux naturels et paysage

Les forages géothermiques profonds peuvent être localisés dans des sites très différents (zone à bâtir, zone industrielle, zone agricole) et par conséquent, l'état des milieux naturels et du paysage peuvent également varier fortement au moment de la réalisation du chantier de forage. Les perturbations de ce dernier sont temporaires, pendant la réalisation des forages et des tests (quelques mois à un an environ selon la profondeur et le nombre de forages).

A la fin de la campagne de forage, le chantier est remis dans son état antérieur, sauf s'il fait partie d'un nouvel aménagement urbain ou industriel. Visuellement, un certain nombre d'éléments seront présent pendant toute la période de forage : une tour de forage (20 à 40 m de hauteur selon la profondeur à atteindre et donc la puissance du rig), des parois anti-bruit (5 à 10 m de hauteur), une ou plusieurs buttes de terre végétale (2 à 5 m de hauteur), qui a été décapée de la superficie du chantier de forage. La surface d'un chantier de forage pour un doublet géothermique à 2 km de profondeur sera de l'ordre 3000 $m^2$. Finalement, une voie d'accès temporaire pour poids lourds peut être réalisée si nécessaire, entre la plateforme de forage et la route la plus proche, puis déconstruite à la fin du projet.

Si le site de forage se trouve en zone forestière ou boisée, on évite dans la mesure du possible de défricher la superficie nécessaire et on se place en bordure ou dans une clairière.

Tous ces éléments disparaissent évidemment à la fin des opérations de forage et de tests. La tête de puits qui est installée ensuite, sur chaque forage réussi, peut être intégralement enterrée et seule une plaque de métal est visible à la surface du terrain. Une autre possibilité est de créer un petit bâtiment qui abrite les deux têtes de puits du doublet, ainsi que l'échangeur de chaleur, la pompe de réinjection et le départ vers le CAD. Finalement, l'impact visuel sur le milieu naturel et le paysage d'une exploitation géothermique pour la chaleur est extrêmement discret, voire invisible.

Après la perturbation temporaire liée à la phase de mise en œuvre du projet géothermique, sa phase d'exploitation ne comporte aucun impact particulier sur le milieu naturel et le paysage.

## 2.2.11 Evénements extraordinaires

Les événements extraordinaires susceptibles de se produire pendant un projet de géothermie profonde sont de plusieurs types.

### EMANATIONS DE GAZ

Lors de la mise en œuvre du projet, des incidents de type émanation de gaz peuvent se produire en cours de forage, lors de la perforation de couches géologiques connues pour éventuellement contenir des poches de gaz (Trias, Permo-carbonifère). Dans la plupart des cas, les petites quantités de gaz ($CO_2$, $CH_4$, $H_2S$) sont dissoutes par les boues de forage qui circulent en continu. Dans quelques rares cas, une émanation de gaz peut sortir du forage. Des analyses de gaz sont faites en continu et des alarmes sont en fonction sur le chantier pour assurer la sécurité du personnel pendant la traversée des zones sensibles, voire pendant toute la durée du forage si c'est jugé nécessaire.

Lors de la phase d'exploitation d'un aquifère profond par un doublet géothermique, l'ensemble du circuit du fluide géothermique entre la zone de production, les forages et l'échangeur de chaleur est une boucle fermée (cf. Chapitre 1). D'autre part, tout fluide géothermique contient une certaine proportion de gaz à l'état dissous dans le réservoir. Pour éviter des émanations gazeuses lors de l'exploitation, le fluide est maintenu à une pression suffisante dans toute la boucle géothermale pour justement garder les gaz sous forme dissoute.

### EVENEMENTS SISMIQUES

En phase de mise en œuvre, aucun événement sismique n'est généré par les actions menées sur le chantier de forage : forage, pose des tubage, cimentation, test de production, test d'injection, stimulation par acidification. Si malgré tout un événement sismique survient, il sera de cause naturelle.

En phase d'exploitation, la gestion de très nombreux doublets géothermiques installés dans des réservoirs géothermiques profonds en milieu sédimentaire n'ont pas montré une quelconque augmentation de l'activité sismique naturelle.

Par contre, il n'est pas impossible qu'une gestion irrégulière dans le temps de la production par pompage et de la réinjection engendrent quelques micro-séismes dans le réservoir. L'immense majorité d'entre eux, d'une magnitude largement inférieure à 2, ne serait perceptible que par un réseau de stations sismiques ad hoc installées dans des forages prévus pour les enregistrer. Seuls quelques uns pourraient être enregistrés par le réseau du Service sismologique suisse (stations de surface) et finalement, un pourcentage extrêmement faible de ces micro-séismes pourrait être ressentis par la population à proximité de l'installation.

Pour mémoire, depuis 1994, l'exploitation continue du doublet géothermique de Riehen dans le canton de Bâle-Ville, secteur connu pour sa sismicité naturelle plus élevée que dans la plupart des autres régions de Suisse, ne génère aucun micro-séisme perçu par les habitants ni enregistré par le réseau sismologique (Evans et al. 2012).

## 2.3 Acceptation sociale du projet

Même si les bénéfices environnementaux et économiques d'une opération de géothermie profonde sont à priori reconnus, de manière générale l'acceptation sociale de grands projets énergétiques quels qu'ils soient n'est jamais gagnée d'avance et doit être prise en compte dès le début du projet.

Une collaboration avec la population locale doit être instaurée et des réponses honnêtes doivent être données aux questions et aux craintes formulées. Une information complète et répétée à chaque étape du projet doit être fournie régionalement et localement, tant auprès des autorités communales que de la population et des écoles. Des séances et des documents d'information seront planifiés déjà lors des phases préliminaires et pendant la réalisation du forage des visites de chantier seront organisées. Prévoir un ou plusieurs espaces sécurisés sur le chantier tels qu'une cabine de réunion et une plateforme pour les visites de groupe facilite grandement la communication avec le public et les médias et augmente la visibilité du projet.

Les meilleures solutions technologiques et organisationnelles doivent être appliquées, afin de garder une image positive du projet en particulier et de la géothermie en général auprès de la population et des futurs consommateurs. En effet, une image dégradée en raison d'erreurs techniques ou d'un manque de transparence sera très difficile à restaurer.

# 3. Estimation et minimisation des risques lors du développement d'un projet géothermique

## 3.1 Introduction

Les projets de géothermie nécessitent, surtout lors de la phase de démarrage, des investissements qui comportent un risque élevé. Il s'agit d'un défi majeur pour chaque projet d'obtenir un capital-risque durant cette phase, étant donné le risque d'échec du premier forage d'exploration. La gestion du risque tente de minimiser ce risque, et d'estimer les chances de succès du forage.

Les risques d'un projet de géothermie profonde sont de plusieurs types : une bonne définition et une séparation de ces risques sont nécessaires dans le but de les estimer et de les minimiser (Schulz et al., 2007).

- Risque géologique (existence d'une structure favorable, problèmes géologiques durant le forage).
- Risque de l'exploration (ne pas atteindre de manière économique la puissance thermique avec un débit et une température minimaux de production du fluide géothermique).
- Risque de forage (aspects techniques, retard sur le planning de forage, perte de l'ouvrage).
- Risque opérationnel (changement de quantité et de qualité du fluide pendant l'exploitation, durabilité du réservoir et des ouvrages).

Le succès d'une phase d'exploration d'une ressource géothermique profonde est basé sur les données et les informations provenant des formations géologiques, qui se trouvent en dessous de toute investigation régionale historique. Collecter des informations pertinentes les évaluer relève d'un processus itératif structuré par des jalons marquant la fin des étapes et montrant les suivantes. Evidemment chaque étape apporte des informations additionnelles mais comprend aussi un accroissement des coûts. Chaque jalon fonctionne comme point d'évaluation pour débuter l'étape suivante ou comme un critère pour stopper le projet (Bauer, 2007).

En considérant les coûts élevés des projets, des décisions doivent être prises relativement souvent sur la base de données et d'informations fragmentaires, conduisant à une insécurité et un processus de prise de décision risqué. Il est possible de réduire les risques par l'incorporation d'informations complémentaires, mais il n'y a pas moyen de les éliminer complètement. C'est le rôle de la gestion du risque de diminuer le risque jusqu'à un niveau économiquement acceptable. Les facteurs décisifs qui font que le projet est un succès ou un échec concernent le milieu souterrain, c'est-à-dire la géologie et le développement du réservoir géothermique.

En Suisse, de 1987 à 1997, une couverture du risque géologique mise en place par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), a permis à un certain nombre de projets de géothermie profonde d'être réalisés. Selon des critères fixés à l'avance par un groupe d'experts, certains projets ont été des succès, certains des succès partiels et finalement d'autres furent des échecs. Actuellement, une nouvelle garantie du risque existe à nouveau, mais malheureusement, elle ne concerne que les projets de géothermie qui envisagent une production d'électricité en plus de la chaleur.

## 3.2 Risques géologique et d'exploration

De nombreuses décisions concernant l'exploration de ressources géothermiques profondes sont faites par déduction, en raison du manque flagrant de données sur les formations pouvant accueillir des réservoirs potentiels : par exemple un autre site est utilisé par analogie et les données sont transférées sur le projet en cours. Ceci est une approche acceptable si elle est évaluée avec précaution. Les différents risques géologiques et d'exploration rencontrés peuvent avoir des niveaux très différents (Tableau VI - 6).

*Tableau VI - 6. Risques géologiques principaux et leur estimation, en admettant que des investigations complètes ont été menées avant d'entamer le premier forage (d'après Schneider & Wirtz, 2005).*

| **Type de risque** | **Estimation du risque** |
|---|---|
| Atteindre la cible potentielle (position, profondeur, tectonique). | Faible à modéré |
| Atteindre la température pronostiquée dans le réservoir. | Faible |
| Obtenir un débit de production économiquement viable. | Modéré à élevé |
| Pouvoir réinjecter le fluide dans l'un des puits forés. | Modéré |
| Qualité du fluide dans son réservoir (salinité, gaz) | Faible à modéré |

Il arrive que dans le but d'économiser des moyens financiers lors de la phase d'exploration depuis la surface, la décision d'engager un forage soit prise sur une base d'informations insuffisantes, conduisant à un échec géologique et un arrêt du projet.

La collecte des informations et leur interprétation prend du temps et alourdit le budget. Le temps et les moyens financiers sont limités, mais les informations permettent de réduire l'incertitude et donc plus d'information signifie moins de risque. En d'autres termes, l'information doit réduire les incertitudes et par conséquent accroître la valeur du projet, sinon elle n'a pas d'utilité. A un certain point, il n'est pas possible de diminuer davantage le risque avec la collecte d'information nouvelles. Si par exemple lors d'une phase d'exploration, des dépenses supplémentaires n'apportent pas un gain de connaissance permettant de modifier significativement le modèle géologique, alors il faut estimer les chances et les risques de forage. Par contre, si l'information permet une compréhension plus profonde, cela indique que la quantité d'informations nécessaires pour prendre la décision de forer n'est pas suffisante (Bauer, 2007).

## 3.3 Clés pour minimiser les risques d'un projet

Les tâches principales des analyses de risque sont d'identifier et de quantifier les risques et de proposer des mesures préventives pour éviter, limiter ou transférer les risques. La stratégie appliquée peut être la suivante :

- Définition du résultat attendu et du contexte économique du projet.
- Identification des facteurs décisifs pour le succès du projet et des risques clés.
- Elaboration du plan de développement, subdivisé en jalons qui fonctionnent comme des marques de progrès avec des segments à risque limité.
- Une présentation des résultats et des différentes options à chaque jalon atteint permet un progrès par étape avec des risques partiels et bien définis.

Une préparation soigneuse et complète du projet est un élément clé pour la minimisation des risques et pour ses chances de succès. Comme cela a été mentionné plus haut, les risques principaux concernent la géologie et le forage, et comme le risque encouru lors du forage est souvent lié à une interprétation avec des données incomplètes ou une interprétation erronée de la géologie, les investigations géologiques durant les phases de planification sont de la plus grande importance. En dépit de tous les efforts de minimisation, un certain risque demeure et le maître d'ouvrage devra décider s'il supporte ce risque ou s'il prend une assurance.

## 3.4 Risques financiers

Des analyses de sensibilité des paramètres critiques jouant un rôle dans l'économie d'un projet de géothermie profonde pour du chauffage urbain montrent que la variation de certains paramètres influence nettement plus la profitabilité du projet que d'autres (Reif, 2007). Les paramètres les plus sensibles sont le prix initial de la chaleur, l'investissement total (donc le prix des forage), la densité finale des consommateurs, l'augmentation du prix de la chaleur et le taux d'intérêt. Les paramètres les moins critiques sont le débit de production, la température de production, la densité initiale des consommateurs et les capitaux propres.

Ces variations montrent que les projets de géothermie profonde sont financièrement risqués. Les instruments classiques de la gestion de projet doivent être utilisés pour limiter ces risques. Les initiateurs du projet doivent effectuer des simulations de profitabilité pour analyse les différents scénarios avant de prendre des choix définitifs. Des réserves doivent aussi être planifiées dans le plan financier. Les risques peuvent aussi être davantage limités en structurant les contrats avec les partenaires du projet (compagnies de forage, de génie civil, de services, etc.). Le risque de forage (cible non atteinte, temps dépassé, etc.) proprement dit peut être supporté par le maître d'ouvrage ou par la compagnie de forage selon le type de contrat conclu. Dans le deuxième cas, les coûts de forage des offres seront nettement plus élevés. Depuis quelques années, des compagnies d'assurance proposent également de prendre ces risques dans le cadre d'un contrat d'assurance.

Finalement, le risque financier peut être sensiblement abaissé en cas d'échec d'un forage, si l'on prévoit à l'avance d'équiper ce dernier d'une sonde géothermique profonde. Plusieurs exemples d'installations de ce type existent en Suisse et en Allemagne. L'investissement est réduit, le risque technique très faible et la puissance thermique extraite, bien que peu importante, permet néanmoins un usage énergétique durable d'un forage non productif.

En comparaison des projets éoliens ou solaires, le risque financier des projets de géothermie profonde comporte des aspects spécifiques. En effet, le risque ne diminue fortement que lorsque les caractéristiques hydrauliques et thermiques du réservoir géothermique sont connues. Pour cela, l'exploration de surface doit être terminée et un premier forage exécuté, donc un tiers environ de l'investissement total a déjà dû être engagé (Schneider & Wirtz 2005).

# 4. Potentiel des systèmes géothermiques stimulés

## 4.1 Concept technique et état des connaissances

La technologie des systèmes géothermiques stimulés (EGS) a déjà plus de 35 ans de recherche et de développement dans plusieurs pays (USA, Japon, Grande-Bretagne, Allemagne, France, Suisse, Australie) et sous de nombreux noms : Hot Dry Rock (HDR), Hot Fractured Rock (HFR), Hot Wet Rock (HWR), Deep Heat Mining (DHM), Enhanced Geothermal Systems (EGS), Petrothermal Systems, etc.

Les systèmes géothermiques profonds peuvent être classés selon la perméabilité de leur réservoir et donc de leur productivité. Dans la nature, on trouve aux deux extrémités du champ continu des perméabilités d'un côté les systèmes hydrothermaux, fortement perméables dont la faisabilité économique est prouvée, et de l'autre des systèmes quasi-imperméables ne permettant pas une exploitation commerciale. Entre les deux se trouvent tous les systèmes géothermiques à faible ou moyenne perméabilité, qui nécessitent une stimulation du réservoir pour devenir économiques (Figure VI - 8).

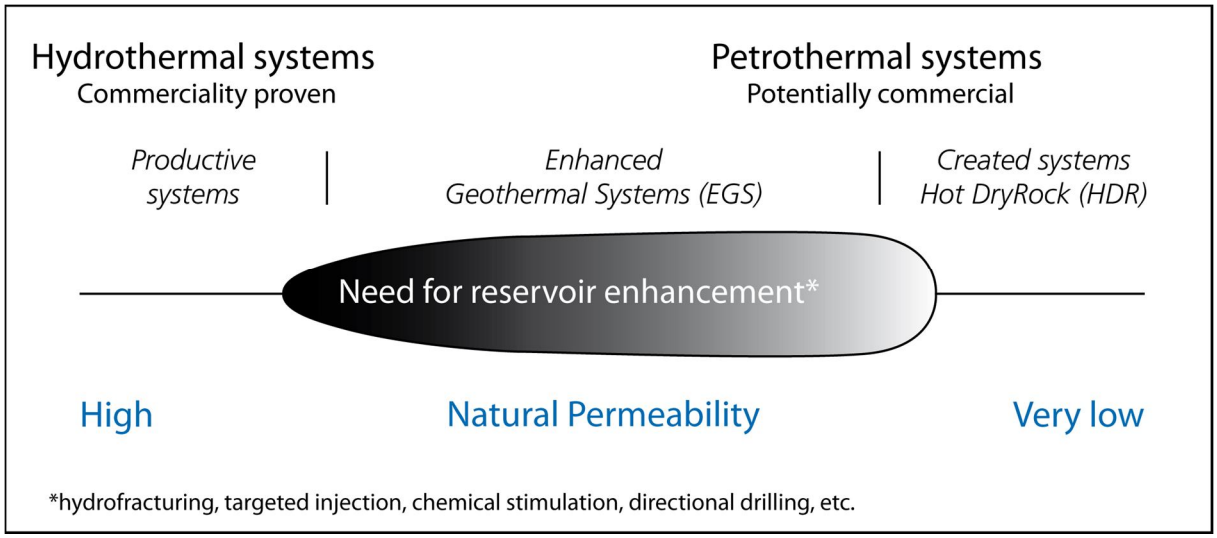



*Figure VI - 8. Illustration du domaine de perméabilité pour divers systèmes géothermiques*

Tous les projets de R&D qui ont débuté dans les années 1970 et 1980 sur la base de fonds publics, se sont arrêtés avant la réalisation d'une centrale pilote, en raison de l'assèchement des ressources financières. Seul le projet européen de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) à financement mixte a vu son achèvement et l'inauguration de sa centrale pilote en 2008, après plus 20 ans de recherche et de développement de la technologie EGS. La première installation commerciale de type EGS, mais plus proche des systèmes hydrothermaux a vu le jour à Landau (Allemagne), également dans le fossé rhénan : elle a bénéficié de tout le savoir-faire acquis sur le projet de Soultz, ainsi que de conditions géologiques et techniques similaires, en raison de sa localisation.

Le projet Deep Heat Mining à Bâle est le seul projet EGS qui a été arrêté en raison d'événements sismiques induits par la stimulation hydraulique du réservoir profond.

Jusqu'à présent, tous les projets EGS ont tenté de créer des réservoirs fracturés dans des roches de type granitique situées dans le socle cristallin à des profondeurs de 2 à 5 km et des températures entre 80 et 250 °C. Chaque projet EGS a permis d'acquérir un certain savoir-faire dont les principaux aspects sont résumés dans le Tableau VI - 7.

*Tableau VI - 7. Synthèse des méthodes et technologies appliquées aux projets EGS (ENGINE Coordination Action, 2008 ; Tester et al., 2006 ; U.S. DOE, 2008).*

| **Méthodes et technologies** | **Caractéristiques** |
|---|---|
| Forages profonds, déviation et complétion | Réalisation de forages profonds verticaux ou déviés ;<br>Pénétration dans le socle cristallin sous 1 à 3 km de sédiments ;<br>Profondeur maximale des forages: 5 km ;<br>Ecartement à la base des forages: max. 650 m. |
| Stimulation du réservoir | En priorité : stimulation hydraulique ;<br>En complément : stimulation chimique. |
| Contrôle spatial de la fracturation | Réseau d'écoute sismique (géophones) mis en place dans des forages de moyenne profondeur ;<br>Approche 3D du réservoir fracturé. |
| Diagraphies | Outils à haute température, notamment pour obtenir une imagerie des parois du puits (remplace partiellement le carottage). |
| Tests de production et d'injection | Tests en puits unique ou en doublet d'une durée de quelques jours à quelques mois. |
| Production | Production du fluide du réservoir par pompage (pompe immergée ou pompe à arbre long). |
| Réinjection | Réinjection du fluide au moyen d'une pompe de surface. |
| Sismicité induite | Enregistrement continu de la sismicité induite par la stimulation hydraulique, respectivement par l'exploitation du réservoir. |
| Volume du réservoir et évolution spatio-temporelle | Nouveaux traceurs chimiques et tests de traçage ;<br>Mal connue par manque d'expérience (exploitation continue à Soultz de moins de 2 ans). |
| Durée de vie des forages d'exploitation | Peu connue, par manque d'expérience ;<br>Dépend des conditions de stress pour les tubages et de la qualité chimique du fluide de la formation. |
| Conversion en électricité | Centrale à fluide binaire (ORC) de 1 à 4 MWe. |

Deux documents de synthèse ont été élaborés au cours de la deuxième moitié des années 2000 sur le potentiel et la technologie EGS. Le premier représente la réflexion d'un groupe de travail du MIT sur le potentiel des systèmes géothermiques stimulés (EGS) pour les USA (Tester et al., 2006). Le deuxième est lié à l'action de coordination européenne ENGINE : il s'agit d'un manuel des meilleures pratiques pour le développement des ressources géothermiques non conventionnelles, focalisé sur les EGS (ENGINE Coordination Action, 2008). Au fur et à mesure de l'avancement des projets EGS majeurs, de nombreux documents et volumes spéciaux de journaux consacrés à tel ou tel projet, notamment celui de Soultz (Fritz & Gérard, 2010). De très nombreux articles provenant de congrès de géothermie se trouvent également réunis dans la base de données en libre-service de l'International Geothermal Association (IGA).

## 4.2 Questions en suspens et problèmes à résoudre

Au cours de chacun des projets EGS, des percées technologiques et des progrès décisifs ont été accomplis, mais pour approcher les conditions d'un développement économique des systèmes EGS, les principaux paramètres du réservoir géothermique doivent atteindre des valeurs qui, jusqu'à ce jour, n'ont pas encore été toutes égalées pour un réservoir donné dans les divers projets internationaux (Tableau VI - 8).

*Tableau VI - 8. Valeurs recherchées pour les principaux paramètres d'un réservoir EGS (Garnish, 2002).*

| **Paramètres** | **Valeurs obtenues dans les projets** | **Objectif** |
|---|---|---|
| Débit de production | 40 kg·s$^{-1}$ | 50 - 100 kg·s$^{-1}$ |
| Température en tête de puits de production | 180 °C | 150 - 200 °C |
| Surface totale effective de l'échangeur de chaleur souterrain | > 2·106 m$^2$ | > 2·106 m$^2$ |
| Volume de roche impliqué | > 200·106 m$^3$ | > 200·106 m$^3$ |
| Impédance du fluide | < 0.23 MPa·kg$^{-1}$·s$^{-1}$ | < 0.1 MPa·kg$^{-1}$·s$^{-1}$ |
| Perte de fluide | 0 % | < 10 % |

Cependant, de nombreuses difficultés ont été rencontrées dans plusieurs domaines, qui ont eu pour effet des retards accumulés, voire des arrêts temporaires ou définitifs des projets R&D. Une liste non exhaustive des questions en suspens et des problèmes à résoudre pour atteindre à moyen terme un véritable développement économique des systèmes EGS est présentée dans le Tableau VI - 9.

## 4.3 Situation des projets EGS dans le monde

Au plan mondial, le potentiel des systèmes géothermiques est gigantesque. Des estimations et des extrapolations ont été effectuées pour différents pays et continents. Ces chiffres ne sont que difficilement comparables d'une étude à l'autre si la méthode d'évaluation et la définition du potentiel ne sont pas clairement définies. A titre d'exemple le potentiel EGS pour les USA est estimé à 100 GWe et une autre étude mentionne 450 GWe pour l'ensemble de la planète. En effet, des roches chaudes dans le socle cristallin sont présentes plus ou moins partout à des profondeurs pouvant être atteintes par la technologie actuelle de forage (< 10 km de profondeur). Pour générer de l'électricité à des coûts économiques, le réservoir géothermique doit égaler ou dépasser 150 °C, ce qui donne une profondeur d'au moins 4 km avec un gradient géothermique moyen de 30 à 35 °C·km$^{-1}$ comme pour la majeure partie des régions géologiquement stables (sans volcanisme ni tectonique active), comme le Plateau suisse. Dans certaines régions, le gradient géothermique est nettement plus élevé (par ex. un graben ou une zone tectoniquement active) et l'on obtient une température plus élevée pour le système EGS choisi, ou alors la profondeur de forage est plus faible, ce qui dans les deux cas représente un avantage économique.

Dans le monde, l'activité de recherche et de développement de la technologie EGS avance de manière très variable. En Suisse, depuis l'arrêt du projet bâlois, il n'y a plus de nouveau projet avéré. Par contre, plusieurs chercheurs travaillent de manière continue sur le site EGS de Soultz et un projet de l'ETH-Zurich, GEOTHERM, met au point des modèles des processus couplés actifs dans les réservoirs EGS. Quelques projets de développement existent également en Allemagne, en Grande-Bretagne et aux USA, encore dans un stade préliminaire.

*Tableau VI - 9. Problèmes à résoudre et technologies à améliorer pour les systèmes EGS (Tester et al., 2006 ; U.S. DOE, 2008).*

| **Tâches** | **Méthodes, outils et conditions à créer ou à améliorer** |
|---|---|
| Caractérisation des sites potentiels | Développement de méthodes géophysiques pour détecter les structures dans le cristallin et les fractures perméables ;<br>Développement de nouveaux outils de modélisation géologique 3D des réservoirs. |
| Forages profonds, déviation et complétion | Diminution du coût des forages profonds (vitesse de pénétration, durée de vie des outils de forage) ;<br>Nouveaux matériaux et concepts pour les tubages et l'équipement de complétion ;<br>Augmentation de la profondeur de forage en routine de 5 à 6 km ;<br>Modernisation des technologies de forage (forage slimhole, micro forage, spallation hydrothermale, plasma, etc.) ;<br>Disponibilité des appareils de forage profond sur le marché. |
| Stimulation du réservoir | Techniques de modélisation de la stimulation et de l'identification des conduits d'écoulement ;<br>Méthodes de stimulation hydraulique : augmentation de l'efficacité ; diminution et prévision du risque de sismicité induite ;<br>Méthodes de stimulation chimique : concepts de réalisation ; nouveaux composants chimiques. |
| Diagraphies | Développement d'outils qui résistent à haute température (imagerie du puits, diagraphies pendant le forage) ;<br>Augmentation de la durée de vie des outils dans les conditions du réservoir. |
| Tests de production et d'injection | Développement d'outils fiables pour les conditions du réservoir : packers récupérables pour isoler les zones productrices, sondes de pression/température, autres sondes pour des paramètres physiques et chimiques. |
| Pompes de puits | Fiabilité et durée de vie des pompes immergées et des pompes à arbre long : profondeur 300 - 500 m ; températures 150 - 250 °C ; débit 50 - 100 l·s-1. |
| Réinjection | Mise au point de composants chimiques pour éviter les dépôts de minéraux dans les fissures proches des puits de réinjection |
| Sismicité induite | Protocoles opérationnels pour limiter la sismicité induite par la stimulation hydraulique, respectivement par l'exploitation du réservoir. |
| Evolution du réservoir | Modélisation couplée des processus thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques. |
| Durée de vie des forages d'exploitation | Expérimentation in situ des processus de corrosion ;<br>Modélisation des processus de corrosion et de dépôts dans le réservoir et les installations de surface |
| Effet d'échelle | Diminution du coût spécifique des installations : augmenter nombre de forages et volume des réservoirs ; accroître d'un ordre de grandeur au minimum (10 à 50 MWe) la puissance des centrales électriques (actuellement 1 à 4 MWe). |

Dans la période qui a suivi l'arrêt du projet DHM de Bâle et le démarrage de la centrale du projet de Soultz, l'activité de prospection de surface et d'exploration par forage pour les EGS a pris une grande ampleur en Australie. En 2009, pas moins de 48 compagnies travaillant dans l'exploration des ressources géothermiques profondes, essentiellement les EGS, ont acquis pour une somme totale de 325 millions AUS$ quelque 383 licences géothermiques sur une superficie de 358'400 $km^2$ du territoire australien, essentiellement dans la moitié sud. Une partie des ressources EGS se trouvent dans du socle fracturé entre 4 et 5 km de profondeur à une température de 200 à 290 °C. Les investissements pour la géothermie profonde (EGS inclus) durant la période 2002 à 2014 se monteraient à 2'700 millions US$, dont 10% provenant de subsides gouvernementaux. Quant à la première centrale électrique pilote EGS d'Australie, elle devrait démarrer en 2012 dans le Cooper Basin. Ensuite, plusieurs centrales EGS de démonstration de 25 à 30 MWe sont prévues dans les années qui suivent.

## 4.4 Projections à moyen terme et situation en Suisse

En Suisse, dès le milieu des années 2000 plusieurs tentatives ont été lancées pour mettre en place des financements, des programmes et des structures de R&D pour accélérer la prospection et le développement de la géothermie profonde et des ressources EGS :

- Réseau de compétences CREGE créé à Neuchâtel en 2004 : actuellement, renommé SGnet, c'est une association formée de 58 membres institutionnels fonctionnant en réseau. On trouve des membres du réseau dans la plupart des projets de géothermie en Suisse.
- Motion Theiler déposée en 2007 : « Le Conseil fédéral est chargé de soumettre au Parlement une demande de crédit de 60 millions de francs, par la voie du message relatif à l'encouragement de la formation, de la recherche et de l'innovation pendant les années 2008 à 2011, aux fins de financer un programme de recherche en matière de géothermie profonde; cette somme sera budgétisée chaque année à partir de 2008. ».
  Cette motion a été largement acceptée par les deux chambres fédérales, mais n'a pas trouvé de financement dans le budget 2008 de la Confédération.
- Programme PROGEOTHERM : programme national de développement de la géothermie profonde en Suisse comportant trois domaines d'action et deux périodes de 4 ans : Formation spécialisée, Recherche & Développement, Pilote & Démonstration. Financé par l'Office fédéral de l'énergie, le programme PROGEOTHERM a été initié dans la foulée de la motion Theiler et préparé par un groupe de travail formé de 14 spécialistes (Vuataz, éd., 2007). Aucune suite n'a été donnée à ce projet.
- Programme FEGES : sous l'égide de l'organisation faîtière GEOTHERMIE.CH, le programme FEGES de recherche & développement pour la production d'électricité à partir des systèmes géothermiques stimulés (EGS) a été conçu et rédigé par un groupe de travail de la SSG/SVG. Il visait la création d'une coopérative nationale indépendante de R&D pour le développement de la technologie EGS dans un délai de 25 ans (Mégel, 2007). Aucune suite n'a été donnée à ce projet.
- La décision d'arrêter progressivement l'utilisation de l'énergie nucléaire d'ici à 2034 devrait avoir un effet positif sur la géothermie profonde et sur le développement de la technologie EGS.
- Plusieurs motions parlementaires ont été déposées entre 2010 et 2012 avec pour but de développer et soutenir la géothermie profonde en Suisse.
- Dès 2012, un groupe de travail incluant la Société Suisse pour la géothermie (SSG), Axpo Neue Energien, BKW/sol-E Suisse, Geo-Energie Suisse, Sankt Galler Stadtwerke prépare une stratégie pour le développement de la production d'électricité par la géothermie profonde en Suisse.

- Finalement, le Conseil fédéral a chargé un groupe de travail formé de membres de la CORE, du conseil des EPF et du PSI de mettre au point un plan d'action « Recherche énergétique suisse coordonnée ». Un rapport de 83 pages incluant également la géothermie est disponible depuis avril 2012.

A moyen terme, plusieurs facteurs pourraient influencer positivement le développement des systèmes géothermiques EGS en Europe et en Suisse. Le premier d'entre eux viendra vraisemblablement de l'Australie, avec la résolution des problèmes techniques limitant le développement des systèmes EGS, ainsi que le démarrage et l'exploitation de quelques centrales géothermiques. De plus, l'établissement de nouvelles lois sur l'énergie ou des événements géopolitiques touchant l'approvisionnement en énergie pourraient faire avancer plus rapidement le développement des énergies indigènes en Europe et en Suisse, notamment les EGS.

Finalement, deux nouvelles entités ont été créées en 2010 en Suisse pour le développement industriel de la géothermie profonde et des EGS :

- Centre de compétences en géothermie d'AXPO AG (Glattburg) : participation au projet de géothermie profonde à Taufkirchen (Bassin molassique de Munich, Allemagne) et préparation de projets en Suisse.
- Geo-Energie Suisse SA (Bâle) : un consortium de sept entreprises énergétiques a créé un centre suisse de compétences pour la géothermie avec comme but la production à moyen terme d'électricité par la technologie EGS. Sur la base d'une analyse multicritères, une sélection de sites favorables en Suisse a été élaborée et les premiers projets vont débuter en 2012.

En conclusion, même si les systèmes géothermiques stimulés (EGS) possèdent un fort potentiel de production d'électricité et de chaleur pour la Suisse, ils ne pourront faire réellement partie du mix énergétique que lorsque les barrières technologiques et économiques connues auront été surmontées. A ce moment-là, des centrales EGS de 10 à 50 MWe pourront être installées de manière reproductible dans divers environnements géologiques et l'énergie produite pourra être vendue aux conditions du marché. Ce défi peut être relevé à l'horizon 2030 – 2050, mais il ne sera atteint qu'au moyen d'efforts politiques et financiers conséquents et inscrits dans la durée. A relativement court terme, plusieurs installations EGS pilotes devront être réalisées dans différentes régions et environnements géologiques en Suisse. De plus, des collaborations seront nécessaires avec les pays et les équipes progressant dans la technologie EGS.

## 4.5 Potentiel et intérêt des EGS pour le canton de Neuchâtel

Contrairement aux systèmes hydrothermaux profonds (aquifères perméables), dont la localisation n'est pas encore bien reconnue en Suisse et évidemment sur le territoire neuchâtelois, les systèmes géothermiques stimulés (EGS) se trouvent quasiment « partout », c'est-à-dire dès la profondeur où le socle cristallin atteint une température suffisante pour convertir la chaleur en électricité (>> 100°C). Les conditions rencontrées dans le canton de Neuchâtel sont favorables, avec le toit du socle cristallin situé à une profondeur de 3 km environ, recouvert par les séries sédimentaires isolant thermique empêchant que la chaleur émise dans le granite ne s'échappe trop vite à la surface. Cela permet de réaliser l'échangeur de chaleur en roche fracturée entre 3 et 5 km de profondeur. D'autre part, la sismicité naturelle reste statistiquement faible sur le territoire cantonal et la carte évaluant les risques liés à des événements sismiques montre qu'en dehors de la zone de la ville de Neuchâtel et du littoral, ceux-ci restent faibles (Figure VI - 9).

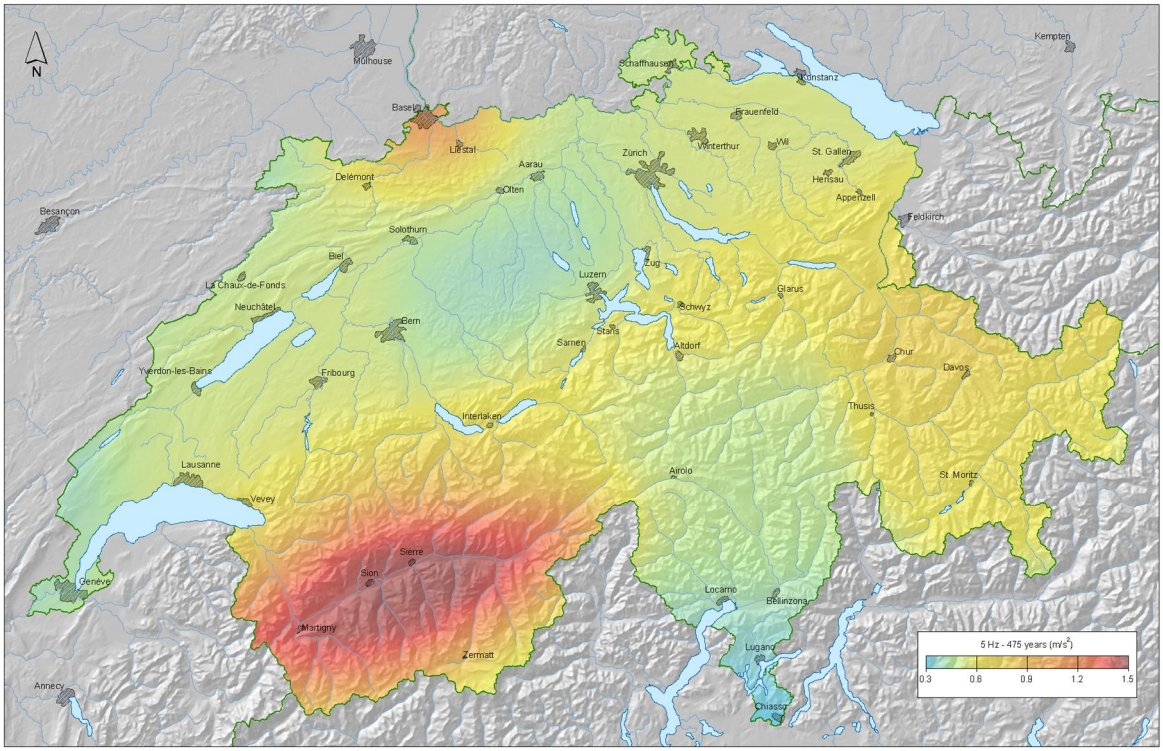



*Figure VI - 9. Carte du risque sismique en Suisse. En rouge, les zones à risque élevé ; en vert/bleu, les zones à risque modéré (Haslinger et al., 2011).*

La compagnie Geo-Energie Suisse a déjà pris des contacts répétés avec les autorités et les services liés aux questions énergétiques pour soumettre ses premières idées et évaluer l'intérêt du canton vis-à-vis de projets géothermiques EGS.

## 4.6 Bibliographie

Baisch S. & al., 2009. Deep Heat Mining Basel – Seismic Risk Analysis. Summary. SERIANEX, Report for the Office of energy, Canton of Basel, 21 pp., unpublished.

Bauer W., 2007. Minimization of risks during the developments of geothermal resources. Geothermal energy in Bavaria: 46-48.

Bianchetti G., Marillier F. & Arn R., 2009. GP La Côte. Rapport de Phase A. Module A1 « Aquifères profonds ». Rapport pour l'OFEN et le SEVEN, 53 pp., non publié.

Dewarrat P. & Bianchetti G., 2009. AGEPP. Phase B - Etude de faisabilité technico-financières. Valorisation de la chaleur & business plan. Rapport de synthèse, 49 pp, non publié.

ENGINE Coordination Action, 2008. Best practice handbook for the development of unconventional geothermal resources with a focus on enhanced geothermal systems. ENGINE Coordination Action, 97 pp.

Evans K., Zappone A., Kraft T., Deichmann N. & Moia F., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and $CO_2$ reservoirs in Europe. Geothermics, 41 : 30-54.

Fritz B. & Gérard A., 2010. On the way to the exploitation of deep geothermal resources in naturally fractured environments. C. R. Geoscience, 342 : 493-501.

Garnish J., 2002. European activities in Hot Dry Rock research. In: Open Meeting on Enhanced Geothermal Systems. U.S. Department of Energy, Reno, Nevada : 8-9.

Haslinger F., Wiemer S., Aller D., Bay F., Rüttener E. & Ewald M., 2011. Eine Erdbebenrisikokarte für die Schweiz. Bevölkerungsschutz, 1 : 14-17.

Lemale J. & Jaudin F., 1998. La géothermie, une énergie d'avenir, ARENE, 117 pp.

Mégel T., 2007. Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur geothermischen Stromerzeugung in der Schweiz (FEGES). Internes Strategiepapier der Dachorganisation GEOTHERMIE.CH.

Neff J.M., 2005, Composition, environmental fates, and biological effect of water based drilling muds and cuttings discharged to the marine environment: A synthesis and annotated bibliography: Report prepared for the Petroleum Environmental Research Forum (PERF). Washington DC: American Petroleum Institute, 73 pp.

OFEFP, 2004. Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. OFEFP, Berne.

OFEN, 2011. Statistique globale suisse de l'énergie 2010. Office fédéral de l'énergie, <www.bbl.admin.ch/bundespublikationen>.

Reif T., 2007. Profitability analysis and risk management of geothermal projects. Geothermal energy in Bavaria: 54-59.

Schneider J. & Wirtz S. (eds.), 2005. Projektrealisierung : Finanzierung und Risiko der tiefen Geothermie. In : Geothermie am Oberrhein. Fesa e.V., Freiburg : 52-60.

Schulz R., Jung R., Pester S & Schellschmidt R., 2007. Quantification of exploration risks for hydrogeothermal wells. Proceed. European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.

Tester J.W. & al., 2006. The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. MIT - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 372 pp.

Thorhallsson S., 2012a. Drilling cost and cost control. Handouts for the training course CAS DEEGEOSYS 2011-2012, Univ. Neuchâtel, unpublished.

Thorhallsson S., 2012b. Drilling fluids, waste handling. Handouts for the training course CAS DEEGEOSYS 2011-2012, Univ. Neuchâtel, unpublished.

U.S. DOE, 2008. An evaluation of enhanced geothermal systems technology. Geothermal technologies program. U.S. Department of energy, 23 pp.

Ungemach P. & Antics M., 2009. Conception et réalisation d'un doublet géothermique dans le bassin parisien : le cas de La Courneuve-Nord, GPC-IP, Roissy. Présentation à la Table ronde sur les projets de géothermie profonde en Suisse romande, le 11.06.09, Neuchâtel, non publié.

Ungemach P., 2012. Drilling of geothermal district heating (GDH) doublets. Handouts for the training course CAS DEEGEOSYS 2011-2012, Univ. Neuchâtel, unpublished.

Vuataz F.-D. (éd.), 2007. PROGEOTHERM - Programme national de développement de la géothermie en Suisse. Rapport final élaboré par le Groupe de travail PROGEOTHERM pour l'Office fédéral de l'énergie, 78 pp., non publié.

Vuataz F.-D., 1997. Application des techniques de forage slimhole pour la prospection des aquifères profonds. Eclogae geol. Helv., 90, 3: 497-512.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

# Rapport final de la Phase 1

## Chapitre VII.

## Transfert de technologie

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

**CHAPITRE VII. TRANSFERT DE TECHNOLOGIE 229**

**1. BUT DU TRANSFERT DE TECHNOLOGIE ..... 229**

**2. CONFERENCES GEONE 2010 ..... 230**

2.1 CONFERENCE GEONE-1 ..... 230

2.2 CONFERENCE GEONE-2 (24.11.10) ..... 230

2.3 RESULTAT ET BILAN DES CONFERENCES GEONE 2010 ..... 231

**3. ATELIERS DE GEOTHERMIE GEONE 2012 ..... 233**

3.1 ATELIER GEONE-1 : METHODES D'ECHANTILLONNAGE ET MESURES PHYSICO-CHIMIQUES DES FLUIDES GEOTHERMIQUES ..... 233

3.2 ATELIER GEONE-2 : APPROCHE DE LA MODELISATION GEOLOGIQUE 3D AVEC GEOMODELLER ..... 234

**4. FORMATION CONTINUE DU CAS DEEGEOSYS ..... 235**

4.1 INTRODUCTION ..... 235

4.2 ORGANISATION DU COURS ..... 235

4.3 PARTICIPANTS ..... 236

4.4 PROGRAMME DU CAS DEEGEOSYS 2011-2012 ..... 236

4.5 ENSEIGNEMENT POUR LE CAS DEEGEOSYS ..... 239

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau VII - 1. Origine des participants et leur répartition durant les conférences GeoNE.....232
Tableau VII - 2. Statistique de participation au CAS DEEGEOSYS .....236
Tableau VII - 3. Résumé du programme du Module 1 : Geology and Geophysics .....236
Tableau VII - 4. Résumé du programme du Module 2 : Geochemistry and Hydrochemistry. .....237
Tableau VII - 5. Résumé du programme du Module 3 : Drilling and Logging.....238
Tableau VII - 6. Résumé du programme du Module 4 : Reservoir Evaluation and production.....239

# Chapitre VII. Transfert de technologie

## 1. But du transfert de technologie

Le programme GeoNE comprenait également un travail d'information auprès des producteurs et des distributeurs d'énergie et des services cantonaux et communaux, ainsi qu'un de transfert de technologie visant à faire connaître les méthodes et les outils de la prospection géothermique auprès des bureaux d'ingénieurs. Les tâches du transfert de technologie ont été réparties en plusieurs actions, dont les trois principales sont détaillées ci-dessous :

- Organisation de 2 conférences GeoNE les 23 et 24 novembre 2010.
- Concept, montage et réalisation d'une formation continue en géothermie profonde 2011-2012 : Certificate of advanced studies - Exploration and development of deep geothermal systems (CAS DEEGEOSYS)
- Organisation de 2 ateliers GeoNE les 18 et 26-27 avril 2012.

D'autres actions de plus faible envergure mais néanmoins importantes et conjoncturelles ont été réalisées :

- Participation aux Etats Généraux de l'énergie du 13.11.10 avec un stand de géothermie.
- Présentations du projet GeoNE aux services cantonaux, aux services de l'énergie des villes et aux autorités, notamment au Conseiller d'Etat T. Grosjean.
- Contacts répétés avec le Service de l'énergie et de l'environnement du canton de Neuchâtel (SENE).
- Contacts répétés avec le Service de l'énergie de La Chaux-de-Fonds.
- Préparation d'une note technique et organisation d'une séance le 26.01.12 avec les sociétés Cadbar et Vadec concernant la problématique de l'option géothermique pour alimenter le réseau de distribution de chaleur à l'horizon 2015.

# 2. Conférences GeoNE 2010

## 2.1 Conférence GeoNE-1

Potentiel de la géothermie dans le canton du Neuchâtel et projets en cours de géothermie profonde, à l'intention de l'industrie et des services publics.

### THEMES

- Information sur le potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN, PDGN, GeoNE).
- Présentation des résultats du Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel – PDGN.
- Présentation du programme GeoNE et des régions sélectionnées.
- Propositions d'investissement dans des projets de géothermie profonde pour l'industrie.

### PROGRAMME: POTENTIEL DE LA GEOTHERMIE DANS LE CANTON DE NEUCHATEL

- Message de bienvenue et but de la manifestation (Marc-H. Schaffner, SENE).
- Remarques sur l'avenir de la géothermie profonde (L. Rybach, Geowatt).
- Présentation des entités de la géothermie (F. Zwahlen, GIC)
- Potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (F.-D. Vuataz, CREGE).
- Programme GeoNE (E. Schill, CREGE).
- Forages géothermiques et protection de l'environnement (I. Butty, SENE).
- Planification et réalisation des forages profonds (W. Leu, Geoform & A. Macek, GeoWell).
- Seismic exploration of deep resources at the canton scale (R. Graf, Interoil).
- Propositions d'investissement et synthèse (E. Schill & F.-D. Vuataz, CREGE).
- Discussion.

### DOCUMENTATION FOURNIE

- Programme et liste des participants
- Brochure du Laboratoire de géothermie
- DVD du rapport final PDGN 2010
- 5 posters sur l'activité géothermique à Neuchâtel
- 4 fiches d'ouvrages géothermiques

Un lien sur un site temporaire permettant de télécharger les présentations des conférenciers a été envoyé par courriel aux participants le 13.01.11.

## 2.2 Conférence GeoNE-2 (24.11.10)

Information sur le programme de transfert de technologie du Laboratoire de géothermie, à l'intention des bureaux d'ingénieurs.

### THEMES

- Information sur les options du programme de transfert de technologie et sur le potentiel de la géothermie à Neuchâtel.
- Présentation du programme GeoNE et des régions sélectionnées.
- Présentation d'une collaboration en cours dans le programme de transfert de technologie.
- Propositions de collaborations avec des bureaux d'ingénieurs.
- Démonstration de méthodes et d'outils d'exploration.

### PROGRAMME : INFORMATION SUR LE PROGRAMME DE TRANSFERT DE TECHNOLOGIE DU LABORATOIRE DE GEOTHERMIE

- Message de bienvenue et but de la manifestation (Y. Lehmann, SENE).
- Présentation des entités de la géothermie à Neuchâtel (J.-F. Zürcher, SGnet).
- Projet GeoNE et sites de prospection (E. Schill, CREGE).
- Presentation of the 3D seismic exploration in St Gallen (R. Graf, Interoil).
- Méthodes d'exploration pour la géothermie profonde (E. Schill & F.-D. Vuataz, CREGE).
- Programme de transfert de technologie et exemples (E. Schill, CREGE).
- Discussion.
- Démonstration des méthodes d'exploration I (gravimétrie, magnéto-tellurique, Very Low Frequency).
- Démonstration des méthodes d'exploration II (thermique des roches, géochimie des fluides).
- Synthèse et discussion

### DOCUMENTATION FOURNIE

- Programme et liste des participants
- DVD du rapport final PDGN 2010
- 5 posters sur l'activité géothermique à Neuchâtel
- 4 fiches d'ouvrages géothermiques
- 6 posters sur les techniques d'exploration

Un lien sur un site temporaire permettant de télécharger les présentations des conférenciers a été envoyé par courriel aux participants le 13.01.11.

## 2.3 Résultat et bilan des conférences GeoNE 2010

La tenue de ces deux conférences de géothermie a été un succès : c'est la première fois que s'est tenue une double manifestation liée à la géothermie profonde pour le canton de Neuchâtel.

La participation prévue était de 60 personnes (30 par conférence) et un total de 92 personnes (45 et 47) ont de fait assisté à ces conférences, alors que plusieurs manifestations plus ou moins concurrentes ont eu lieu en Suisse Romande dans les deux mois qui ont précédé.

Les échos des participants et des conférenciers, reçus de manière directe ou indirecte, ont été très positifs pour les deux conférences (organisation, qualité des présentations, intérêt des ateliers, contacts, ambiance générale).

*Tableau VII - 1. Origine des participants et leur répartition durant les conférences GeoNE*

| **Origine** | **Nombre** | **%** |
|---|---|---|
| Bureaux d'étude et d'ingénieurs | 43 | 47 |
| Laboratoire de géothermie-CREGE, EPFL | 23 | 25 |
| Services publics (cantonaux, villes, OFEN) | 14 | 15 |
| Producteurs et distributeurs d'énergie | 6 | 6.5 |
| Réseaux (SGnet, GIC, WWF) | 4 | 4.5 |
| Journalistes | 2 | 2 |
| TOTAL | 92 | 100 % |

D'une part, on peut affirmer que l'objectif du transfert de technologie à l'intention des bureaux d'étude et d'ingénieurs a totalement rempli ses objectifs avec 43 participants provenant de bureaux ont assisté à l'une ou l'autre des deux conférences. D'autre part, on peut regretter que la conférence GeoNE-1 destinée aux services publics et aux entreprises de production et de distribution d'énergie n'ait pas attiré beaucoup des participants provenant de ces institutions. A l'exception des trois villes du canton, aucun représentant des communes n'était là. Le relais canton-commune pour attirer des responsables communaux de l'énergie n'a donc pas fonctionné. De plus, nous avions espéré que des services de l'énergie des cantons limitrophes (JU, VD, FR, BE) soient présents. Finalement, un seul participant est venu de l'étranger (France).

Les 2 conférences ont été suivies par un total de 92 participants (Tableau VII - 1):

- Conférence GeoNE-1 : 45 personnes
- Conférence GeoNE-2 : 47 personnes

On constate que le but principal de ces deux conférences a été atteint, puisque près de la moitié des participants venaient des bureaux d'études et d'ingénieurs et que 15 % représentaient les services publics.

# 3. Ateliers de géothermie GeoNE 2012

Le programme GeoNE a organisé deux ateliers visant à faire connaître les méthodes et les outils de la prospection géothermique auprès des bureaux d'ingénieurs. Ces deux ateliers étaient ouverts aux bureaux d'ingénieurs et aux consultants dans le domaine des sciences de la terre (géologie, hydrogéologie, géothermie, géophysique, environnement). Afin de conserver une approche pratique de ces ateliers, le nombre de participants a été limité à 10 par atelier.

## 3.1 Atelier GeoNE-1 : Méthodes d'échantillonnage et mesures physico-chimiques des fluides géothermiques

### *18 avril 2012 (7h30 à 17h45) à Lavey-les-Bains*

Présentations en salle au Grand Hôtel des Bains.

- Préparation d'une campagne d'échantillonnage
- Méthodes de prélèvement et matériel
- Méthodes de mesures in situ et matériel
- Stockage et transmission des échantillons aux laboratoires.

Présentations en salle (suite et fin)

- Méthodes d'analyses des paramètres
- Validation des résultats d'analyse
- Principales méthodes d'interprétation
- Présentation sommaire du logiciel Aquachem.

Mesures et prélèvements des fluides géothermiques à Lavey-les-Bains

- Echantillonnage du forage P600
- Mesures des paramètres physico-chimiques
- Analyses in-situ.

### *Liste des intervenants de l'Atelier GeoNE-1*

- Dr. Romain Sonney, Laboratoire de Géothermie –CREGE
- Dr. Niels Giroud, Laboratoire de Géothermie –CREGE

## 3.2 Atelier GeoNE-2 : Approche de la modélisation géologique 3D avec GeoModeller

### *26 avril (9h00 à 17h30) à Neuchâtel*

09:00 - 10:30 Présentation en salle

- Introduction à la modélisation géologique 3D.
- Modèles 3D réalisés avec GeoModeller dans le cadre du projet GeoNE sur les zones Neuchâtel – St Blaise et La Chaux-de-Fonds – Le Locle.

11:00 - 12:30 Présentations en salle

- Modèles 3D réalisés avec GeoModeller dans le cadre d'autres projets géothermiques (géologie, température, écoulements souterrains) sur le Plateau molassique et dans les Alpes.
- Introduction au programme 3D GeoModeller.

13:30 - 15:30 Exercices en salle d'informatique

- Exercice sur des cas simples

16:00 - 17:30 Exercices en salle d'informatique

- Exercice sur des cas simples

### *27 avril (9h00 à 12h30)*

09:00 - 10:30 Exercices en salle d'informatique

- Exercice sur des cas simples

11:00 - 12:30 Exercices en salle d'informatique

- Exercice sur des cas simples

### *Liste des intervenants de l'Atelier GeoNE-2*

- Andrea Borghi, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie
- Nicolas Clerc, Laboratoire de Géothermie - CREGE
- Dr. Luca Guglielmetti, Laboratoire de Géothermie - CREGE
- Dr. François Negro, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie

# 4. Formation continue du CAS DEEGEOSYS

## 4.1 Introduction

La préparation de cette formation continue en géothermie profonde (CAS DEEGEOSYS) a débuté en septembre 2010 et s'est poursuivie dans le cadre du projet GeoNE jusqu'en juin 2011. Ensuite, c'est le financement propre du CAS DEEGEOSYS par les frais d'inscriptions et le sponsoring qui a permis de finir le montage de la première édition de cette formation progressivement. Le CAS DEEGEOSYS a débuté le 21 novembre 2011 avec la succession des 4 modules suivants :

- Module 1 – Geology and Geophysics (novembre 2011)
- Module 2 - Geochemistry and Hydrochemistry (janvier 2012)
- Module 3 - Drilling and Logging (mars 2012)
- Module 4 – Reservoir Evaluation and production (juin 2012)

## 4.2 Organisation du cours

### DIRECTION DU COURS

- Prof. Eva Schill, CHYN
- Prof. Philippe Renard, CHYN
- Dr. François-D. Vuataz (Directeur de l'édition 2011-2012)

### LOGISTIQUE, SECRETARIAT, COMPTABILITE

- Dr. Guillaume Mauri
- Mme. Sabine Erb

### COMITE SCIENTIFIQUE

- Prof. Ladislaus Rybach, Geowatt AG
- Prof. François Zwahlen, CHYN

### SPONSORS

- Office fédéral de l'énergie, Berne
- Services Industriels de Genève, SIG

## 4.3 Participants

Le nombre de participants finalement inscrits a dépassé toutes les espérances avec un total de 27 inscriptions, alors que le nombre minimum fixé pour donner le cours était de 7 (Tableau VII - 2).

*Tableau VII - 2. Statistique de participation au CAS DEEGEOSYS*

| Pays | Nb. |
|---|---|
| Suisse | 20 |
| France | 2 |
| Allemagne | 2 |
| Italie | 1 |
| Espagne | 1 |
| République Mauritienne | 1 |
| Total | 27 |

| Langue | Nb. |
|---|---|
| Français | 14 |
| Allemand | 10 |
| Italien | 2 |
| Espagnol | 1 |
| Total | 27 |

| Module | Nb. |
|---|---|
| M1 | 21 |
| M2 | 20 |
| M3 | 23 |
| M4 | 21 |
| Moyenne | 21 |
| CAS complet | 18 |
| 1, 2 ou 3 modules | 9 |

| Formation | Nb. |
|---|---|
| Géologue, hydrogéologue, géophysicien | 22 |
| Ingénieur minier | 2 |
| Ingénieur en énergie | 2 |
| Direction de services | 1 |
| Total | 27 |

| Genre | Nb. |
|---|---|
| Femmes | 6 |
| Hommes | 21 |
| Total | 27 |

## 4.4 Programme du CAS DEEGEOSYS 2011-2012

A ce jour, les quatre modules du CAS DEEGEOSYS ont été réalisés entre novembre 2011 et juin 2012 : leur programme résumé se trouve ci-dessous (Tableau VII - 3 à Tableau VII - 6).

*Tableau VII - 3. Résumé du programme du Module 1 : Geology and Geophysics*

| Date | Themes | Lecturer |
|---|---|---|
| Monday 21.11.11 | Welcome and introduction of the CAS DEEGEOSYS<br>Generalities, theoretical bases of geothermics | CAS direction<br>Thomas Kohl |
| | World geothermal use, situation in Europe and Switzerland<br>Exploration concept of deep reservoirs | Thomas Kohl |
| Tuesday 22.11.11 | Heat production, district heating systems<br>Energy conversion, electricity production, power plants | Thomas Kohl |
| | Exploration I : Geophysical methods (thermal, seismic) | Eva Schill |
| Wednesday 23.11.11 | Economic aspects of geothermal installations; environmental and societal aspects of geothermal installations | Thomas Kohl |

| | | |
|---|---|---|
| | Exploration I : Geophysical methods (gravity, magnetics, magnetotellurics,) | Eva Schill |
| Thursday 24.11.11 | Exploration II : Geological and geophysical methods for the development of conceptual models; 3D modelling: data, methods and softwares | Albert Genter |
| | Exploration II : Fracture network and 3D models at Soultz | |
| Friday 25.11.11 Soultz-sous-Forêts | Trip to Soultz-sous-Forêts<br>Presentation of the Soultz EGS project | Albert Genter |
| | Visit of the Soultz EGS power plant<br>Return trip to Neuchâtel | |

*Tableau VII - 4. Résumé du programme du Module 2 : Geochemistry and Hydrochemistry.*

| **Date** | **Themes** | **Lecturer** |
|---|---|---|
| Monday 23.01.12 | Welcome and introduction of the Module 2<br>Fluid and mineral geochemistry, basics of thermodynamics, geochemistry of rocks and secondary minerals | CAS direction<br>Luigi Marini |
| | Exploration III : Fluid geochemistry<br>Exploration III : Gas geochemistry | Luigi Marini |
| Tuesday 24.01.12 | Gases in high enthalpy reservoirs<br>Hydrochemical investigations in an Alpine system<br>Exploration IV : Isotope geochemistry | Niels Giroud<br>Romain Sonney<br>Luigi Marini |
| | Exploration V : Field surveys, sampling and measurements | Luigi Marini |
| Wednesday 25.01.12 | Exploration V : Soil gas survey<br>Exploration V : Analyses, data quality and presentation<br>Exploration V : Chemical geothermometers | Luigi Marini |
| Field | Practical work at the hydrothermal system of Lavey-les-Bains | Luigi Marini |
| Thursday 26.01.12 | Exploration VI : Geochemical and isotopic geothermometers<br>Geochemical modelling of fluid-rock interactions | Luigi Marini |
| | Modelling of Thermal-Hydraulic-Chemical processes<br>Experiments on rock-fluid interaction | Niels Giroud<br>Romain Sonney |
| Friday 27.01.12 | Exercises on geochemical modelling<br>Scaling and corrosion processes in boreholes and surface installations, problems and mitigation | Luigi Marini<br>F.-D. Vuataz |
| | Written examination of the Modules 1 & 2 | CAS direction |

*Tableau VII - 5. Résumé du programme du Module 3 : Drilling and Logging.*

| **Date** | **Themes** | **Lecturer** |
|---|---|---|
| Monday 26.03.12 | Welcome and introduction of the Module 3<br>Generalities, basics of drilling technology<br>Concept of exploration drilling | CAS direction<br>Sverrir Thorhallson |
| | Drilling platform, rig types, waste handling, cementing<br>Wells targeting, directional drilling | Sverrir Thorhallson |
| Tuesday 27.03.12 | Drilling for high temperature reservoirs<br>Design and completion for exploration and exploitation wells | Sverrir Thorhallson |
| | Drilling cost and cost control, progress of the technology<br>Use of drilling reports to assess the reservoir formation | Sverrir Thorhallson |
| Wednesday 28.03.12 | Measurements while drilling (MWD), geo-monitoring parameters during drilling<br>Safety questions, drilling incidents | Sverrir Thorhallson |
| | Borehole logging | Sverrir Thorhallson |
| Thursday 29.03.12 | Drilling of geothermal doublets in sedimentary reservoirs<br>Drilling in dense urban environments | Pierre Ungemach |
| Travel | Departure for Taufkirchen drilling site (Germany)<br>Environmental impact and assessment of deep boreholes<br>A case history in the Paris basin<br>Night in Ottobrunn (Germany) | Pierre Ungemach |
| Friday 30.03.12<br>Travel | Visit of the Taufkirchen drilling site (Germany)<br>Return to Neuchâtel | Pierre Ungemach |

*Tableau VII - 6. Résumé du programme du Module 4 : Reservoir Evaluation and production.*

| Date | Themes | Lecturer |
|---|---|---|
| Monday 4.06.12 | Welcome and introduction of the Module 4<br>Introduction to reservoir engineering<br>Pumping technology | CAS direction<br>Miklos Antics |
| | Equipment performance<br>Monitoring programme, maintenance and life-time | Miklos Antics |
| Tuesday 5.06.12 | Injection and production tests<br>Effects of continuous fluid injection | Miklos Antics |
| | Simulation of reservoir exploitation | Miklos Antics |
| Wednesday 6.06.12 | Reservoir stimulation I : Chemical methods<br>Stimulation in carbonate reservoirs<br>Economy and sustainable exploitation of deep reservoirs | Miklos Antics |
| | Case history of the Dogger reservoir of the Paris Basin<br>Case history of Larderello geothermal field<br>Chemical stimulation in high temperature reservoirs | Miklos Antics<br><br>François-D. Vuataz |
| Thursday 7.06.12 | Reservoir stimulation II : Hydraulic methods<br>From oil & gas industry to EGS crystalline reservoirs<br>Stimulation schemes and responses | Jan Diederik Van Wees |
| | Seismic risk evaluation for deep geothermal systems<br>Scenarios for a low seismicity during hydraulic stimulation<br>Induced seismicity in hydrothermal reservoirs<br>Experience gained from the Soultz and Basel EGS projects | Jan Diederik Van Wees |
| Friday 8.06.12 | Written evaluation of Module 3 + 4 | CAS direction |
| | Closing ceremony | Sponsors |

## 4.5 Enseignement pour le CAS DEEGEOSYS

Il a été décidé que tout l'enseignement de cette formation continue serait donné en anglais, afin de favoriser la participation de personnes de Suisse et des pays voisins. De plus, on a fait appel à des experts internationaux dans les divers domaines traités lors des quatre modules pour réaliser l'enseignement. Pour chaque module, un ou deux enseignants principaux ont été sélectionnés.

## LISTE DES ENSEIGNANTS

**Dr. Miklos Antics**
GPC Instrumentation Process
PARIS NORD II, Immeuble Business Park, Bât. 4A - 165, rue de la Belle Etoile
B.P. 55030
F-95946 ROISSY CDG CEDEX, France
m.antics@geoproduction.fr
www.gpc-france.com

**Dr. Albert Genter**
EEIG Géothermie Soultz
BP 40038, Route de Soultz
F-67250 Kutzenhausen, France
genter@soultz.net
www.geothermie-soultz.fr

**Dr. Niels Giroud**
Laboratory for Geothermics - CREGE
c/o CHYN, Univ. of Neuchâtel
Rue E.-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel, Switzerland
niels.giroud@unine.ch
www.unine.ch/chyn

**Prof. Thomas Kohl**
KIT Karlsruhe Institute of Technology
Institute for Applied Geosciences
Adenauer-Ring 20B, Geb. 40.50
D-76131 Karlsruhe, Germany
thomas.kohl@kit.edu
www.kit.edu

**Dr. Luigi Marini**
Consultant in Applied Geochemistry
via Antonio Fratti, 253
I-55049 Viareggio (LU), Italy
luigimarini@rocketmail.com

**Prof. Eva Schill**
Laboratory for Geothermics - CREGE
c/o CHYN, Univ. of Neuchâtel
Rue E.-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel, Switzerland
eva.schill@unine.ch
www.unine.ch/chyn

**Dr. Romain Sonney**
Bureau d'Etudes Géologiques - BEG
Rue de La Printse 4
CH-1994 Aproz, Switzerland
romain.sonney@beg-geol.ch
www.beg-geol.ch

**Sverrir Thorhallson**
Iceland GeoSurvey
Department Geothermal Engineering
Grensásvegur 9
108 Reykjavík, Iceland
s@isor.is
www.geothermal.is

**Pierre Ungemach**
GPC Instrumentation Process
PARIS NORD II, Immeuble Business Park, Bât. 4A
165, rue de la Belle Etoile
B.P. 55030
F-95946 ROISSY CDG CEDEX, France
pierre.ungemach@geoproduction.fr
www.gpc-france.com

**Prof. Jan Diederik van Wees**
TNO, Oil and Gas
Princetonlaan 6,
3584 CB, Utrecht, Netherlands
jan_diederik.vanwees@tno.nl
www.tno.nl

**Dr. François-D. Vuataz**
Laboratory for Geothermics - CREGE
c/o CHYN, Univ. of Neuchâtel
Rue E.-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel, Switzerland
francois.vuataz@unine.ch
www.unine.ch/chyn

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

# Rapport final de la Phase 1

## Chapitre VIII.

## Conclusions et perspectives

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

**CHAPITRE VIII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 241**

**1. CONCLUSIONS ..... 241**

1.1 CONCLUSIONS PAR REGION ..... 242

1.2 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES ..... 245

**2. RECOMMANDATIONS DU COMITE SCIENTIFIQUE ..... 247**

2.1 PRESENTATION DU COMITE ..... 247

2.2 DEVELOPPEMENT DES ASPECTS DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNIQUE ..... 247

2.3 COMMENTAIRES ET RECOMMANDATIONS SUR LE PROJET GEONE ..... 248

**3. PROGRAMME D'ACTIVITE DU CENTRE DE COMPETENCE EN GEOTHERMIE POUR LE DEVELOPPEMENT DE FUTURS PROJETS DANS LE CANTON ..... 250**

3.1 GEONE – PROGRAMME DE PHASE 2 ..... 250

3.2 GEONE – PROGRAMME DE PHASE 3 ..... 252

## LISTE DES FIGURES

Figure VIII - 1. Carte tectonique du canton de Neuchâtel avec les trois régions d'investigation (rectangles noirs) et les cinq sites de forage potentiels (carrés rouges) .....241

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau VIII - 1. Synthèse des résultats des cinq zones d'investigation du projet GeoNE.....244

Tableau VIII - 2. Liste des membres du comité scientifique.....247

# Chapitre VIII. Conclusions et perspectives

## 1. Conclusions

Pendant la période de mai 2010 à juillet 2012, le programme GeoNE a été conduit dans plusieurs directions selon ses trois buts principaux :

- Développer la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel par l'exploration des aquifères profonds.
- Développer et consolider le centre de compétence en géothermie de l'Université de Neuchâtel.
- Assurer le transfert de technologie des méthodes d'exploration géothermique vers les bureaux d'étude de la région.

Dans le domaine de l'exploration géothermique le groupe de projet GeoNE, formé de collaborateurs du Laboratoire de Géothermie – CREGE, a mené des travaux de terrain, de laboratoire et de bureau et ces investigations ont été engagées dans les trois régions sélectionnées (Figure VIII - 1).

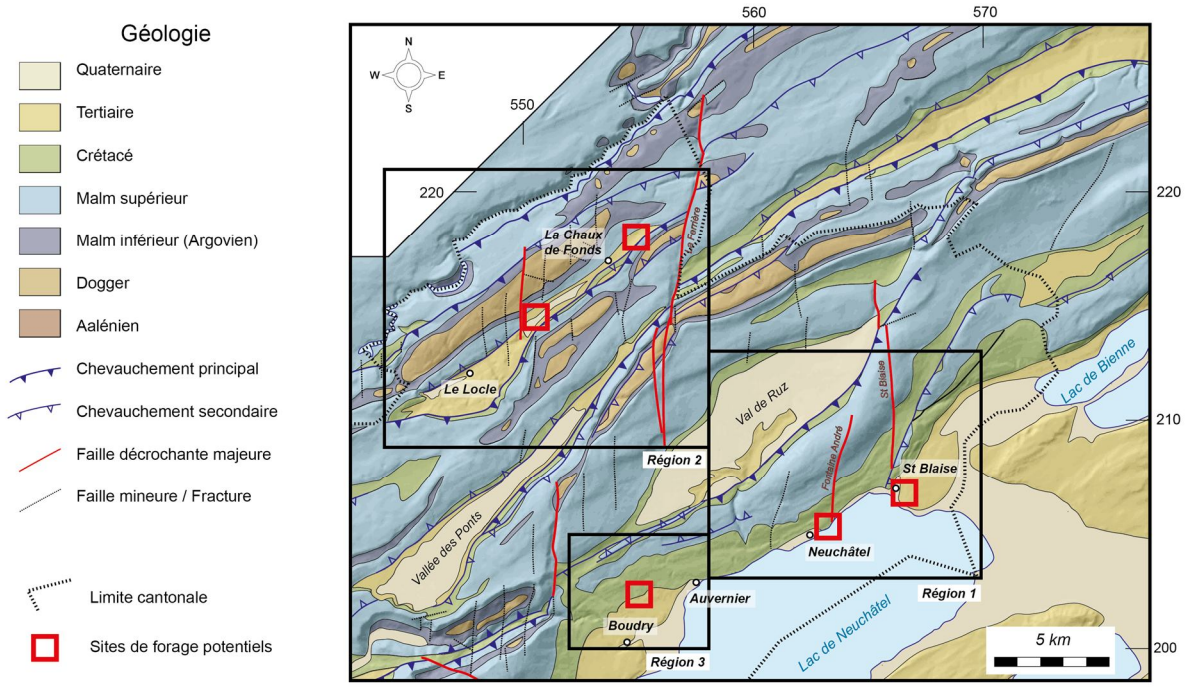



*Figure VIII - 1. Carte tectonique du canton de Neuchâtel avec les trois régions d'investigation (rectangles noirs) et les cinq sites de forage potentiels (carrés rouges)*

Les trois régions et les cinq sites de forages ont été sélectionnés d'une part sur la base des résultats des études de potentiel précédentes (PGN et PDGN), mais également en fonction de recommandations formulées par les services de la ville de la Chaux-de-Fonds et des modifications prévues dans certains réseaux de distribution de chaleur.

Les méthodes utilisées pour l'exploration ont été la modélisation géologique et thermique 3D, la gravimétrie et les gaz des sols. C'est la première fois que ces méthodes ont été engagées dans le canton de Neuchâtel pour de l'exploration géothermique.

Certaines activités, du ressort de la recherche appliquée, ont été menées pour développer des outils et une méthodologie de l'exploration géothermique qui vont au delà des méthodes reconnues et utilisées en routine.

Les actions du transfert de technologie ont été assurées par l'organisation et la tenue de deux conférences et de deux ateliers spécifiques à l'exploration des aquifères profonds, ainsi que la création d'un cours de formation continue en géothermie profonde à l'Université de Neuchâtel, le CAS DEEGEOSYS.

Le présent chapitre réunit les conclusions spécifiques de chacune des trois régions explorées et le Tableau VIII - 1 en synthétise les résultats. Ensuite on trouvera des conclusions générales et des propositions de scénarios de développement géothermique. Finalement les recommandations du comité scientifique du Laboratoire de géothermie sont suivies par un plan d'action du centre de compétence en géothermie, proposé pour les prochaines phases du programme GeoNE.

# 1.1 Conclusions par région

## 1.1.1 Région Neuchâtel – St-Blaise

La zone de St-Blaise de par la présence de structures géologique favorables (système de failles), d'un potentiel thermique plus important (aquifères plus profonds), ainsi que par l'existence d'un potentiel de consommateurs de chaleur élevé, est dans l'état actuel des connaissances, la zone la plus appropriée pour le développement de la géothermie dans le canton de Neuchâtel.

Comme il a été présenté dans cette étude, les avancées dans la connaissance des structures géologiques en 3D ont permis de calculer des valeurs du potentiel de température (Tableau III - 4, Chapitre III), ainsi que de sélectionner un site de forage (Figure III - 43, Chapitre III). De plus une étude de la valorisation de la chaleur a permis de donner une première estimation du coût des investissements nécessaires (Tableau III - 7 etTableau III - 8, Chapitre III). Une synthèse des résultats est visible dans le Tableau VIII - 1.

Toutefois, des incertitudes demeurent sur la profondeur exacte des aquifères profonds, ainsi sur la température et le débit de production des aquifères. C'est pourquoi, basé sur les résultats de ces investigations, l'estimation du potentiel géothermique de la zone de St-Blaise devrait être complétée par une campagne de profils sismiques (Figure III - 42, Chapitre III), puis par la réalisation d'un premier forage d'exploration.

La campagne sismique doit être réalisée pour affiner la profondeur et l'épaisseur des aquifères et pour préciser l'importance du système de failles, tandis que le forage, complété par des diagraphies et des tests de production permettra de définir les propriétés physiques, hydrauliques et chimiques des aquifères potentiels.

Dans un deuxième temps, après avoir démontré l'existence d'une ressource géothermique dans la zone de St Blaise, des investigations similaires pourront être réalisées dans la zone de Monruz. Par exemple, un projet de plus petite envergure, avec un forage captant l'aquifère du Dogger vers 900 m de profondeur pourrait alimenter avec profit le complexe des piscines du Nid-du-Crô ou fournir de l'eau chaude à un nouveau centre thermal neuchâtelois.

## 1.1.2 Région Le Locle - La Chaux-de-Fonds

Comme il a été présenté dans cette étude, les avancées dans la connaissance des structures géologiques en 3D ont permis de calculer des valeurs du potentiel de tempéraure (Tableau IV - 3, Chapitre IV), ainsi que de sélectionner un site de forage (Figure IV - 42, Chapitre IV) sur le site de La Chaux-de-Fonds Est. De plus une étude de valorisation de la chaleur a permis de donner une

première estimation du coût des investissements nécessaires (Figure IV - 38, Chapitre IV). Une synthèse des résultats est visible dans le Tableau VIII - 1.

Toutefois, des incertitudes restent sur la profondeur exacte des aquifères profonds, ainsi sur la température et le débit de production des aquifères. C'est pourquoi, basé sur les résultats de ces investigations, l'étude du potentiel géothermique de la zone de La Chaux-de-Fonds devrait être complétée par une campagne de profils sismiques (Figure IV - 41, Chapitre IV), puis par la réalisation d'un premier forage d'exploration.

La campagne sismique doit être réalisée pour affiner la profondeur et l'épaisseur des aquifères et pour mettre en évidence d'éventuels systèmes de failles, tandis que le forage, complété par des diagraphies et des tests de production, permettra de définir les propriétés physiques, hydrauliques et chimiques des aquifères potentiels.

Dans un deuxième temps, après avoir démontré l'existence d'une ressource géothermique dans la zone de La Chaux-de-Fonds Est, des investigations similaires pourront être réalisées dans la zone du Crêt-du-Locle. Par exemple, un forage captant avec succès l'aquifère du Dogger vers 800 m de profondeur pourrait fournir un nouveau réseau de chauffage à basse enthalpie alimentant la zone industrielle en cours de développement.

### 1.1.3 Région Auvernier – Boudry

Le modèle géologique 3D de la région d'Auvernier - Boudry (modèle de Détail 3 au Chapitre V, Figure V - 2) a mis en évidence l'existence d'une structure anticlinale sur un plan de chevauchement, qui est favorable à la géothermie. L'étude gravimétrique a permis de valider le modèle géologique et de considérer les géométries, ainsi que les profondeurs des différents aquifères profonds (Malm, Dogger et Muschelkalk) comme étant réalistes. Toutefois des variations existent entre le modèle et la réalité et l'incertitude sur la profondeur exacte de chaque aquifères devrait être levée par la réalisation de deux profils sismiques 2D dans la région d'Auvernier – Boudry. Ces profils permettront d'apporter les informations complémentaires à cette étude, qui sont nécessaires avant la réalisation d'un premier forage d'exploration.

Au niveau du site de l'usine d'incinération de Cottendart, les modèles de température ont montré l'existence d'un réservoir de chaleur potentiel. Alors que les aquifères du Dogger et du Malm seraient trop froids pour une utilisation directe de la chaleur, l'aquifère du Muschelkalk apparaît plus prometteur. Une synthèse des résultats est visible dans le Tableau VIII - 1.

Comme indiqué par l'étude préliminaire sur les modes d'exploitation de la chaleur géothermique, une température de 50°C ou plus de l'aquifère du Muschelkalk permettrait une utilisation intéressante de la chaleur pour le réseau de chauffage Cadbar à Colombier. Si la ressource géothermique doit être substituée à celle de l'incinérateur sans modification au réseau Cadbar (85 à 105°C), elle devra être combinée avec des pompes à chaleur centralisées et une chaudière d'appoint pour répondre aux besoins du CAD. Dans le cas d'un réseau modifié pour la basse température (20 à 50°C), le fluide de chauffage devrait être élevé au niveau requis pour chaque bâtiment au moyen de pompes à chaleur décentralisées.

Cette étude propose comme lieu de forage le site de Cottendart à l'emplacement actuel de l'incinérateur. La raison principale étant l'existence du terrain disponible pour la mise en place du forage, ainsi que l'éloignement des zones d'habitation et plus particulièrement l'entrée du réseau de chauffage à distance Cadbar. Bien qu'il reste des incertitudes non négligeables sur la profondeur exacte de l'aquifère du Muschelkalk (Chapitre V, Figure V - 12c), un log synthétique de forage a été réalisé (Chapitre V, Figure V - 12a) qui décrit la géométrie en 3D de l'ensemble des formations rencontrées.

*Tableau VIII - 1. Synthèse des résultats des cinq zones d'investigation du projet GeoNE*

| **Région Neuchâtel – St Blaise** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Caractéristiques** | **Zone Monruz** | | **Zone St Blaise** | |
| Géologie : fracturation-failles | Favorable | | Très favorable | |
| Site de forage potentiel | Littoral Les Saars - Monruz | | Marin – Nord de l'autoroute | |
| Aquifères potentiels<br>Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk | Prof. moy. (m)<br>400<br>900<br>1450 | T°C moyenne<br>12 - 21<br>21 - 35<br>42 - 55 | Prof. moy. (m)<br>800<br>1300<br>1850 | T°C moyenne<br>20 - 31<br>29 - 46<br>47 - 63 |
| Conditions thermiques | Temp. réduite par l'effet du karst | | Températures les plus élevées | |
| Utilisation de la chaleur | Raccordement au CAD CUM | | Nouveau CAD : haute T°C/basse T°C | |
| Prix de revient de l'énergie (ct/kWh) | Malm : 18.5<br>Dogger : 16.0<br>Muschelkalk : 13.1 | | Malm : 15.7 / 20.4<br>Dogger : 16.6 / 23.4<br>Muschelkalk : - / 15.3 | |
| **Région Le Locle – La Chaux-de-Fonds** | | | | |
| **Caractéristiques** | **Zone Crêt-du-Locle** | | **Zone La Chaux-de-Fonds Est** | |
| Géologie : fracturation-failles | Peu favorable à favorable | | Peu favorable | |
| Site de forage potentiel | Nord-ouest du Crêt-du-Locle | | Est de La Chaux-de-Fonds | |
| Aquifères potentiels<br>Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk<br>Muschelkalk-2 | Prof. moy. (m)<br>250<br>800<br>1500<br>- | T°C moyenne<br>10 - 13<br>18 - 25<br>37 - 44<br>- | Prof. moy. (m)<br>200<br>650<br>1200<br>1650 | T°C moyenne<br>10 - 12<br>18 - 23<br>32 - 37<br>42 - 46 |
| Conditions thermiques | Température réduite par les effets du karst et de l'altitude | | Température réduite par les effets du karst et de l'altitude | |
| Utilisation de la chaleur | Nouveau CAD :<br>haute T°C ou basse T°C | | Raccordement au CAD existant | |
| **Région Auvernier – Boudry** | | | | |
| **Caractéristiques** | **Zone Cottendart** | | | |
| Géologie : fracturation-failles | Peu favorable | | | |
| Site de forage potentiel | A proximité de l'incinérateur de Cottendart | | | |
| Aquifères potentiels<br>Malm<br>Dogger<br>Muschelkalk<br>Muschelkalk-2 | Prof. moy. (m)<br>300<br>800<br>1350<br>1750 | | T°C moyenne<br>12 - 19<br>21 - 31<br>41 - 50<br>50 - 59 | |
| Conditions thermiques | Augmentation de la température vers le littoral | | | |
| Utilisation de la chaleur | Raccordement au CAD Cadbar (avec ou sans PAC) | | | |

# 1.2 Conclusion générale et perspectives

Basée sur les conclusions pour chaque région d'étude présentées précédemment, la suite de l'exploration du potentiel géothermique profond dans le canton de Neuchâtel dépend avant tout des choix et des priorités qui seront fixés. Ci-après plusieurs scénarios possibles sont décrits et présentés par ordre décroissant de leur ampleur et du montant de l'investissement nécessaire.

Les modèles géologiques 3D, ainsi que la modélisation des températures ont confirmé l'existence d'un potentiel géothermique dans le canton, apparemment plus important au sud du canton dans la zone de St-Blaise – Marin. Toutefois, en raison du manque de données directes par forage des couches géologiques profondes, d'importantes incertitudes doivent être levées : en premier, le débit de production de ces aquifères potentiels, ensuite leur température et finalement la profondeur précise des réservoirs. Ces informations sur la profondeur et la géométrie précise des formations géologiques à grande profondeur peuvent être obtenues par des campagnes de sismique réflexion. Par contre, les informations de température et de débit des aquifères ne peuvent, être acquises que par des diagraphies géophysiques, des tests de pompage et des analyses chimiques des fluides géothermiques dans les premiers forages d'exploration.

## 1.2.1 Scénario 1 – Prospection par forage de 5 sites

Dans le cadre d'un investissement financier très conséquent, un projet de prospection par forage des ressources géothermiques à l'échelle cantonale, serait mis en place, comprenant une série de profils sismiques 2D et un forage d'exploration dans chacun des cinq sites sélectionnés par le projet GeoNE.

Les profils sismiques permettront de vérifier et de calibrer les modèles géologiques 3D en donnant les informations précises sur la géométrie des formations géologiques. Chaque forage d'exploration devra traverser l'ensemble des aquifères potentiels et atteindre le cristallin (à plus de 2'500 m de profondeur). Pour chacun des cinq forages, leur analyse (diagraphies et tests de production) permettra de caractériser les ressources énergétiques de chacun des aquifères profonds. La réalisation de ce scénario permettra d'obtenir une bonne estimation des capacités énergétiques de chaque aquifère à l'échelle cantonale.

Pour réaliser ce programme de prospection, un budget estimé de 50 à 55 millions de francs est nécessaire pour les cinq sites. En cas de succès du premier forage de chaque site considéré, le financement du deuxième forage du doublet et du raccordement au réseau de chauffage devra également être trouvé.

## 1.2.2 Scénario 2 – Prospection par forage de 2 sites

Dans le cadre d'un investissement financier important, un projet de prospection par forage des ressources géothermiques serait mis en place sur deux sites sélectionnés, comprenant une campagne profils sismique 2D, ainsi qu'un forage d'exploration par site.

Les profils sismiques permettront de vérifier et de calibrer les modèles géologiques 3D en donnant les informations précises sur la géométrie des formations géologiques. Chaque forage d'exploration devra traverser l'ensemble des aquifères potentiels et atteindre le cristallin (à plus de 2'500 m de profondeur). Pour chacun des deux forages, leur analyse (diagraphies et tests de production) permettra de caractériser les ressources énergétiques de chacun des aquifères profonds. La réalisation de ce scénario permettra d'obtenir pour chaque site une bonne estimation des capacités énergétiques de chaque aquifère et fournira des informations pouvant être extrapolées à l'échelle du canton.

Pour réaliser ce programme de prospection, un budget estimé de 20 à 22 millions de francs est nécessaire pour les deux sites. En cas de succès du premier forage de chaque site considéré, le financement du deuxième forage du doublet et du raccordement au réseau de chauffage devra également être trouvé.

### 1.2.3 Scénario 3 – Prospection par forage de 1 site

Dans le cadre d'un investissement financier limité, la zone de St-Blaise serait retenue pour sélectionner le site de développement optimum des ressources géothermiques profondes.

Préalablement, des profils sismiques 2D permettront de vérifier et d'améliorer le modèle géologique 3D en donnant les informations précises sur la géométrie des formations géologiques. Sur le site choisi, sera réalisé un forage d'exploration qui devra traverser l'ensemble des aquifères potentiels et atteindre le cristallin (à plus de 2'500 m de profondeur). L'analyse des résultats du forage (diagraphies et tests de productions) permettra de caractériser les ressources énergétiques de chaque aquifère pour le site de St-Blaise. Toutefois, si ces informations obtenues seront primordiales pour le site de St-Blaise, elles pourront apporter des données de haute qualité sur le potentiel géothermique du littoral Est. Par contre, elles ne sauront être généralisées à l'ensemble du canton.

Pour réaliser ce programme de prospection, un budget estimé de 12 à 13 millions de francs est nécessaire pour ce site. En cas de succès du premier forage, le financement du deuxième forage du doublet et du raccordement au réseau de chauffage devra également être trouvé.

### 1.2.4 Scénario 4 – Prospection par forage de ressources à faible température sur 3 sites

Dans le cadre d'un investissement financier limité, trois sites seraient retenus pour prospecter des ressources géothermiques à faible température. Il s'agit essentiellement des aquifères du Malm et du Dogger, à moins de 1'000 m de profondeur et à une température de moins de 30°C. Cette option nécessiterait la création de réseaux de chauffage à distance à basse température, couplés à des pompes à chaleur décentralisées.

Des profils sismiques permettront de vérifier et de calibrer la géométrie des formations géologiques des trois sites sélectionnés. Chaque forage d'exploration devra traverser les aquifères potentiels du Malm et du Dogger. Pour chacun des trois forages, leur analyse (diagraphies et tests de production) permettra de caractériser les ressources énergétiques des deux aquifères traversés. La réalisation de ce scénario permettra d'obtenir pour chaque site une bonne estimation des capacités énergétiques des aquifères et fournira des informations pouvant être extrapolées à l'échelle régionale.

Ce type de ressource géothermique et son utilisation sont envisageables dans toutes les régions du canton. Ce scénario inclurait trois forages d'exploration à proximité de nouveaux sites de consommateurs de chaleur à basse température (Ecoquartier, quartier Minergie, nouveau site industriel, centre thermal, etc.).

Pour réaliser ce programme de prospection, un budget estimé de 8 à 9 millions de francs est nécessaire pour les trois sites. En cas de succès du premier forage de chaque site considéré, le financement du deuxième forage du doublet et du raccordement au réseau de chauffage devra également être trouvé.

# 2. Recommandations du comité scientifique

## 2.1 Présentation du comité

La deuxième séance du comité scientifique du Laboratoire de géothermie organisée à Neuchâtel les 11 et 12 mars 2012 a été consacrée essentiellement au projet GeoNE. Le comité est constitué de dix experts internationaux en géothermie, dont le président est le Professeur L. Rybach (Tableau VIII - 2). Les conclusions et les commentaires présentés ici représentent la traduction d'extraits du rapport que le comité a rendu au mois de mai 2012.

*Tableau VIII - 2. Liste des membres du comité scientifique.*

| Membre du comité | Titre | Affiliation | E-mail |
|---|---|---|---|
| Fausto Batini | Dr. | Magma Energy Italia, Siena, Italie | fbatini@magmaenergycorp.com |
| Ingvar Fridleifsson | Dr. | UNU Reykjavik, Islande | ibf@os.is |
| Johann Goldbrunner | Prof. | Universität Graz, Autriche | goldbrunner@geoteam.at |
| Roland Horne | Prof. | Stanford University, Palo Alto, USA | horne@stanford.edu |
| Thomas Kohl* | Prof. | KIT Karlsruhe, Allemagne | thomas.kohl@kit.edu |
| John Lund | Prof. | GHC Klamath Falls, USA | john.lund@oit.edu |
| Hans-Björn Püttgen | Prof. | EPF Lausanne | hans.puttgen@epfl.ch |
| Peter Rose | Prof. | EGI Salt Lake City, USA | prose@egi.utah.edu |
| Ladislaus Rybach (Chair) | Prof. | ETH Zürich | rybach@ig.erdw.ethz.ch |
| Philipp Rudolf Von Rohr | Prof. | ETH Zurich | vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch |

* Le statut de membre a été changé en juillet 2011 pour un statut d'invité.

## 2.2 Développement des aspects de la recherche et de la technique

### 2.2.1 Projet GeoNE

Les objectifs des travaux du projet GeoNE sont de mettre en évidence des ressources en fluides géothermiques dont la température et en productivité permettrait dans un premier temps de produire de la chaleur, puis plus tard d'envisager une production électrique. Des études détaillées géologiques, des hydrogéologiques et géophysiques (principalement des modèles gravimétriques et thermiques) ont mis en évidence le manque cruel d'informations directes provenant de forages profonds dans les régions étudiées. Néanmoins, plusieurs sites potentiellement intéressants ont été identifiés pour de futurs forages. Il avait été demandé au Comité Scientifique (CS) de contrôler et de faire des recommandations sur la structure du rapport final du projet GeoNE.

### 2.2.2 Formation continue en géothermie

Regardant le rôle du CREGE dans l'enseignement, et en particulier dans le cadre du Certificat d'étude avancée du CAS DEEGEOSYS (Training Course in Deep Geothermal Systems), à l'unanimité, l'ensemble des membres du Comité Scientifique soutient le fait que le CAS DEEGEOSYS est un très grand succès, qui est unique en Europe. En particulier, un des membres du Comité Scientifique, Dr. I. Fridleifsson (Directeur du United Nations University Geothermal Training Programme, à Reykjavik, Islande) a souligné l'aspect suivant : « Le c*ertificat d'étude avancée du CAS DEEGEOSYS a le potentiel pour acquérir une valeur importante pour les pays européens. Avec l'expérience pratique et théorique de la Suisse, de la France et de l'Allemagne (pour ne nommer que quelques pays), le CREGE est dans la position idéale pour donner un enseignement spécialisé dans l'exploration et le développement des systèmes géothermiques profonds. Aucune des écoles internationales en géothermie n'est située géographiquement dans une position aussi favorable que le CREGE pour donner un tel enseignement aux professionnels européens ayant acquis un diplôme de Master et de Doctorat.* »

Dans le cadre du projet GeoNE, le CREGE a le devoir d'effectuer un transfert de technologie vers les bureaux d'études et les professionnels suisses. Pour ce faire, le CREGE a mis en place deux Workshops (Workshop GeoNE 1 et Workshop GeoNE 2).

### 2.2.3 Collaboration et visibilité

Le CREGE dirige plusieurs projets qui sont financés et/ou en partenariat avec des institutions publiques, telles que: Swiss Geothermal Network (SGnet), Geothermal Investment Center (GIC Sarl).

D'autres activités diverses sont poursuivies telles que des coopérations avec des partenaires privés et publics en Suisse. En 2011, plusieurs projets géothermiques publics (cantons de Fribourg, St-Gall, Thurgovie et Zurich) ont profité du savoir-faire et de l'expertise du CREGE.

Il est aussi à noter des participations dans des projets internationaux, tels que European Energy Research Allianz (EERA) et l'International Partnership for Geothermal Technology (IPGT).

## 2.3 Commentaires et recommandations sur le projet GeoNE

L'objectif de GeoNE (développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel) est d'évaluer le potentiel géothermique profond présent dans le canton de Neuchâtel dans le but d'exploiter des ressources hydrothermales. Il est aussi envisagé une exploitation ultérieure pour les réservoirs non conventionnels de type EGS. Le projet GeoNE a pour but d'améliorer la compréhension du potentiel géothermique pour trouver des fluides profonds, qui seront suffisamment chauds et qui permettront une productivité suffisante pour produire à court terme de la chaleur dans le cadre de réseaux de chauffage à distance (pour les bâtiments industriels et commerciaux et les habitations). Ultérieurement, dans l'optique plus lointaine d'un programme de géothermie EGS, le projet étudie la possibilité de production d'électricité. La Professeure E. Schill et son équipe ont réalisé des études ciblées et détaillées géologiques, hydrogéologiques et géophysiques (en particulier des modèles gravimétriques et thermiques). Les résultats en 3D de leurs études délimitent les principales structures tectoniques et domaines thermiques. Durant leurs travaux, il est devenu évident que beaucoup d'informations de base étaient manquantes, en particulier les informations concernant les forages profonds, qui sont inexistants dans le canton.

La question principale pour les futurs développements est de savoir si les fluides géothermiques peuvent être trouvés sur le territoire neuchâtelois en quantité suffisante pour avoir un intérêt économique intéressant à des profondeurs accessibles. Sur la base des résultats disponibles, il apparaît que parmi les zones étudiées, quelques zones intéressantes peuvent être identifiées (littoral

neuchâtelois et dans la région de La Chaux-de-Fonds - Le Locle). Dans l'état actuel des connaissances, les probabilités de réussite ne peuvent pas être quantifiées.

Seuls les forages et les tests de forages peuvent prouver si les ressources géothermiques seront économiquement viables dans le canton de Neuchâtel. Tenant en considération le manque de données vitales (porosité, perméabilité, température et composition chimique des fluides) aux profondeurs envisagées, le Comité Scientifique considère que la suite du projet GeoNE devra être planifiée avec la plus grande attention pour éviter les risques associés à la réalisation de forages profonds.

Avant de forer avec un diamètre adapté à une productivité élevée, d'autres études devraient être mises en place. En géophysique, la combinaison des résultats gravimétriques avec ceux de la sismique devrait être favorisée, en suivant l'approche développée dans les travaux de doctorat de P. Altwegg, qui a pour objectif de localiser les zones poreuses et perméables. Des mesures magnétotelluriques avec une référence lointaine pour réduire le bruit de fond pourraient aussi être réalisées afin de mieux définir les zones d'exploration. Les forages de petit diamètre (slimhole drilling) devraient être d'abord utilisés, ce qui permettra d'apporter les informations nécessaires sur les paramètres hydrogéologiques et géothermiques, ainsi que pour calibrer les modèles et les forages de production. Dans le choix des sites de forage et dans les zones d'intérêt mentionnées précédemment, la proximité des utilisateurs potentiels devra aussi être prise en compte.

Dans une phase suivante, une analyse de l'acceptation sociale et de la durabilité économique de la géothermie en fonction de l'usage potentiel de la ressource (génération électrique et/ou utilisation directe de la chaleur) sera indispensable.

Des préoccupations du Comité Scientifiques ont porté sur le fait que Prof. E. Schill et son équipe ne devraient pas être laissés seuls lors de la réalisation des forages et de la campagne sismique. En effet, les tâches et les responsabilités devraient être réalisées conjointement avec les autorités cantonales et des sociétés industrielles.

Le Comité Scientifique a aussi pris en considération le document « Structure du Rapport Final technique de GeoNE». La structure du rapport présentée au Comité Scientifique est appropriée pour la description des activités réalisées, ainsi que des résultats obtenus. Dans ce rapport est incluse une activité qui va au-delà de la tâche première du projet GeoNE (l'évaluation des possibilités de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel, principalement pour les ressources hydrothermales) : «le transfert de technologie». Le projet GeoNE a permis, dans ce cas, la combinaison de réalisation de projets avec du transfert de technologie, mais dans le futur d'autres options devraient être envisagées.

Le Comité Scientifique attend avec impatience le rapport final de GeoNE, et tout particulièrement «les trois rapports indépendants» concernant les zones cibles de Neuchâtel – St-Blaise, La Chaux-de-Fonds et Cottendart, ainsi que le chapitre «Potentiel des EGS», qui sera aussi d'un grand intérêt.

## BIBLIOGRAPHIE

Scientific Committee, 2012. Report of 2nd meeting. Neuchâtel, 12 March 2012, 12 pp.

# 3. Programme d'activité du centre de compétence en géothermie pour le développement de futurs projets dans le canton

La Phase 1 du projet GeoNE s'achevant en été 2012, un concept et un budget prévisionnels ont été élaborés dès avril 2012 pour les Phases 2 et 3 du projet, consistant notamment à préparer et accompagner un projet de géothermie profonde sur l'un des sites sélectionnés. Une note contenant ces aspects a été remise au GIC et au SENE (Schill & Vuataz, 2012).

Les actions décrites et les budgets mentionnés ci-dessous concernent les tâches du CREGE lors de la réalisation d'un projet de géothermie profonde : préparation d'une campagne de sismique réflexion, montage du projet, préparation des forages et suivi du déroulement, accompagnement scientifique du projet.

## 3.1 GeoNE – Programme de Phase 2

Dans la note remise au GIC et au SENE, la Phase 2 du projet GeoNE, d'une durée prévue de deux ans, devait débuter dès la fin de la Phase 1, pour assurer d'une part la continuité dans le programme de développement de la géothermie profonde à Neuchâtel et d'autre part conserver le savoir-faire de l'équipe de projet.

### 3.1.1 Création d'une antenne de promotion de la géothermie au Centre de compétences de Neuchâtel

Pérennisation et développement des actions du centre de compétences en géothermie de Neuchâtel : Laboratoire de Géothermie – CREGE.

#### TACHES DU CREGE (ANNEES 1 + 2)

**Promotion**

- Création d'une antenne permanente de promotion de la géothermie, en collaboration avec la promotion économique du canton, pour attirer des investisseurs et des entreprises sur le canton. Cette activité se fera en concertation avec le Plan d'action pour la géothermie profonde en Suisse mis en place par le groupe de réflexion (AXPO, BKW, Sol-E, Geo-Energie Suissse, EKZ, , etc.).
- Organisation de 5 journées d'information et d'échange pour les investisseurs avec des visites de sites potentiels.

**Formation**

- Poursuite et développement de la formation continue en géothermie profonde (Certificat d'Etudes avancées CAS DEEGEOSYS).

**Transfert de technologie**

- Poursuite du transfert des connaissances et des outils développés par le Laboratoire de Géothermie auprès des bureaux d'ingénieurs.
- Organisation de 4 ateliers de géothermie (mesures thermiques, méthodes géophysiques).

**Information**

- Soutien aux autorités et organisation d'actions d'information publique sur les projets de géothermie.
- Organisation de visites d'installations géothermiques et de conférences pour les parlementaires.
- Conférences pour les autorités communales et cantonales.

## 3.1.2 Réalisation de trois projets hydrothermaux (chaleur)

### SITES RETENUS PAR LA PHASE 1 DU PROJET GEONE

- Projet La Chaux-de-Fonds Est.
- Projet St Blaise.
- Projet Cottendart.

Si le canton décide de poursuivre le développement de la géothermie à la suite des résultats du rapport final GeoNE Phase 1, les tâches suivantes seront exécutées.

### TACHES DU CREGE : ANNEE 1

- Promotion des 3 sites auprès des autorités et des acteurs économiques (soutien aux autorités, information dans les communes, etc.).
- Mise sur pied et suivi des campagnes de sismique réflexion sur chacun des 3 sites.
- Sélection des cibles de forage (modèles 3D détaillés).
- Concept de forages d'exploration : 1-3 sites, technologie du forage slimhole, coûts prévisionnels.
- Concept de synergie entre les 3 sites, pour optimiser les coûts.

### TACHES DU CREGE : ANNEE 2

Après désignation des maîtres d'œuvre des projets :

- Aide pour l'organisation de la structure des projets : séances de travail avec les entreprises, respectivement les bureaux d'ingénieurs ; tâches de liaison entre villes-canton-entreprises.
- Soutien pour la préparation des avant-projets.
- Supervision des aspects scientifiques lors du montage du projet.
- Suivi de qualité des projets pour le maître d'œuvre et les autorités.
- Référence pour le maître d'œuvre.
- Rapport final.

## 3.1.3 Préparation d'un concept pour un projet EGS à grande profondeur (chaleur & électricité)

### TACHES DU CREGE : ANNEE 1

- Etude de préfaisabilité pour un projet EGS dans le socle cristallin.
- Contacts avec les entreprises et les consortiums développant les EGS et accompagnement du canton de Neuchâtel dans ses démarches.

- Promotion de la technologie EGS dans le canton et suivi du développement des projets internationaux.

### TACHES DU CREGE : ANNEE 2

Si un projet EGS est validé sur le territoire cantonal :

- Soutien pour la préparation du projet.
- Supervision des aspects scientifiques.
- Suivi de qualité du projet.
- Référence pour le maître d'œuvre.
- Rapport final.

### BUDGET POUR LES ACTIVITES DU CREGE DE LA PHASE 2

**Années 1+2**

| | |
|---|---|
| • 1 poste à 50 % de chef de projet | 210'000 CHF |
| • 1 poste à 30 % de géologue-géophysicien | 70'000 CHF |
| • Frais divers (organisation workshops, petit matériel, déplacements) | 15'000 CHF |
| • **Total pour 2 ans** | **295'000 CHF** |

## 3.2 GeoNE – Programme de Phase 3

La Phase 3 du projet GeoNE proposée dans la note technique se déroule sur une période de 7 ans, mais seules les deux premières sont décrites et budgétées ci-dessous.

### 3.2.1 Plateforme technologique et scientifique sur la géothermie profonde à Neuchâtel

#### PROJET

Lors de la réalisation du premier projet de géothermie profonde (hydrothermal ou EGS), il sera important de mettre en place une plateforme technologique et scientifique sur le site des forages et de la centrale de production d'énergie.

Cette plateforme R&D servira de site d'expérimentation pour les laboratoires de l'Université et des hautes écoles spécialisées de Neuchâtel, et des cantons voisins, via des projets de recherche scientifique appliquée, des travaux de masters et de doctorats, ainsi que des expérimentations industrielles. Cette plateforme aura aussi une fonction de formation et de rayonnement technologique dans le domaine des énergies renouvelables pour le canton de Neuchâtel.

#### TACHES DU CREGE (ANNEES 1 + 2)

- Conception de la plateforme technologique et scientifique.
- Suivi du montage de la plateforme.
- Proposition de projets de recherche appliquée (géologie, hydrogéologie, géophysique, géochimie-hydrochimie, stimulation des réservoirs, tests des matériaux et d'équipements, développement d'instruments de mesure, conversion de l'énergie, etc.).
- Recherche du financement des projets scientifiques.

- Contacts et synergies avec les autres projets de géothermie profonde en Suisse.

### 3.2.2 Vision pour la géothermie dans le canton de Neuchâtel

Au cours des Phases 2 et 3 du projet GeoNE, le développement de la géothermie profonde et la création de plusieurs projets de réalisation et d'une plateforme technologique soutenue par le Laboratoire de Géothermie – CREGE auront les effets suivants :

- Création d'un savoir-faire sur le territoire cantonal.
- Création d'emplois dans divers types d'entreprises.
- Exportation du savoir-faire dans d'autres régions.
- Transfert de technologie et possibilité de créations de spin-off.
- Renforcement du pôle énergies renouvelables dans les Hautes écoles installées dans le canton de Neuchâtel.

### 3.2.3 Budget pour la période de montage et de démarrage de la plateforme technologique et scientifique

Le financement de cette plateforme devra inclure plusieurs sources et la part cantonale du budget de la Phase 3 sera complétée par des apports publics et privés.

Le budget de fonctionnement et de maintenance de cette plateforme n'est pas donné au-delà des 2 premières années. De plus, le financement des projets de recherche n'est pas inclus dans le budget ci-dessous.

#### BUDGET (ANNEES 1+2)

| | |
|---|---|
| • 1 poste à 100 % de chef de projet | 430'000 CHF |
| • 1 poste à 50% de géologue-géophysicien | 120'000 CHF |
| • 1 poste à 50% d'hydrogéologue-géochimiste | 120'000 CHF |
| • Equipement de la plateforme | 500'000 CHF |
| • Maintenance de la plateforme | 100'000 CHF |
| • Frais divers (organisation visites, matériel d'info, déplacements) | 15'000 CHF |
| • **Total pour les 2 premières années** | **1'285'000 CHF** |

#### BIBLIOGRAPHIE

Schill E. & Vuataz F.-D., 2012. Développement de la géothermie profonde à Neuchâtel - Projet GeoNe : proposition pour les Phases 2 et 3. Note technique, Neuchâtel, 19 avril 2012, 4 pp.

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

Centre d'Hydrogéologie et de
Géothermie – CHYN
Rue Emile-Argand 11
CH-2000 Neuchâtel

# Programme GeoNE – Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel

## Rapport final de la Phase 1

## Annexes

CREGE – Laboratoire de géothermie

***Rapport CREGE 12-02***

*Etude pour :*
*Service de l'énergie et de l'environnement – SENE*
*Service de l'économie - DEC*

## Impressum

Date : Août 2012

Rapport CREGE 12-02 : Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie - CREGE

Coordonnées :

Laboratoire de Géothermie - CREGE
c/o CHYN
11 rue E.-Argand
CH-2000 Neuchâtel
Tél. +41 (0)32 718 26 00
www.unine.ch/chyn
www.crege.ch

Citation :

CREGE – Laboratoire de Géothermie, 2012. Programme GeoNE - Développement de la géothermie profonde dans le canton de Neuchâtel. Rapport final de la Phase 1. Rapport CREGE 12-02 pour le Service de l'énergie et de l'environnement et pour le Service de l'économie, Neuchâtel.

## TABLE DES MATIERES

**ANNEXES** **255**

**1. ANNEXES CHAPITRE II ..... 255**

**2. ANNEXES CHAPITRE VII ..... 267**

## LISTE DES FIGURES

Figure A - 1. Carte des effets des caves sur la région de la Chaux-de-Fonds. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). Voir texte Chapitre II pour le détail.....255

Figure A - 2. Carte des effets des caves sur la région du Crêt-du-Locle. Voir texte Chapitre II pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).....256

Figure A - 3. Carte des effets des caves sur la région de Bole et Cottendart. Voir texte Chapitre II pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....257

Figure A - 4. Carte des tendances gravimétriques régionales pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$, qui a été réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie [Klingele & Olivier, 1980] pour une région de 45km de côté. Voir texte Chapitre II pour le détail.....258

Figure A - 5. Carte Bouguer Régionale pour une densité de 2.50 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie [Klingele & Olivier, 1980].et des stations gravimétriques Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'études. GeoNE. Voir texte Chapitre II pour le détail.....258

Figure A - 6. Carte des tendances gravimétriques régionales pour une densité de 2.50 g.cm$^{-3}$, qui a été réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie [Klingele & Olivier, 1980] pour une région de 45km de côté. .....259

Figure A - 7. Carte gravimétrique résiduelle régionale pour une densité de 2.50 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie et des stations gravimétriques GeoNE. La carte résiduelle est la carte Bouguer à laquelle a été soustraite la tendance régionale. Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'études. Voir texte Chapitre II pour le détail.....259

Figure A - 8. Carte gravimétrique résiduel de la Chaux-de-Fonds extraite de la carte résiduelle régionale (Figure A - 7). Cette résiduelle a été obtenu en soustrayant une tendance régionale (Figure A - 6) a la carte d'anomalies de Bouguer pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$ (Figure A - 5). Sur cette carte résiduelle, une seconde tendance régionale orienté (SO -

NE) est clairement visible. Voir Chapitre IV pour plus de détails. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....260

Figure A - 9. Carte gravimétrique résiduel du Crêt-du-Locle extraite de la carte résiduelle régionale (Figure A - 7). Cette résiduelle a été obtenu en soustrayant une tendance régionale (Figure A - 6) a la carte d'anomalies de Bouguer pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$ (Figure A - 5). Sur cette carte résiduelle, une seconde tendance régionale orienté (SO - NE) est clairement visible. Voir Chapitre IV pour plus de détails. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). .....261

Figure A - 10. Carte de la 2$^{ème}$ tendance gravimétrique régionale pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$, qui a été réalisée à partir d'un extrait de la carte d'anomalies résiduelles (Chapitre II, Figure II - 18) sur une région englobant la région de La Chaux-de-Fonds- Le Locle. La surface utilisée pour le calcul fait 8km par 7km de côté. Voir Chapitre IV pour plus de détails. .....262

Figure A - 11. Carte gravimétrique de l'effet des sédiments post-Mésozoïque modélisé en 3D de la région de la Chaux-de-Fonds. .....262

Figure A - 12. Carte gravimétrique résiduelle après stripping dépôts post-Mésozoïques pour la zone de la Chaux-de-Fonds dans la région de Le Locle – La chaux-de-Fonds. La carte a été obtenue en soustrayant la carte de la 2$^{ème}$ résiduelle (Cahpitre IV, Figure IV - 8) par la carte de l'effet des sédiments post-Mésozoïques (Figure A - 11). Voir Chapitre II pour la description de la méthode du Stripping. .....263

Figure A - 13. Carte gravimétrique de l'effet des sédiments post-Mésozoïque modélisé en 3D de la région du Crêt-du-Locle. .....263

Figure A - 14. Carte gravimétrique résiduelle après stripping dépôts post-Mésozoïques pour la zone du Crêt-du-Locle dans la région de Le Locle – La chaux-de-Fonds. La carte a été obtenue en soustrayant la carte de la 2$^{ème}$ résiduelle (Chapitre IV, Figure IV - 9) par la carte de l'effet des sédiments post-Mésozoïques (Figure A - 13). Voir Chapitre II pour la description de la méthode du Stripping. .....264

Figure A - 15. Carte gravimétrique de l'effet des sédiments post-Mésozoïque modélisé en 3D de la région de Cottendart. .....265

Figure A - 16. Carte gravimétrique résiduelle après stripping dépôts post-Mésozoïques pour la région d'Auvernier - Boudry. La carte a été obtenue en soustrayant la carte résiduelle (Chapitre V, Figure V - 3) par la carte de l'effet des sédiments post-Mésozoïques (Figure A - 15). Voir Chapitre II pour la description de la méthode du Stripping. .....265

# Annexes

## 1. Annexes Chapitre II

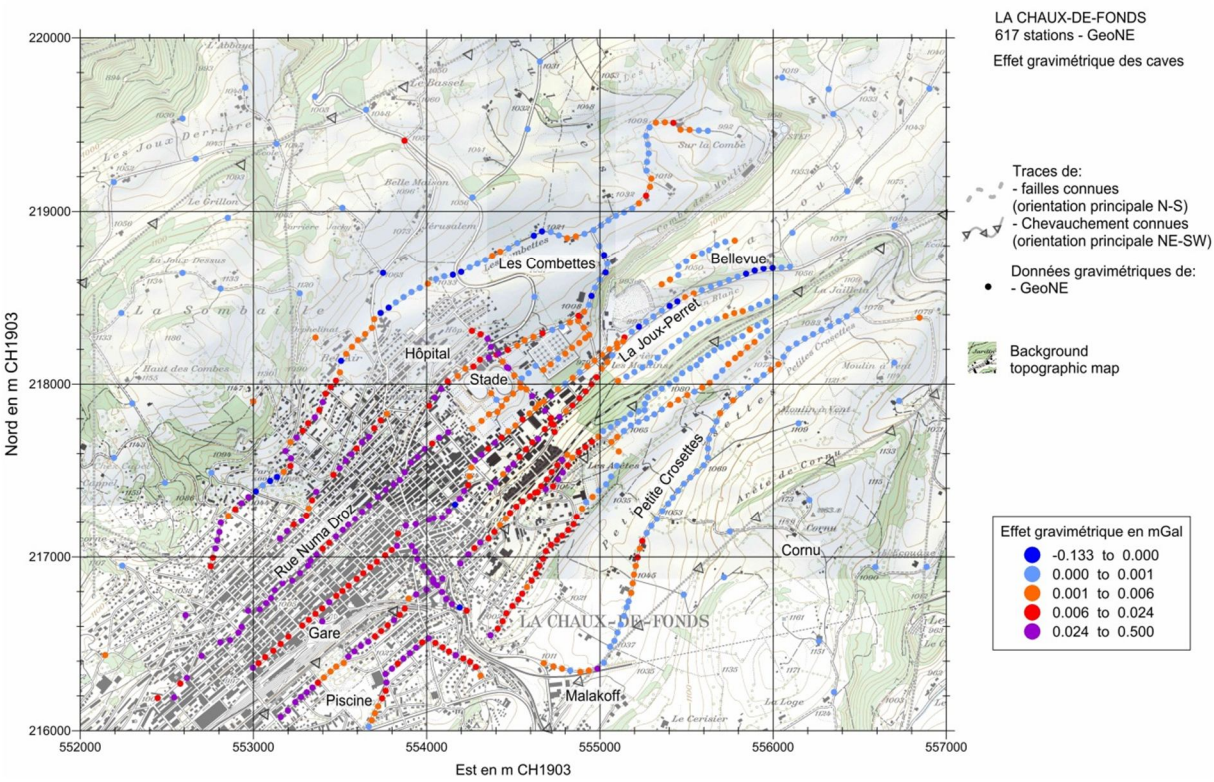



*Figure A - 1. Carte des effets des caves sur la région de la Chaux-de-Fonds. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011). Voir texte Chapitre II pour le détail.*

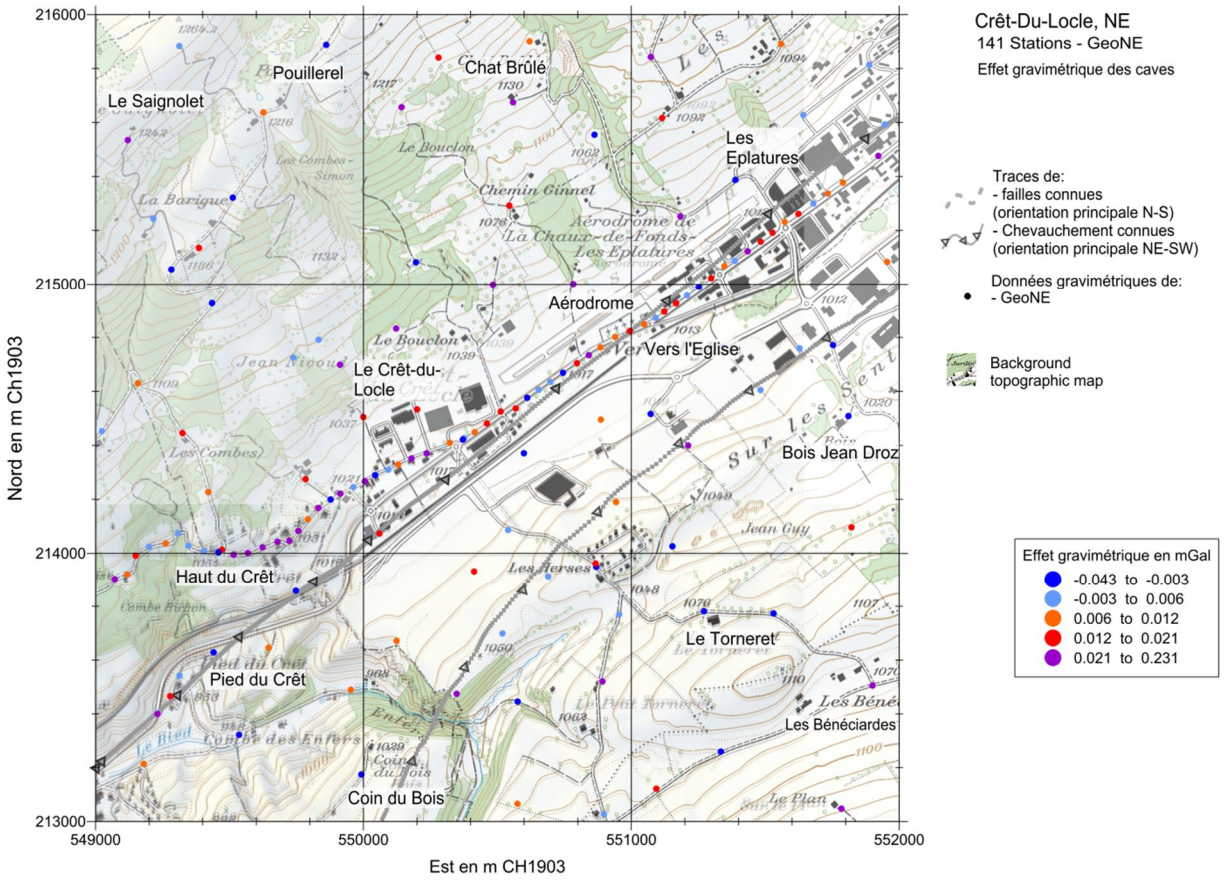



*Figure A - 2. Carte des effets des caves sur la région du Crêt-du-Locle. Voir texte Chapitre II pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

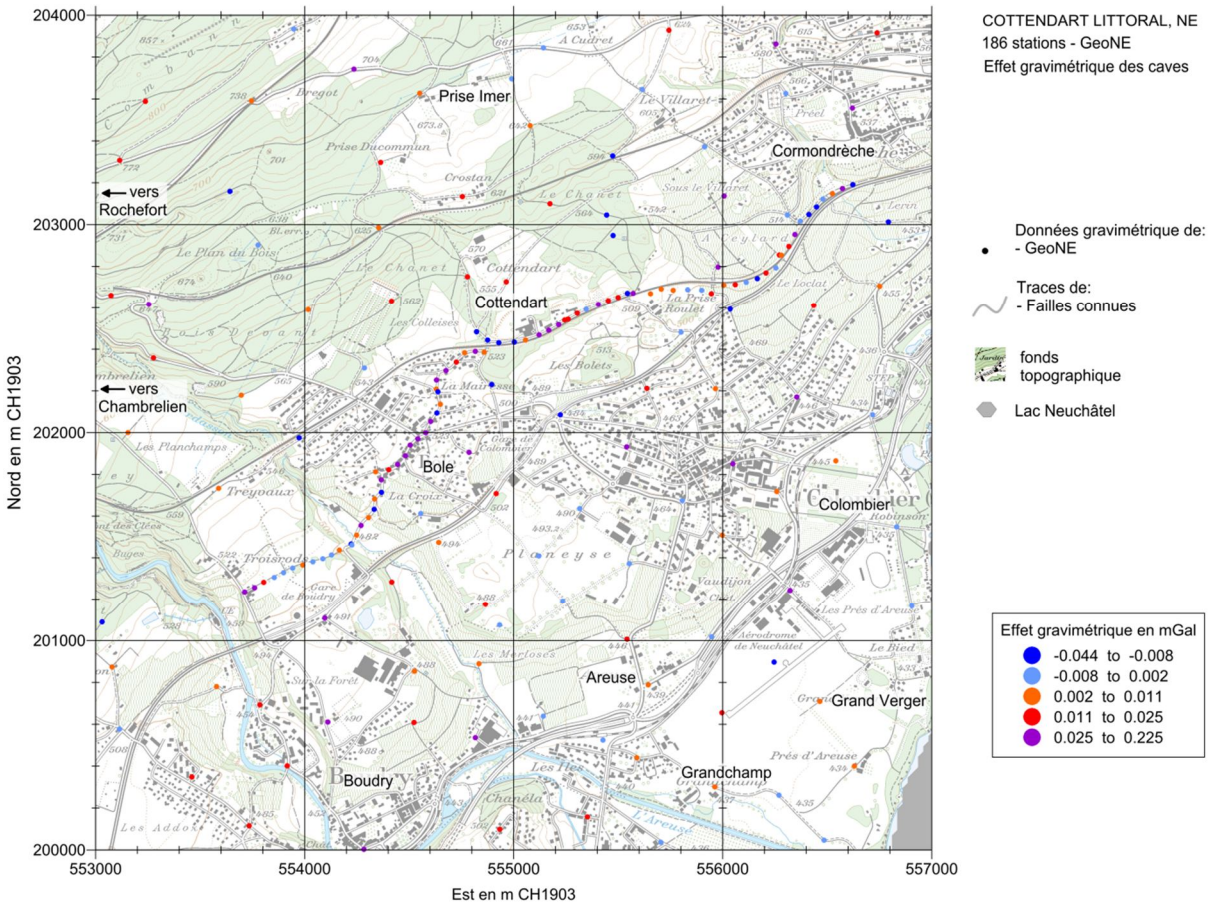



*Figure A - 3. Carte des effets des caves sur la région de Bole et Cottendart. Voir texte Chapitre II pour le détail. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

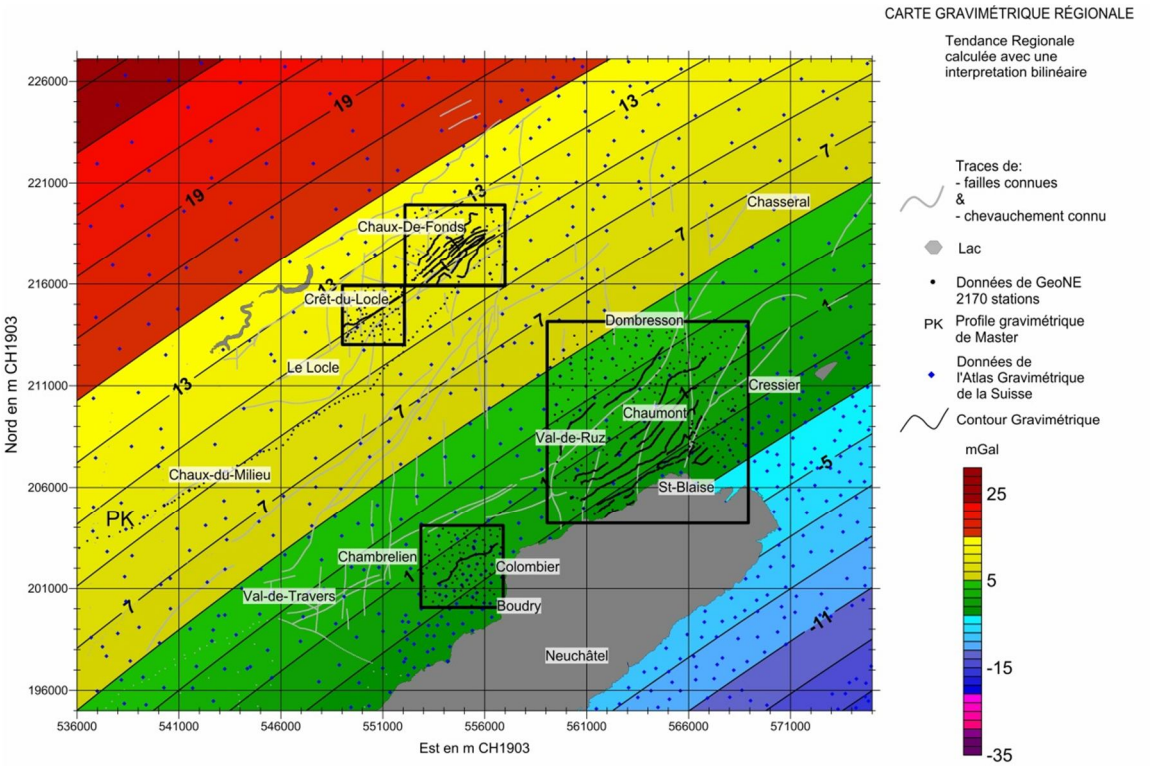



*Figure A - 4. Carte des tendances gravimétriques régionales pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$, qui a été réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie [Klingele & Olivier, 1980] pour une région de 45km de côté. Voir texte Chapitre II pour le détail.*

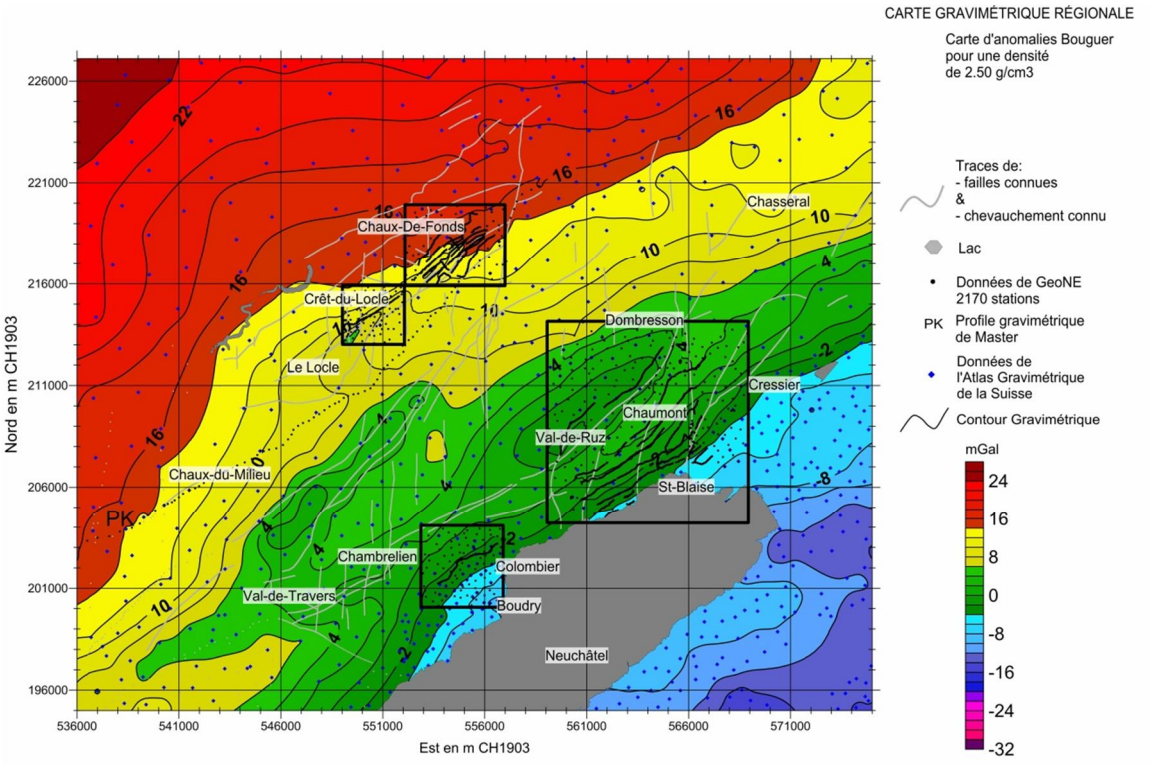



*Figure A - 5. Carte Bouguer Régionale pour une densité de 2.50 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie [Klingele & Olivier, 1980].et des stations gravimétriques Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'études. GeoNE. Voir texte Chapitre II pour le détail.*

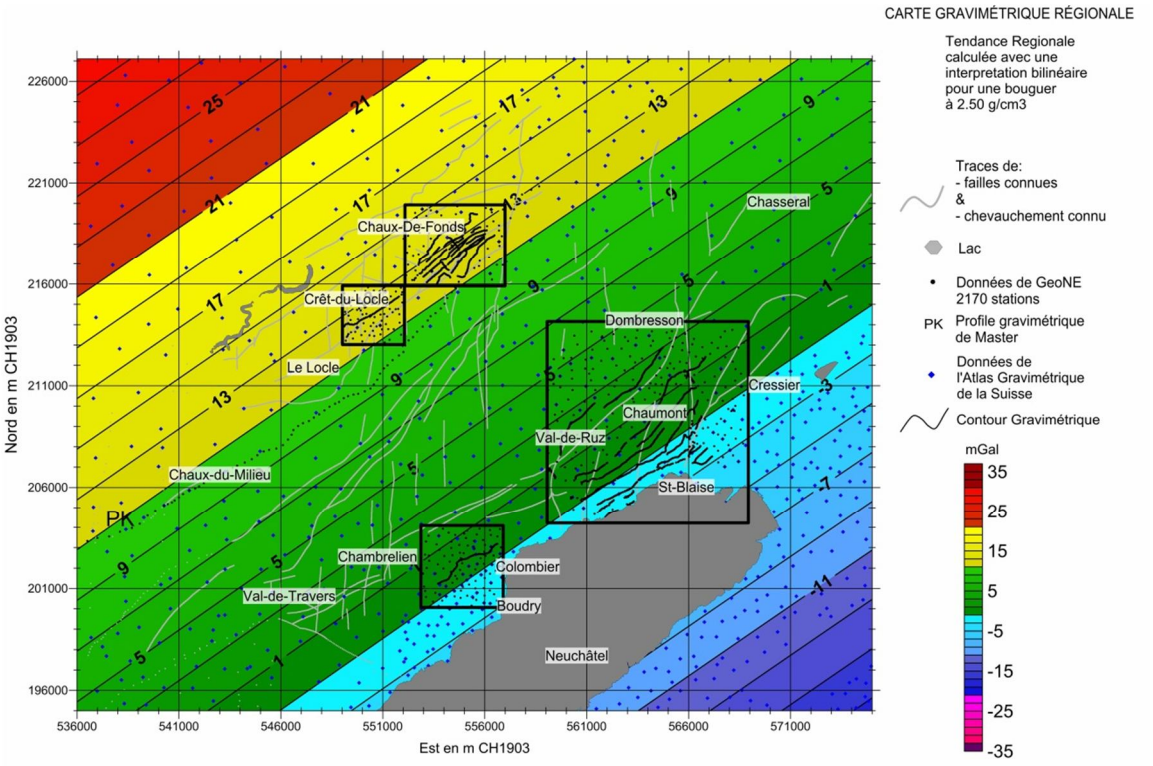



*Figure A - 6. Carte des tendances gravimétriques régionales pour une densité de 2.50 g.cm$^{-3}$, qui a été réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie [Klingele & Olivier, 1980] pour une région de 45km de côté.*

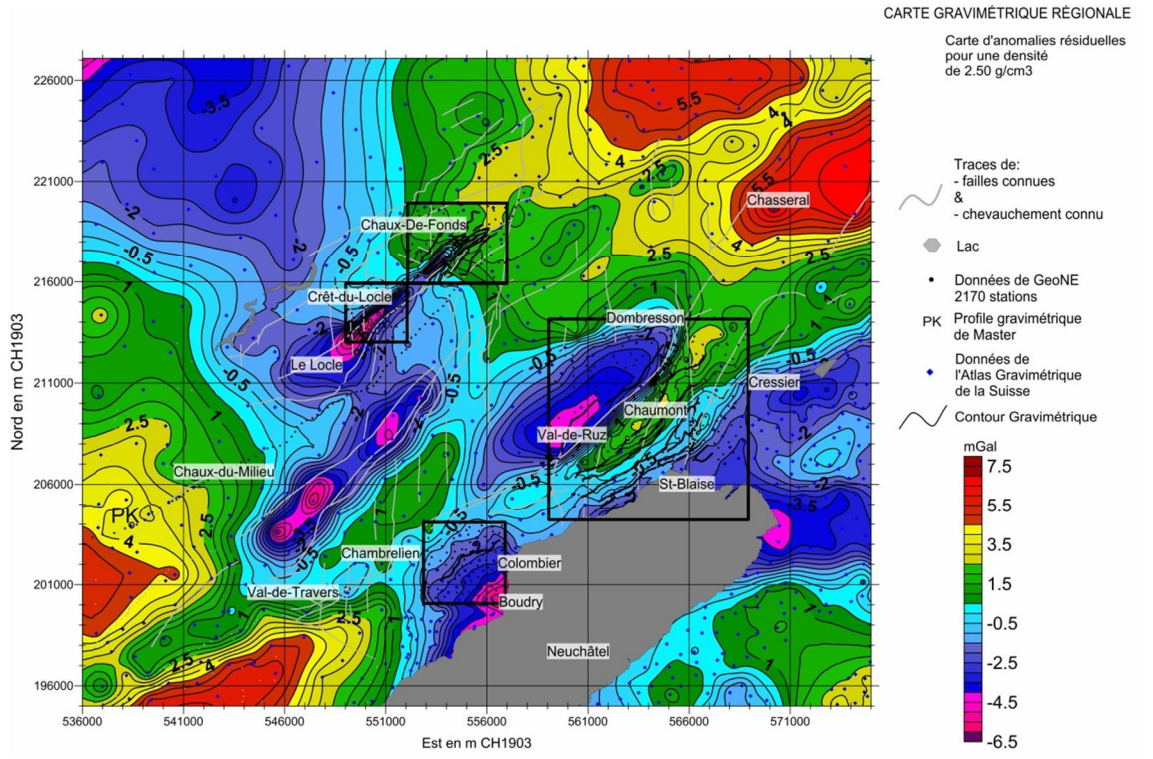



*Figure A - 7. Carte gravimétrique résiduelle régionale pour une densité de 2.50 g.cm$^{-3}$. Carte réalisée à partir des données des stations de l'Atlas Suisse de Gravimétrie et des stations gravimétriques GeoNE. La carte résiduelle est la carte Bouguer à laquelle a été soustraite la tendance régionale. Chaque quadrilatère représente une des quatre régions d'études. Voir texte Chapitre II pour le détail.*

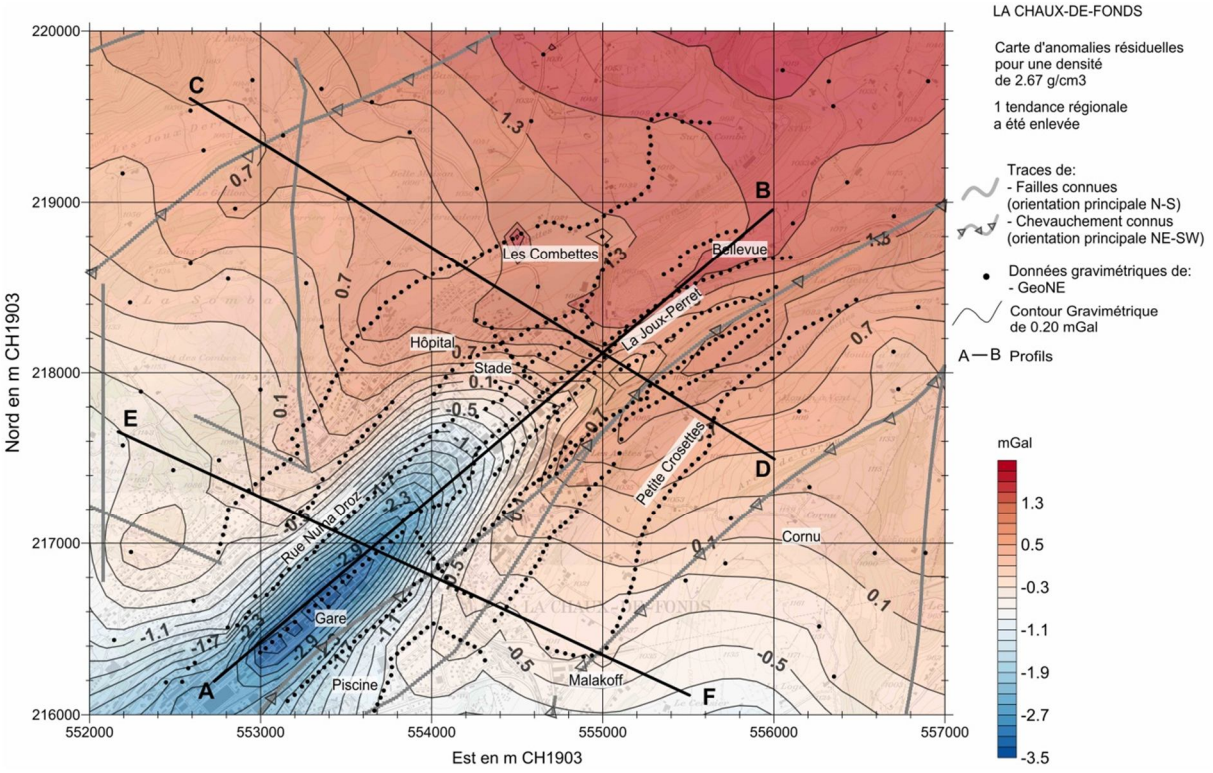



*Figure A - 8. Carte gravimétrique résiduel de la Chaux-de-Fonds extraite de la carte résiduelle régionale (Figure A - 7). Cette résiduelle a été obtenu en soustrayant une tendance régionale (Figure A - 6) a la carte d'anomalies de Bouguer pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$ (Figure A - 5). Sur cette carte résiduelle, une seconde tendance régionale orienté (SO - NE) est clairement visible. Voir Chapitre IV pour plus de détails. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

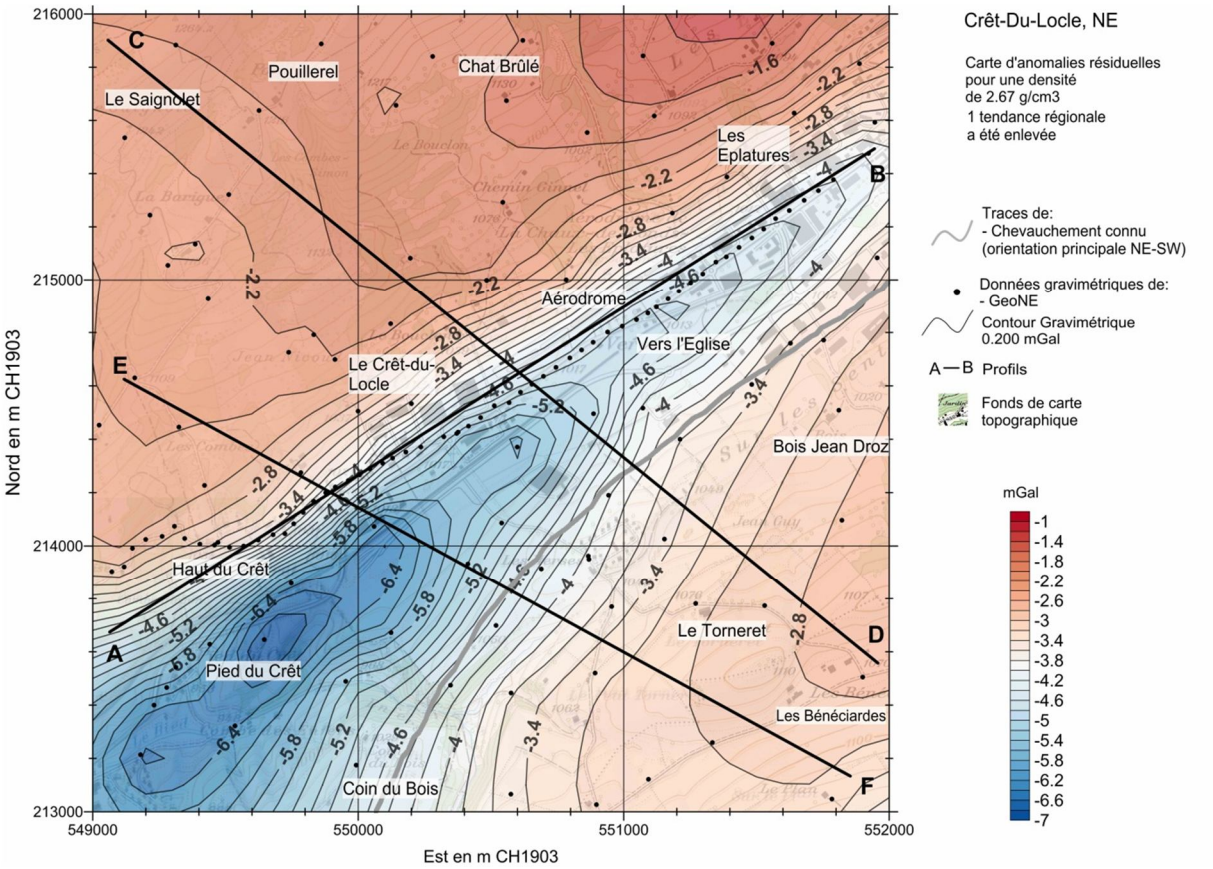



*Figure A - 9. Carte gravimétrique résiduel du Crêt-du-Locle extraite de la carte résiduelle régionale (Figure A - 7). Cette résiduelle a été obtenu en soustrayant une tendance régionale (Figure A - 6) a la carte d'anomalies de Bouguer pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$ (Figure A - 5). Sur cette carte résiduelle, une seconde tendance régionale orienté (SO - NE) est clairement visible. Voir Chapitre IV pour plus de détails. Fond de carte topographique obtenu auprès du SITN (25V-Swisstopo 2011).*

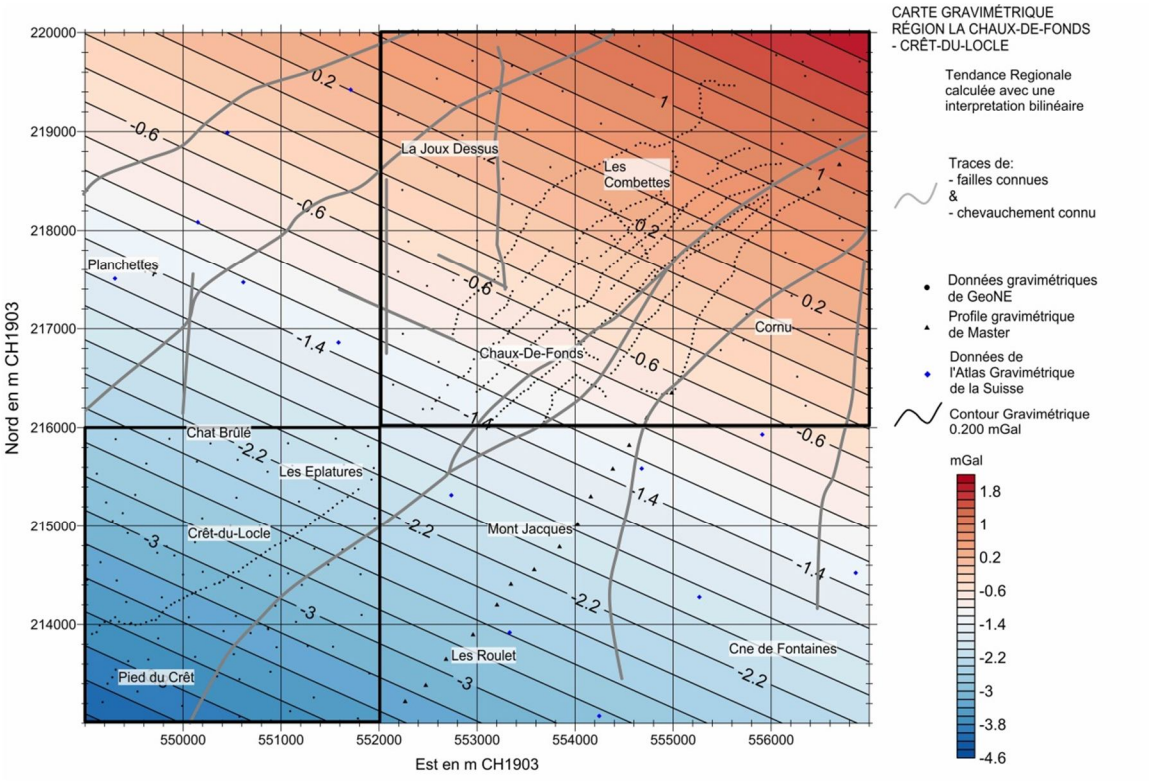



*Figure A - 10. Carte de la 2ème tendance gravimétrique régionale pour une densité de 2.67 g.cm$^{-3}$, qui a été réalisée à partir d'un extrait de la carte d'anomalies résiduelles (Chapitre II, Figure II - 18) sur une région englobant la région de La Chaux-de-Fonds- Le Locle. La surface utilisée pour le calcul fait 8km par 7km de côté. Voir Chapitre IV pour plus de détails.*

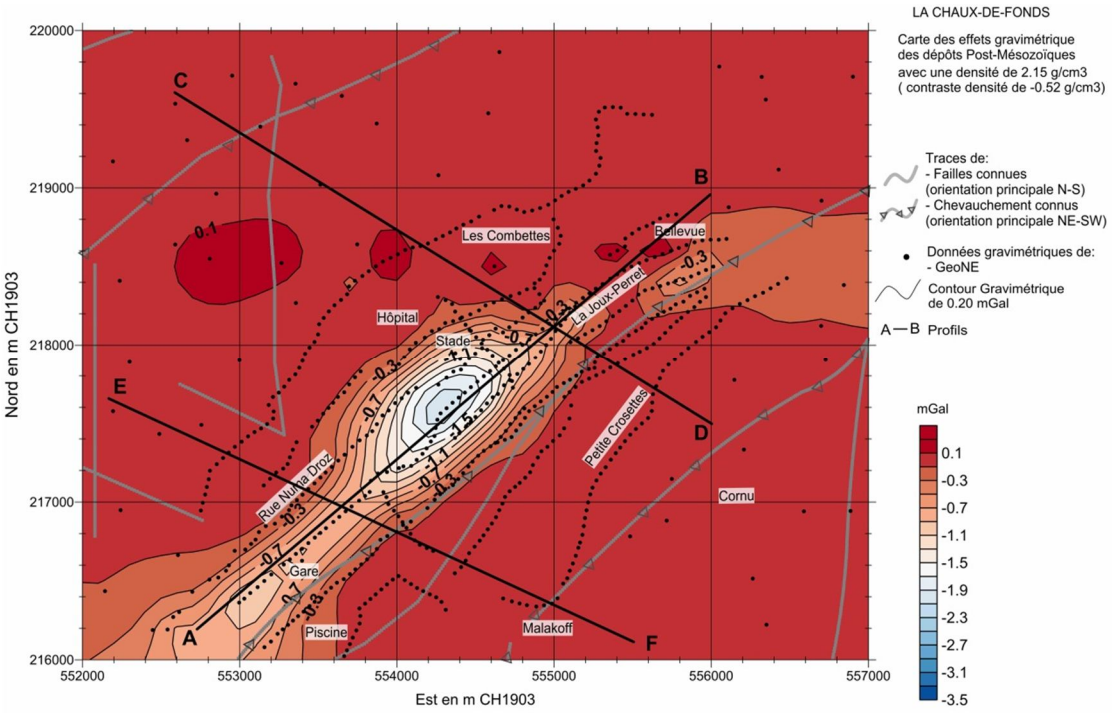



*Figure A - 11. Carte gravimétrique de l'effet des sédiments post-Mésozoïque modélisé en 3D de la région de la Chaux-de-Fonds.*

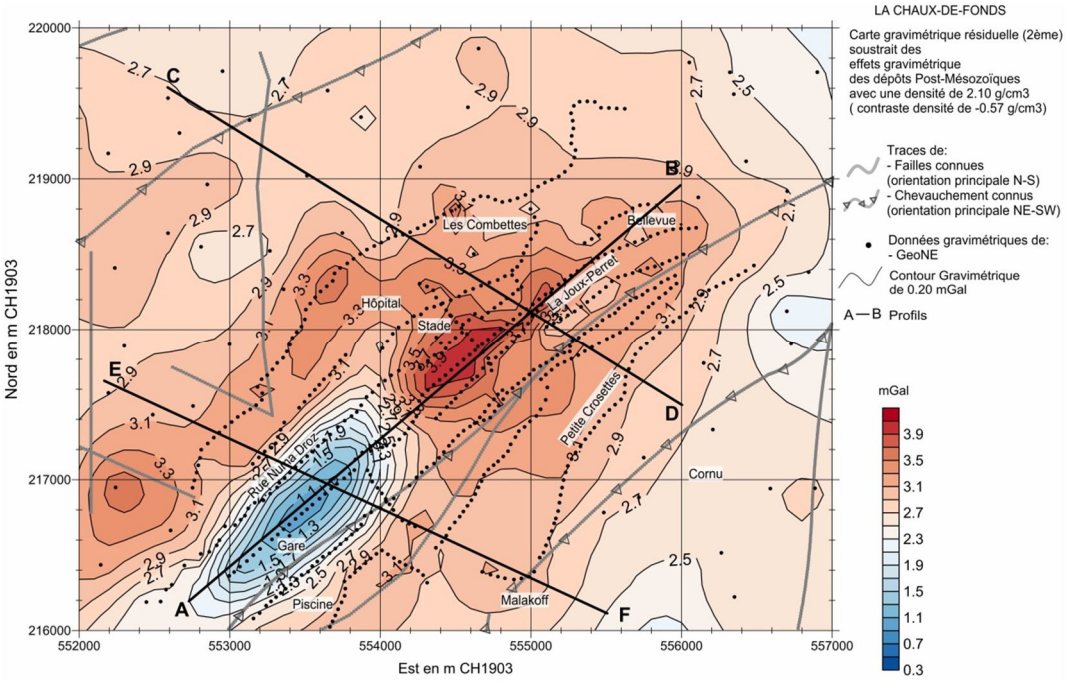



*Figure A - 12. Carte gravimétrique résiduelle après stripping dépôts post-Mésozoïques pour la zone de la Chaux-de-Fonds dans la région de Le Locle – La chaux-de-Fonds. La carte a été obtenue en soustrayant la carte de la 2ème résiduelle (Cahpitre IV, Figure IV - 8) par la carte de l'effet des sédiments post-Mésozoïques (Figure A - 11). Voir Chapitre II pour la description de la méthode du Stripping.*

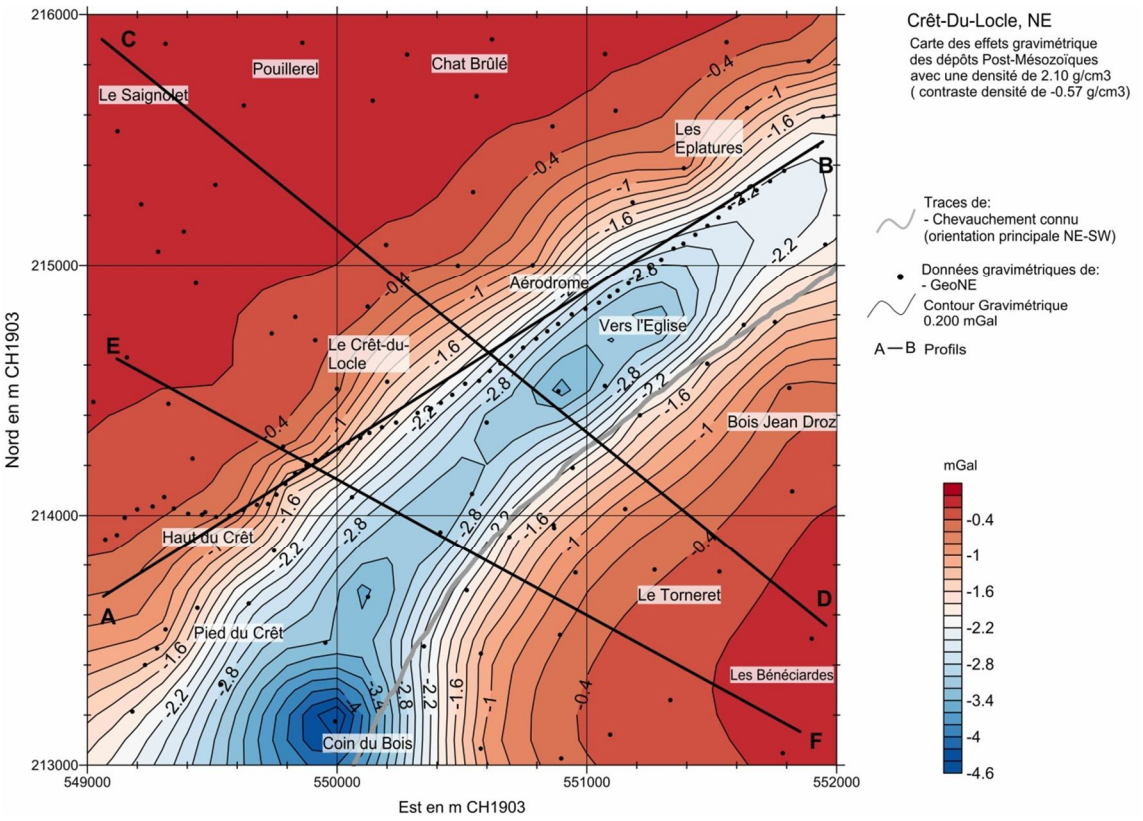



*Figure A - 13. Carte gravimétrique de l'effet des sédiments post-Mésozoïque modélisé en 3D de la région du Crêt-du-Locle.*

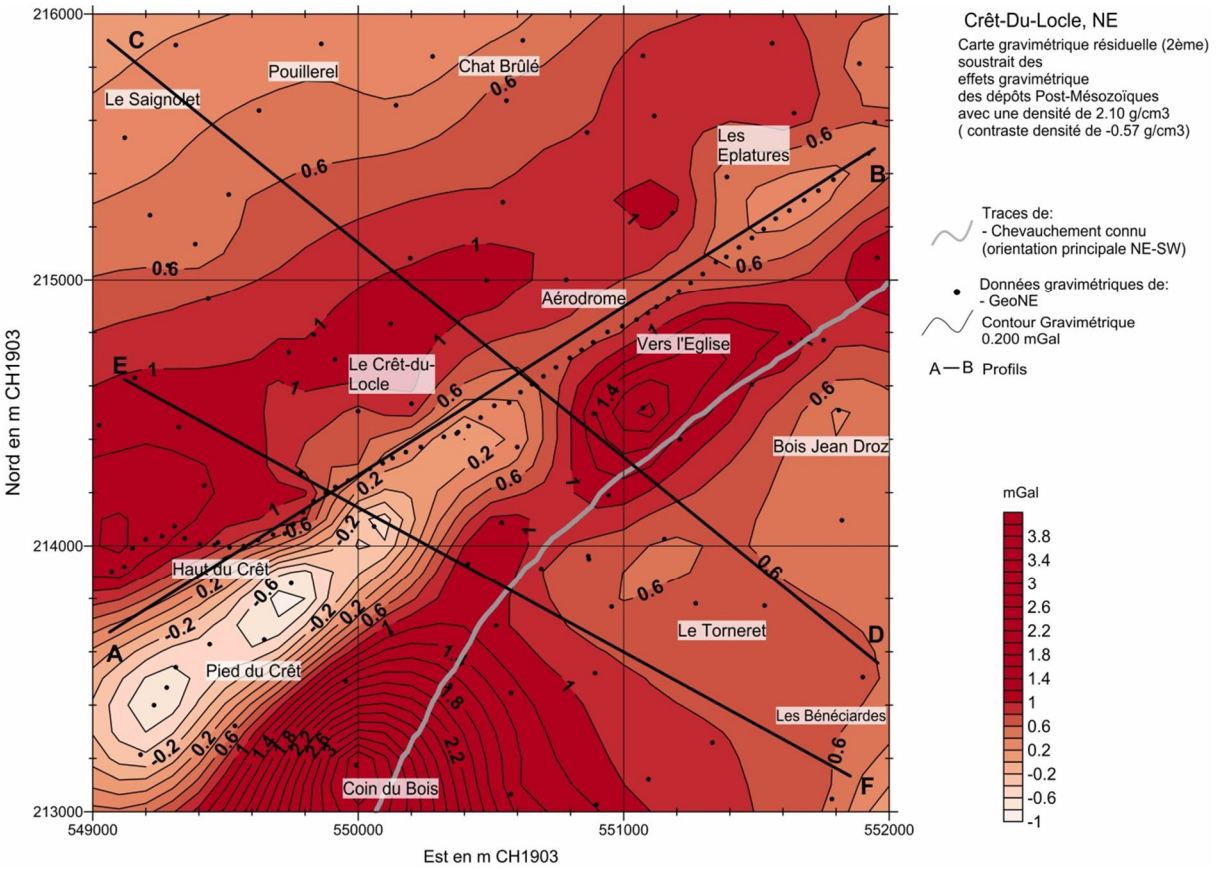



*Figure A - 14. Carte gravimétrique résiduelle après stripping dépôts post-Mésozoïques pour la zone du Crêt-du-Locle dans la région de Le Locle – La chaux-de-Fonds. La carte a été obtenue en soustrayant la carte de la 2ème résiduelle (Chapitre IV, Figure IV - 9) par la carte de l'effet des sédiments post-Mésozoïques (Figure A - 13). Voir Chapitre II pour la description de la méthode du Stripping.*

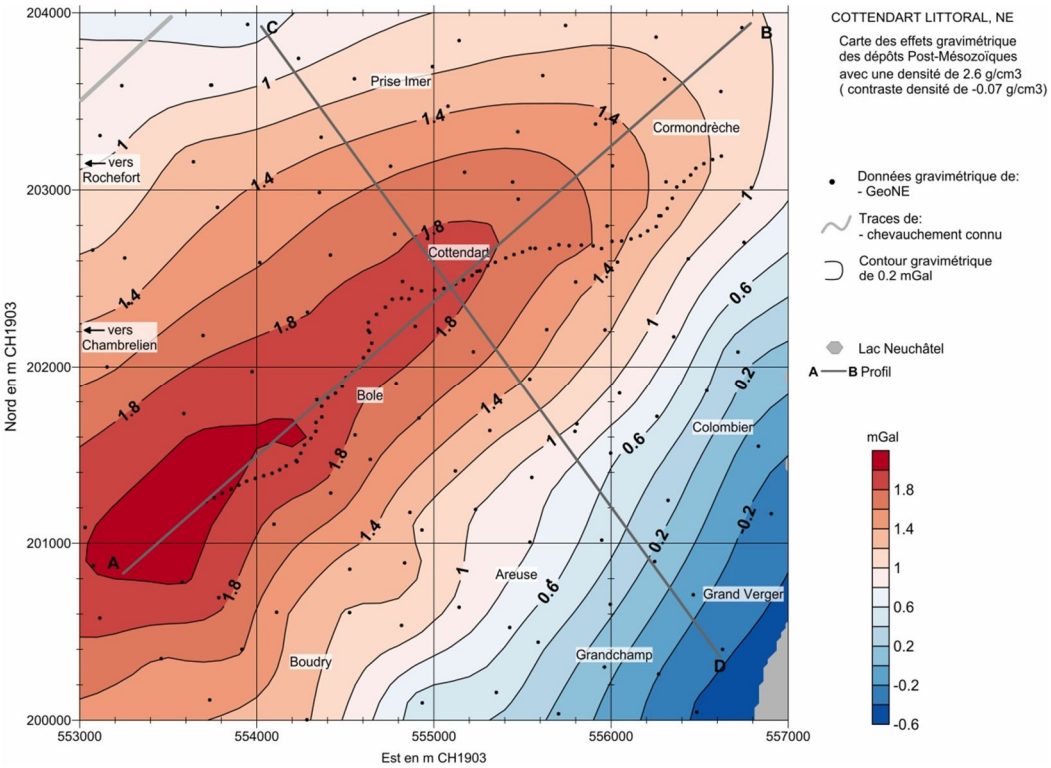



*Figure A - 15. Carte gravimétrique de l'effet des sédiments post-Mésozoïque modélisé en 3D de la région de Cottendart.*

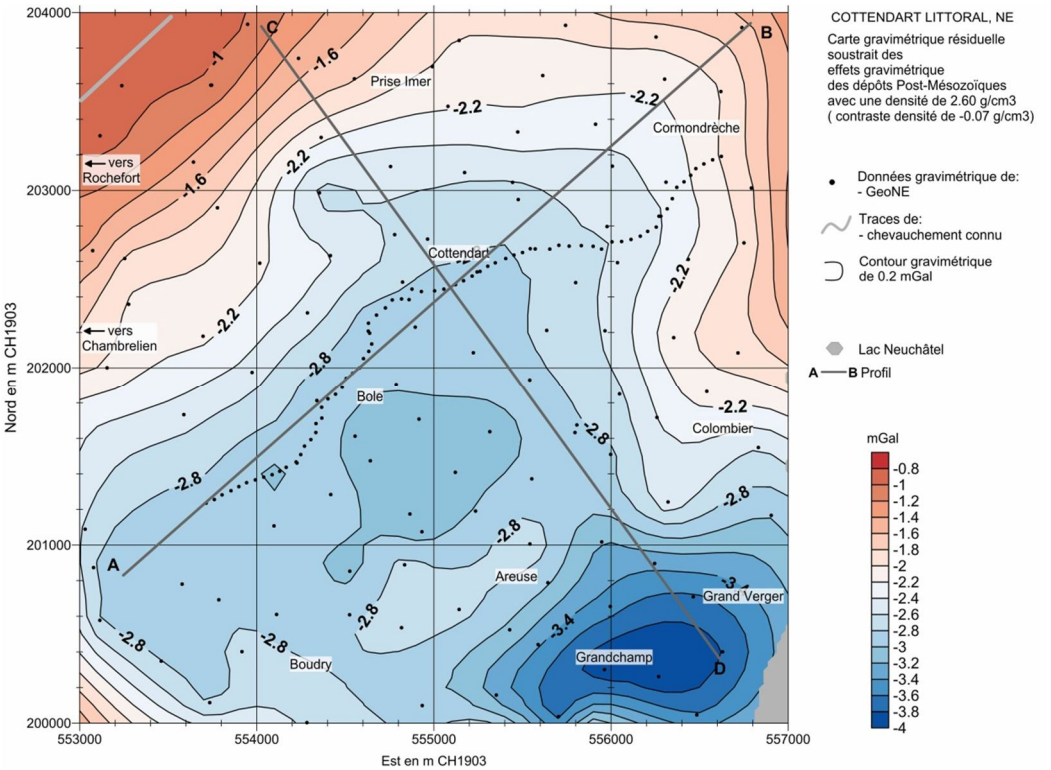



*Figure A - 16. Carte gravimétrique résiduelle après stripping dépôts post-Mésozoïques pour la région d'Auvernier - Boudry. La carte a été obtenue en soustrayant la carte résiduelle (Chapitre V, Figure V - 3) par la carte de l'effet des sédiments post-Mésozoïques (Figure A - 15). Voir Chapitre II pour la description de la méthode du Stripping.*

# 2. Annexes Chapitre VII

SWISS LABORATORY
FOR GEOTHERMICS - **CREGE**
CHYN, Université de Neuchâtel
rue Emile–Argand 11
CH-2000 Neuchâtel, Suisse
Tél. +41 32 718 2600
Fax. +41 32 718 2603
www.crege.ch

**SCIENTIFIC COMMITTEE**

**R E P O R T  O F  2nd  M E E T I N G**

**Neuchâtel, 12 March 2012**

## Profile of Swiss Laboratory for Geothermics (CREGE)

The Centre of Hydrogeology and Geothermics at the University of Neuchâtel hosts currently the only chair in Geothermics of Switzerland. With the installation of this chair in 2009 and appointing Prof. Dr. Eva Schill, a reorganization of the different groups interested in geothermics at Neuchâtel took place. Today the chair leads the Swiss Laboratory for Geothermics (CREGE), which is part of a centre of competence, including an association of 54 small and large industry partners, as well as public institutions, and the Swiss Geothermal Network (SGnet). This competence centre also includes the Geothermal Investment Centre (GIC), which operates as a link between the canton of Neuchâtel, the EPFL, and as foreseen also between industrial partners and the Laboratory or other research organizations in Switzerland.

## Mandate and Composition of the Scientific Committee

The Scientific Committee (SC) includes about 10 internationally renowned scientists in the different fields of geothermics. The fields may vary also according to the activity of the Laboratory. Experts in geophysical exploration, geothermal resource evaluation, numerical modelling, drilling and testing were foreseen. The SC members are selected for 3 years. According to the outcome of CREGE the members of the committee are asked to review scientific reports and publications. CREGE organizes yearly a scientific meeting for the SC, where the current program and work results are presented. In addition, new scientific developments from other groups shall be discussed with the SC.

In particular, the aims of the SC of CREGE are:

- Assistance to the head of the Swiss Laboratory for Geothermics regarding decisions on the scientific orientation of the research group;
- Assistance in the acquisition of new competences and in the improvement of scientific know-how;
- Assistance in the quality control of the scientific outcome of CREGE.

The current SC composition is the following:

| Member | Title | Affiliation | e-mail |
|---|---|---|---|
| Fausto Batini | Dr. | Magma Energy Italia, Siena/I | fbatini@magmaenergycorp.com |
| Ingvar Fridleifsson | Dr. | UNU Reykjavik/IS | ibf@os.is |
| Johann Goldbrunner | Prof. | Universität Graz/A | goldbrunner@geoteam.at |
| Roland Horne | Prof. | Stanford University, Palo Alto/USA | horne@stanford.edu |
| Thomas Kohl* | Prof. | KIT Karlsruhe/D | thomas.kohl@kit.edu |
| John Lund | Prof. | GHC Klamath Falls/USA | john.lund@oit.edu |
| Hans-Björn Püttgen | Prof. | EPF Lausanne/CH | hans.puttgen@epfl.ch |
| Peter Rose | Prof. | EGI Salt Lake City/USA | prose@egi.utah.edu |
| Philipp Rudolf von Rohr | Prof. | ETH Zurich/CH | vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch |
| Ladislaus Rybach (Chair) | Prof. | ETH Zürich/CH | rybach@ig.erdw.ethz.ch |

*) Changed to Guest status in July 2011

## Time, Venue, and Attendance of the 2nd SC Meeting

The 2nd SC meeting has been arranged and organized by CREGE for Monday, 12 March 2012 in Neuchâtel, Switzerland. The schedule is given in **Attachment I**. SC participants present were F. Batini, I. Fridleifsson, J. Goldbrunner, R. Horne, J. Lund, P. Rose, Ph. Rudolf von Rohr, L. Rybach. M. Capezzali represented H.-B. Püttgen; T. Kohl participated as Guest. The meeting included an excursion to specific sites of karstic hydrogeology in the Jura and to the Asphalt Mine of Travers, Val-de-Travers.

## Presentations

The SC members were supplied by the document *Laboratory for Geothermics - CREGE: Description, structure and strategy 2012 – Report for Scientific Committee advising the Laboratory for Geothermics* (**Attachment II**). Prof. E. Schill and her team gave well prepared oral presentations; ample subsequent discussions followed. The Report as well as the Powerpoint presentation slides have been handed over on a CD to the SC members.

## Evaluation

Attachment II and the presentations document that Prof. Schill and her team successfully pursued and expanded their activities in research, teaching, technology transfer and various other tasks. 10 scientists work now in E. Schill's group. The many activities in research and teaching, outlined at the 1st Meeting of the Scientific Committee in May 2011, are progressing well.
Prof. E. Schill prepared, upon request of the SC, a SWOT analysis (see details below).

*Research and technical development*
The focus of CREGE remains on geophysical exploration techniques and on hydrogeochemistry.

Five MSc theses were completed in 2011; currently 3 MSc theses are ongoing.

Reports of newly completed or ongoing PhD theses were presented orally by
- L. Guglielmetti: Thermal spring systems in Argenterra massif/Italy
- P. Baillieux: Permeable structures in the Upper Rhine Graben
- P. Altwegg: Finding high porosity/permeability zones by gravity & seismics (St.Gallen area)

Two new PhD projects were started:
- Deep structure/exploration in Northern Switzerland (G. di Tomaso)
- Deep structure in Geneva area (N. Clerc)

Four new M.Sc. studies have also been started:
- Heat flow mapping in N. Switzerland (Basel – Lower Aare Valley – St.Gallen)
- Gravity study of Permocarbon through boundary faults
- Regional stress field in N. Switzerland
- Soil gases (He and $CO_2$) in geothermal exploration

The central activity and the primary emphasis was clearly on GeoNE ("Development of deep geothermal projects in the Canton of Neuchâtel"). The project works aim at clarifiying the possibilities to find thermal waters with sufficient temperature and productivity, first for space heating and later possibly for power generation. Dr. F. Negro presented the current status.

Detailed structural geologic, hydrogeologic, geophysical studies (especially gravity and thermal modelling) have been carried out by CREGE. They revealed that many basic data are lacking, especially results from deep drilling. Nevertheless various potentially interesting sites have been identified for future drilling. The SC was asked to check the "Structure du Rapport Final technique de GeoNE" as well as to provide recommendations. These can be found further below.

In contrast to the 1st SC meeting no new research activities/results were presented this year by the geochemical members of Prof. Schill's group. Apparently the envisioned extension of the geochemical code FRACHEM needs more time.

*Education*

The Chair of Geothermics is successfully managing the following modules for geothermal training in Switzerland:

- Master of Science in Hydrogeology and Geothermics (4 semesters; number of credit points in the European Credit Transfer System ECTS: 120)
- Training course in Deep Geothermal Systems: Certificate of Advanced Studies (CAS) DEEGEOSYS (4 one-week modules, separated by a two-month break; 10 ECTS)

Regarding the role of the CREGE in the field of teaching (Chapter 1.3 of the CREGE Report), and in particular in the "Training Course in Deep Geothermal Systems" it can be stated that the SC unanimously judges the newly established Training Course to be a great success, unique in Europe. In particular, SC member Dr. I. Fridleifsson (Director, United Nations University Geothermal Training Programme, Reykjavik/Iceland) states: *"The CAS DEEGEOSYS Training Programme has the potential of becoming very valuable to the countries of Europe. With the theoretical and practical experience of Switzerland, Germany and France (to name but a few European countries), CREGE is in an ideal position to give specialized training in the exploration and development of Deep Geothermal Systems. None of the international geothermal schools is as well located to give this kind of training to European professionals with MSc or PhD degrees."*

*Transfer of technology*

This activity is an obligation to acknowledge the financial support of CREGE by the Canton of Neuchâtel. Two GeoNE workshops are being organized for consulting and engineering companies:

1) Workshop GeoNE-1 "Sampling and physico-chemical measurements of geothermal fluids" (Lavey–les –Bains, 18 April 2012)
2) Workshop GeoNE-2 "Approach of 3D geological modeling with GeoModeller" (Neuchâtel, 26-27 April 2012)

*Additional tasks*

CREGE is also leading a number of activities including the public institutions
- Swiss Geothermal Network (SGnet)
- Geothermal Investment Centre (GIC/SÀRL).

Various further activities are pursued like cooperation with industrial and institutional partners in Switzerland; several public geothermal projects (in cantons Fribourg, St.Gallen, Thurgau and Zurich) profited from the know-how and expertise of CREGE in 2011.
Participation in international activities abroad like the European Energy Research Alliance EERA and the International Partnership for Geothermal Technology IPGT is ongoing.

*Visibility*
The CREGE is very visible both on the national and international scene. In Switzerland, CREGE and its members are frequently present in conferences and in the media. On the international scene, the congress and workshop contributions of CREGE (publications) are remarkable, e.g. at Stanford Geothermal Workshop, GeoTHERM Offenburg, International Geothermal Conference Freiburg, EUG Vienna. There should be an attempt to increase the number of publications in peer-reviewed international journals with high impact factor.

Prof. E. Schill is active in several committees in Switzerland and abroad:
- Mitglied der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission
- Member of the Management Board of EERA Joint Program Geothermal Energy JPGE
- Rapporteur of the European Commission for „Education and Training" (SET Plan)
- International Partnership for Geothermal Technology IPGT: Swiss convener for High Temperature Tools, Participant in the Modeling and Exploration Technologies groups
- Strategischer Beirat RWE Innogy
- Board of the Forschungskolleg Physik der Erde FKPE
- Member of International Heat Flow Commission

## Meeting of SC members

During the afternoon of 12 March 2012 the SC members discussed about the presentations and agreed on the procedure and schedule for completing the 2012 Report. Prof. E. Schill was asked to submit a SWOT analysis (submitted on 26 April 2012).

The SC members also discussed the GeoNE follow-up, especially for slimhole drilling. They also pointed out the need for continuing the integration of Magnetotellurics into the coupled code FracTURE.

Prof. E. Schill mentioned the importance of Dr. Yassine Abdelfettah's innovative research in accurate gravity data correction and 3D forward modeling. In order to continue his research acDr. Abdelfettah should be transferred to another position at CREGE. The SC is fully supporting this request.

## Comments and Recommendations

### *1. Comments and recommendations of the SC on GeoNE*

*These comments and recommendations are based on the presentations and documents provided at the 2nd SC meeting; they summarize individual comments of SC members.*

The purpose of GeoNE ("Development of deep geothermal projects in the Canton of Neuchâtel") is to evaluate the deep geothermal possibilities of Canton Neuchâtel, primarily for hydrothermal resources. A more detailed consideration of the petrothermal option (mainly EGS) is foreseen for later. The project aims at clarifying the potential for finding thermal waters with sufficient temperature and productivity in the subsurface of Canton Neuchâtel, first for space heating and later for possible power generation. Prof. E. Schill and her team performed target-oriented and detailed structural geologic, hydrogeologic, geophysical studies (especially gravity and thermal modelling): these delineated the major structural/tectonic and thermal units in 3D. At the same

time it became evident that many basic data are badly lacking, especially results of deep drilling (no boreholes deeper than 450 m exist within the entire territory of Canton Neuchâtel!).

The main question in further development is whether geothermal fluids can be found within the territory of Canton Neuchâtel in commercially interesting quantities at accessible depths. On the basis of the available results a few prospective zones could be identified (Littoral of Neuchâtel and area of La Chaux de Fonds - Le Locle). At the present state of knowledge the probabilities for success cannot be quantified.

Only drilling and testing can prove the presence of economically viable geothermal resources in Canton Neuchâtel. In view of the lack of vital data (porosities, permeabilities, temperatures, fluid chemistries) at relevant depth ranges the SC is the opinion that the GeoNE follow-up should be carefully planned in order to avoid risky deep drilling.

Before drilling with diameters suitable for high production rates further investigations should be carried out. With geophysics a combination of gravity and seismics should be pursued, along the approach of the PhD thesis of P. Altwegg, aiming to locate porous/permeable zones; magnetotelluric measurements with a distant background reference to reduce noise could also be performed to further delineate prospective zones. Slimhole drilling to provide badly needed hydrogeologic and geothermal data as well as calibration opportunities should first be considered. In locating such drillsites -in the aforementioned zones of interest- also the promixity of potential users should be taken into account.

In the follow-up, an analysis to evaluate the social and economic sustainability of geothermal as a function of the potential use of the resource (i.e. electricity generation and/or direct use of the heat) will be indispensable.

Concern arose in the SC that Prof. E. Schill and her team should not be left alone with this drilling task and the preceding seismic survey, thus the effort should be carried jointly with Cantonal and industrial entities.

The SC also considered the document "Structure du Rapport Final technique de GeoNE". The envisioned structure is appropriate for describing the performed activities and the results obtained. It also includes an activity that goes beyond the primary task of GeoNE (evaluation of the deep geothermal possibilities of Canton Neuchâtel, primarily for hydrothermal resources): "Transfer de Technologie". The occasion of GeoNE enabled in this case the combination of project works with technology transfer but in the future also other options should be envisaged.

The SC is looking forward to receiving the Rapport Final, especially the "3 rapports independents" about the target areas Neauchâtel-St.Blaise, La Chaux-de-Fonds, and Cottendar. Also the chapter "Potentiel de EGS" will be interesting.

***2. Further comments and recommendations***

***SWOT***

E. Schill prepared, upon request of the SC, a SWOT analysis of CREGE (received on 26 March 2012, revised on 16 April 2012):

# Objectives of CREGE for the next 5 years:

1) Leading research group for geothermal exploration (geological/geophysical/geochemical) in Switzerland with a focus on geothermal projects in central Europe (hydrothermal, EGS):

    a. Definition of 3 major research objectives from the experience in commercial projects (see "Schill et al., 2012. Laboratory for Geothermics – CREGE: Description, structure and strategy – 2012: Report for Scientific committee advising the Laboratory for Geothermics)

    b. Focus on research projects:

        i. Objective 1: 1 successful award for larger project out of the 3 submitted proposals:

            1. Marie Curie Initial Training Networks (ITN), Call: FP7-PEOPLE-2012-ITN: RESERVOIR Research and education platform for Enhanced Geothermal Reservoir: A technical bridge to industrial application (Schill et al., 2012, about 4 Mio €)

            2. National Research Program, NRP : Energie géothermique : production combinée d'électricité et de chaleur - Flexibilité vis-à-vis des variations de la demande thermique et électrique et de celles de la production éolienne et solaire (Schill et al., about 6 Mio CHF)

            3. National Competence Center of Research NCCR: GeoEnergy: Enabling the efficient and safe use of the subsurface for the energy sector (Rudolf von Rohr et al., 2012, about 10-12 Mio €)

        ii. Objective 2: 1 successful award for 1 Ph.D. candidate by the Swiss National Science Foundation

    c. Increase of the scientific output:

        i. Thesis Baillieux: 3 papers to be submitted before the end of July

        ii. Thesis Guglielmetti: 2 papers to be submitted before the end of June

        iii. Thesis Altwegg: 1 paper to be submitted before the end of July

        iv. For future Ph.D. students: 1 paper per year and at least 3 papers per dissertation

        v. Seminar on writing scientific publications (and preparing presentations) for Ph.D. students (and Masters students)

| | | |
|---|---|---|
| Internal attributes of the organization | Strengths:<br>• Broad experience available from commercial projects<br>• Broad competency in geology, geophysics, geodynamics and geochemistry providing for integrated approaches<br>• Publishable scientific results from commercial projects (possibility to publish)<br>• Access to most geothermal wells in Switzerland and southern Germany<br>• Well-equipped lab and field equipment plus technician<br>• Strong competency for software and technical development in Geophysics (doctoral, post-doc level) | Weaknesses<br>• No permanent position for Geochemistry / no development in Geochemistry<br>• PhD students are not educated in Geothermics in their master's degree<br>• Little to no scientific output from experienced researchers<br>• No training on presentation and publication for PhD students (no PhD education program) |
| External attributes of the environment | Opportunities:<br>• Broad experience from commercial projects<br>• Access to the geothermal wells in Switzerland and southern Germany, Soultz<br>• Excellent international collaboration | Threats:<br>• Very limited access to international journals as a result of university policy<br>• No permanent position other than professor for the geothermal group; three-year limit for post-docs<br>• Few possibilities of exchange with other groups in the field of Gravity (however, the scientific community is active in Geodesy)<br>• Sometimes limited possibilities to publish results from commercial-project research |

2) Internationally recognized education program with a focus on geothermal projects in central Europe (hydrothermal, EGS)

   a. Improvement of the Certificate of Advanced Studies "Deep Geothermal Systems DEEGEOSYS" (CAS) according to the evaluation by the participants

   b. Restructuring of the M.S. program

| | Strengths/Opportunities: | Weaknesses/Threats: |
|---|---|---|
| Internal attributes of the organization | • Experience in commercial projects allows for the definition of the CAS needs<br>• Broad scientific background (geology/geophysics/ geochemistry/modelin g) >> broad coverage of topics related to geothermal in the Master | • Little interest from students in the geothermal program due to small market in Switzerland<br>PhD students are not educated in Geothermics at the M.S. degree level, leading to limited contribution to teaching |
| External attributes of the environment | • Excellent international collaboration >> invited lecturers<br>• Large demand for continuous education in Europe due to missing education at master's degree level<br>• External sponsoring available | • Teaching hours for the CAS are not recognized as teaching duty of the professorship by university<br>• No permanent position to guarantee continuation<br>• Advertisement and administration require a lot of time |

The SWOT analysis objectively assesses the current situation at CREGE, describes key issues in research and education as well as in commercial projects, and it points out the advantages, disadvantages in these fields of activity. Improvements to follow are not requested in a SWOT analysis but will soon be necessary.

From the SC view it will be decisive for CREGE how the relationship of the new hydrogeology professorship and the geothermal professorship will develop. The SC has been informed that the University of Neuchatel appointed lately the successor of Professor Zwahlen. Professor Zwahlen was interested and knowledgeable in geothermics (he succeded L. Rybach in the leadership of the Swiss Geothermal Research Team within the EU Project Soultz, was instrumental in establishing the new Chair in Geothermics at CHYN, supported E. Schill especially in the start-up phase of her manifold activities at CHYN but also later).

Hopefully the relationship of the two chairs will be far more an O (opportunity) than a T (threat). Actually strong synergies could develop, not only for the benefits of CREGE but also for the educational environment in hydrogeology and geothermics both on the Swiss and European scene. The SC is hoping for good prospects.

## Outlook of CREGE

The current plans of CREGE for future activities include

*Research*
Project proposals have been submitted to

- Marie Curie Initial Training Networks (ITN), Call: FP7-PEOPLE-2012-ITN: Reservoir Research and Education Platform for Enhanced Geothermal Reservoir: A technical bridge to industrial application (Schill et al., 2012, about 4 Mio €)

- National Research Program, NRP : Energie géothermique : production combinée d'électricité et de chaleur - Flexibilité vis-à-vis des variations de la demande thermique et électrique et de celles de la production éolienne et solaire (Schill et al., about 6 Mio CHF)

- National Competence Center of Research NCCR: GeoEnergy: Enabling the efficient and safe use of the subsurface for the energy sector (Rudolf von Rohr et al., 2012, about 10-12 Mio €)

The ongoing PhD thesis works are continuing; new MSc theses have started.

Scientific cooperation with the Universities of Geneva and Delft have been initiated for coupling geochemical and geomechanical codes.

The capabilities of the CREGE laboratory are expanded to enable porosity and permeability determinations on rock samples (mainly from boreholes).

Publications describing the results of PhD/MSc theses will be submitted to peer-reviewed journals.

*Education*
Together with the new Chair of Hydrogeology the Master Program in Hydrogeology and Geothermics will be revised, especially to benefit from new field equipment and software.

It is foreseen to organize a second CAS "Training Course in Deep Geothermal Systems".

The continuation of CREGE's activities in Technology Transfer, especially to small and medium enterprises, is also foreseen.

*Industry collaboration*
The continuation of collaboration with Axpo AG is ongoing; a new collaboration partner is SIG Geneva.

## Summary of SC Position

The SC emphasizes that what has been achieved since the inauguration of the Chair in Geothermics at CHYN is impressive, the strategy established and implemented is still highly suitable and appropriate. CREGE should continue to further strengthen the core competences of CREGE in geophysics (mainly in exploration) and hydrogeochemistry (reservoir and production issues), possibly with a linkage of the two. We further recommend emphasis of reserach into Enhanced Geothermal Systems (EGS) since this topic is the future scientific challenge in geothermal research.

The SC made special comments and recommendations about ProjectGeoNE, see above. After completing existing obligations towards the Canton Neuchâtel its possible continuation should be carefully designed, by sharing the efforts with Cantonal and industrial entities. Hopefully the submitted project proposals to Marie Curie ITN, NRP and NCCR of SNF (or at least some of them) will be successful.

The SWOT indicated several needs for action: in this sense a follow-up should further strengthen strengths, reduce weaknesses, realize opportunities and reduce/eliminate threats.

The SC sincerely hopes that the new chair of hydrogeology (with the successor of Prof. F. Zwahlen) will create mutually beneficial synergies with the chair of Prof. E. Schill.

By these means the CREGE can further solidify its position and role of a high standing Geothermal Competence Center in research, education, and technology transfer along with the activities in project development and industrial cooperation, both nationally and internationally.

## Excursion

On Tuesday, 12 March several SC members participated in a field trip to specific sites of specific karstic hydrogeology in the Jura. The highlight was a visit of the "Asphalt Mine of Travers, Val-de-Travers". Prof. Schill and the members of her team also participated; during the excursion the SC members had the opportunity to discuss in details various aspects of the ongoing works and projects.

## Next meeting

The next SC meeting is planned to take place again in Neuchâtel, preferably in spring 2013. A one-day meeting is again foreseen, followed by an optional excursion.

## Acknowledgement

The SC gratefully thanks Prof. Eva Schill and her dedicated team for the excellent organisation of the 2nd SC meeting, especially for all arrangements (travel, accommodation, excursion). It will be the pleasure of the SC to review the further activities of CREGE.