
*Formation postgrade en Gestion des ressources en eau
Hydrologie & Hydrogéologie*

Travail de diplôme

Cycle de spécialisation en hydrogéologie

Outil de décision et de quantification
du potentiel géothermique
pour l'implantation de
sondes géothermiques verticales

Région d'étude
Bulle – La Tour-de-Trême
Guin - Tavel

Bastien Colliard

Décembre 2004

CANTON DE FRIBOURG

DIRECTION DE L'ÉCONOMIE ET DE L'EMPLOI
SERVICE DES TRANSPORTS ET DE L'ÉNERGIE
SECTION ENERGIE

RAPPORT FINAL – JANVIER 2005

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg

ANNEXE

*Outil de décision et de quantification du potentiel géothermique pour
l'implantation de sondes géothermiques verticales*

Régions d'étude Bulle – La Tour-de-Trême et Guin – Tavel

Préparé par

Groupement PGF

Bastien Colliard, CHYN, Univ. de Neuchâtel

c/o Centre de Recherche en Géothermie (CREGE)
CHYN
Université de Neuchâtel
11 rue E.-Argand
2007 Neuchâtel

RESUME	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTES DES FIGURES	v
LISTES DES TABLEAUX	vi
1. INTRODUCTION	1
1.1 Cadre général - Définitions	1
1.1.1 Historique	1
1.1.2 Situation présente et future	2
1.2 Démarche de l'étude	2
1.2.1 Définition du mandat	2
1.2.2 Démarche générale	3
1.2.3 Buts de l'étude	3
1.2.4 Principales étapes de travail	4
1.2.5 Structure du rapport	4
1.2.6 Localisation des zones étudiées	5
1.3 Situation des sondes géothermiques verticales en Suisse et dans le canton de Fribourg	6
1.3.1 Bilan actuel sur le développement des sondes géothermiques	6
1.3.2 Statistiques et comparaisons	8
2. LES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES	10
2.1 Introduction	10
2.2 Principe	10
2.2.1 Le sol comme source de chaleur	11
2.2.2 Les types de roches et leurs paramètres	12
2.2.3 Propriétés thermiques des roches	13
2.3 Dimensionnement, puissance et énergie disponible	14
2.3.1 Dimension des sondes et zone d'influence	14
2.3.2 Nomogramme de dimensionnement	16
2.3.3 Distance à respecter entre sondes	16
2.3.4 Test de réponse thermique du terrain	17
2.4 Comportement à long terme	17
2.5 Impacts sur l'environnement	20
2.5.1 Risques directs	20
2.5.2 Risques indirects	20
2.6 Fonctionnement de la pompe à chaleur	21
3. ASPECTS LEGISLATIFS	23
3.1 Base de dimensionnement	23
3.2 Mesures de précaution et de sécurité	24
3.3 Prescriptions cantonales	24
4. CONTEXTE GEOLOGIQUE, STRUCTURAL ET HYDROGEOLOGIQUE DES ZONES ETUDIÉES	25
4.1 Introduction	25
4.2 Région Bulle et La Tour-de-Trême	26
4.2.1 Tectonique	26
4.2.2 Géologie	28
4.2.3 Hydrogéologie	33
4.3 Région Guin-Tavel	35
4.3.1 Géologie et tectonique	35
4.3.2 Hydrogéologie	35
5. IMPLANTATION DES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES	37
5.1 Introduction et principe de base	37
5.2 Critères d'implantation	38

Autre outil d'aide à la décision : l'organigramme de décision	38
5.3 Evaluation du potentiel thermique	40
5.3.1 Données lithologiques	40
5.3.2 Conductivité thermique et puissance thermique de soutirage	41
5.3.3 Description du programme de calcul	44
5.3.4 Fiche d'information du forage	47
6. PRESENTATION DES RESULTATS	49
6.1 Région Bulle-La Tour-de-Trême	49
6.1.1 Evaluation du potentiel thermique	50
6.1.2 Cartes des contraintes liées aux eaux souterraines et à l'affectation des terrains	52
6.2 Région Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)	54
6.2.1 Evaluation du potentiel thermique	55
6.2.2 Cartes des contraintes liées aux eaux souterraines et à l'affectation des terrains	58
6.3 Interprétation des résultats	59
6.3.1 Région Bulle-La Tour-de-Trême	60
6.3.2 Région Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)	60
7. DISCUSSION ET CONCLUSION	61
7.1 Autres démarches	61
7.2 Conclusion de l'étude	62
7.3 Recommandations	63
7.3.1 Demande d'autorisation	63
7.3.2 Protocole de forage	63
7.4 Synthèse et perspectives	66
Perspectives à l'échelle du canton	67
8. BIBLIOGRAPHIE	68
Références sur les sondes géothermiques verticales	68
Références géologiques et hydrogéologiques	69
Références sur internet	70
Cartes et plans utilisés dans 'ArcView'	71
Bases légales consultées	71
LISTE DES ANNEXES	72
Annexe IA : Levés lithologiques (échelle 1:500)	73
Annexe IB : Levés lithologiques (échelle 1:500)	74
Annexe IC : Levés lithologiques (échelle 1:500)	75
Annexe ID : Levés lithologiques (échelle 1:500)	76
Annexe II : Symboles et Unités	77
Annexe III : Liste des agents réfrigérants et des liquides caloporteurs	78
Annexe IV : Conductivité thermique des sols argileux et limoneux	79
Annexe V : Détermination de la chaleur spécifique et capacité calorifique volumique d'un terrain meuble par une méthode simple	80
Annexe VI : Outil d'aide au dimensionnement – Nomogramme	81
Annexe VII : Légende carte hydrogéologique-Perméabilités, feuille Sarine	83
Annexe VIII : Légende carte hydrogéologique-Symboles, feuille Sarine	84
Annexe IX : Extrait de la base de données générales	85
Annexe X : Extrait de la base de données lithologiques	86
Annexe XI : Table de conversion : Conductivité thermique-Puissance de soutirage	87
Annexe XII : CD-ROM	88
LEXIQUE	89

RESUME

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un mandat du Service des transports et de l'énergie du canton de Fribourg visant à évaluer le potentiel géothermique du canton. Les buts de cette étude sont d'une part, la réalisation d'une carte multiparamètres, comme outil d'aide à la décision d'implantation et à la gestion des sondes géothermiques verticales (SGV), et d'autre part, la création d'un programme de calcul permettant d'évaluer la puissance thermique spécifique comme outil de quantification du potentiel géothermique régional et d'aide au dimensionnement des SGV. L'application de ces outils s'est limitée aux deux zones d'études : Bulle-La Tour-de-Trême et Guin-Tavel (Düdingen-Tafers).

Le système d'information géographique (SIG) tient compte des critères géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, permettant d'apprécier les caractéristiques du milieu où pourraient être implantées des SGV, et les impacts qu'auraient de telles installations sur les eaux souterraines. A ces paramètres viennent s'ajouter les lois et règlements visant à protéger les captages et les eaux souterraines.

Le programme de calcul créé vise à estimer le potentiel géothermique selon la lithologie rencontrée ainsi que le degré de saturation de chaque formation (horizon) composant le levé lithologique. Une base de données lithologiques a pu être conçue à partir des logs de forages réalisés. Elle constitue une source d'information précieuse pour la planification et le dimensionnement des futures installations.

De manière générale, les valeurs de puissance thermique spécifique sont plus faibles pour le Quaternaire que pour la Molasse. En considérant l'hypothèse simplificatrice que toutes les formations sont dépourvues d'eau, le vecteur de recherche des zones thermiquement favorables est la cartographie des zones où l'épaisseur de Quaternaire est la plus faible. Les cartes d'évaluation du potentiel géothermique des deux zones étudiées sont validées selon des outils statistiques dont l'objectif est de réduire au maximum l'effet des variations spatiales des données. Une carte d'évaluation qualitative du potentiel géothermique a été réalisée pour chaque région d'étude selon l'épaisseur de Quaternaire. Les modèles que constituent ces cartes d'évaluation représentent une première phase de recherche. Une modélisation basée sur un modèle lithologique 3D permettrait d'estimer une valeur moyenne de conductivité thermique par faciès (Quaternaire, Molasse et éventuellement Ultrahelvétique) et pour une profondeur donnée. Ceci nécessiterait une étude de la variabilité spatiale des données à l'aide d'outils géostatistiques.

Ce travail réalisé dans le domaine de la géothermie basse énergie, et plus précisément dans l'optique de l'implantation de sondes géothermiques verticales est encore à un stade préliminaire. Le fort développement de ce type d'installations démontre l'intérêt grandissant porté à cette technologie. Or, celle-ci n'est pas dénuée de tout risque pour l'environnement et plus particulièrement pour les eaux souterraines. De plus, un certain nombre de questions quant à la durée de vie de ce type d'installations, l'impact d'une forte densité de sondes par unité de surface sont, à l'heure actuelle, en cours d'évaluation. L'assurance d'un développement harmonieux des sondes géothermiques verticales implique certaines recommandations, notamment le développement d'un protocole de forage qui contribuerait à la qualité des données, permettrait ainsi de faciliter la prise de décision en matière d'implantation, mais aussi d'améliorer le dimensionnement des sondes géothermiques verticales.

REMERCIEMENTS

J'exprime toute ma gratitude à tous ceux et celles qui ont contribué au bon déroulement de ce travail de diplôme de postgrade en hydrogéologie.

Mes remerciements s'adressent en premier lieu au Dr F.-D. Vuataz, du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel (CHYN), qui m'a fait confiance pour ce projet. Il a su diriger et encadrer mon travail avec beaucoup d'engagement. Sa grande disponibilité à tout instant accompagné d'un profond humanisme m'a permis de mener à bien ce travail.

Je remercie Monsieur F. Becker du Service de l'environnement du canton de Fribourg, pour m'avoir mis à disposition les données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur Marc Weidmann, géologue pour m'avoir fait partager ses précieuses connaissances géologiques sur les régions étudiées.

Je ne saurais terminer sans remercier mes ami-e-s de la volée postgrade 2003-2004 dont je garderai un très bon souvenir.

Une pensée émue pour la famille d'un ami qui nous a malheureusement quitté un soir d'été...

Finalement, un remerciement sincère sera dédié à mes parents ainsi qu'à ma très chère sœur qui ont su m'aider et m'encourager tout au long de ces années d'étude.

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1	: Cycle de vie des sources d'énergie	2
Figure 1.2	: Localisation des régions étudiées dans le canton de Fribourg.	5
Figure 1.3	: Localisation des SGV installées en Suisse par GRUNDAG AG	6
Figure 1.4	: Carte des isolignes de densité de flux de chaleur [mW/m ²] et localisation des forages de sondes géothermiques verticales dans le canton de Fribourg	6
Figure 1.5	: Carte des isolignes de densité de flux de chaleur [mW/m ²] en Suisse	7
Figure 1.6	: Développement du marché des pompes à chaleur et estimation pour 2004-2010.	7
Figure 1.7	: Evolution de la longueur totale des sondes géothermiques en Suisse.	8
Figure 1.8	: Production d'énergie thermique produite par sondes géothermiques en Suisse	8
Figure 1.9	: Répartition des types de pompes à chaleur vendues en Suisse	9
Figure 1.10	: Evolution du type de pompe à chaleur installée sur le canton de Fribourg	9
Figure 2.1	: Ressources géothermiques de faible profondeur-basse énergie	10
Figure 2.2	: Schéma d'une installation avec sonde géothermique verticale	10
Figure 2.3	: Variation de la conductivité thermique en fonction du poids spécifique apparent sec pour un sol sableux.	13
Figure 2.4	: Variation de la conductivité thermique en fonction du poids spécifique apparent sec pour un sol argilo-limoneux.	13
Figure 2.5	: Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour un sol argilo-limoneux.	13
Figure 2.6	: Vue et coupes d'une sonde de type doubleU	14
Figure 2.7	: Calcul de la zone d'influence d'une perturbation de la température	16
Figure 2.8	: Schéma du dispositif mobile utilisé lors du test de réponse	17
Figure 2.9	: Profils de température du sous-sol sur l'installation à Elgg, Suisse	18
Figure 2.10	: Distribution des températures du sous-sol sur l'installation d'Elgg en période hivernale	18
Figure 2.11	: Distribution des températures et refroidissement à long terme	19
Figure 2.12	: Variations des températures mesurées et modélisées à 50 m de profondeur	19
Figure 2.13	: Variations de la température après une production et une recharge de 30 ans chacune	19
Figure 2.14	: Fluide frigorigène et impact sur l'environnement	20
Figure 2.15	: Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur de type sol-eau.	21
Figure 4.1	: Esquisse géologique de la région de Bulle-La Tour-de-Trême	26
Figure 4.2	: Esquisse tectonique au 1 :200000 avec position du périmètre de la feuille Gruyères.	27
Figure 4.3	: Carte géologique au 1 :25000 de la région de Bulle-Tour-de-Trême	28
Figure 4.4	: Légende de la carte géologique au 1 :25000 de la région de Bulle-Tour-de-Trême	29
Figure 4.5	: Extrait de la carte hydrogéologique de la feuille Sarine au 1 :100000	34
Figure 4.6	: Profils hydrogéologiques synthétique du Plateau suisse	34
Figure 4.7	: Extrait carte hydrogéologique de la feuille Sarine au 1 :100000	36
Figure 5.1	: Structure du SIG et superposition des critères sélectionnés par couches (layers)	37
Figure 5.2	: Organigramme de décision pour l'implantation de sondes géothermiques	39
Figure 5.3	: Classification des catégories lithologiques	40
Figure 5.4	: Relation puissance thermique de soutirage-conductivité thermique.	41
Figure 5.5	: Puissances thermiques de soutirage en fonction de la conductibilité thermique du terrain.	42
Figure 5.6	: Extrait de la base de données »PARAM »	43
Figure 5.7	: Représentation de la fenêtre »Excel » du programme de calcul (exemple forage Bu_35)	44
Figure 5.8	: Levé lithologique Bu_35 informatisé (échelle 1:500 ; ici réduite)	45
Figure 5.9	: Extrait de la base de données lithologique de la commune de Bulle	46
Figure 5.10	: Représentation de la Fiche d'information du forage (exemple pour forage Bu_35)	47
Figure 5.11	: Etapes pour la requête de proximité à partir de la fiche d'information du forage.	48
Figure 6.1	: Localisation des SGV existantes dans le périmètre retenu de Bulle - La Tour-de-Trême	49
Figure 6.2	: Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : épaisseurs du Quaternaire	50
Figure 6.3	: Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : isolignes des épaisseurs du Quaternaire	51

Figure 6.4	: Cartes pour l'évaluation du potentiel thermique à partir de l'altitude du toit de la Molasse	51
Figure 6.5	: Carte de la puissance thermique spécifique installée [W/m]	52
Figure 6.6	: Carte des contraintes liées aux zones de protection des eaux souterraines et emplacement des SGV	53
Figure 6.7	: Carte d'affectation du sol	53
Figure 6.8	: Localisation des SGV existantes dans la région de Guin-Tavel	54
Figure 6.9	: Carte d'épaisseur du Quaternaire dans la région de Guin-Tavel	55
Figure 6.10	: Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : isolignes des épaisseurs du Quaternaire	56
Figure 6.11	: Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : altitude du toit de la Molasse	56
Figure 6.12	: Carte de la puissance thermique spécifique installée en [W/m]	57
Figure 6.13	: Cartes des zones de protection et d'affectation du sol	58
Figure 7.1	: Conductivité thermique moyenne à 150 m projetée sur la surface topographique	61
Figure 7.2	: Correspondance entre l'épaisseur de Quaternaire visible sur les logs de forage et la valeur de conductivité thermique moyenne à 150m de profondeur	62
Figure 7.3	: Présentation de la feuille « Excel » du formulaire de demande d'autorisation	64
Figure 7.4	: Présentation de la feuille « Excel » du protocole de forage. Exemple fictif d'un forage de 80 m de profondeur dans la région de Bulle	65
Figure 7.5	: Organigramme de synthèse des liaisons entre les différentes étapes traitées dans ce travail	66

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1.1	: Contribution des différentes sources d'énergie géothermique en Suisse, 1999	1
Tableau 2.1	: Grandeurs intervenant dans les phénomènes thermiques en régime transitoire	11
Tableau 2.2	: Conductivité thermique et capacité volumétrique de différents types de roche	12
Tableau 2.3	: Valeurs indicatives d'extraction de chaleur spécifique	15
Tableau 2.4	: Valeurs empiriques pour le «dimensionnement sommaire» d'une installation de sonde géothermique dans différentes roches	15
Tableau 3.1	: Base de dimensionnement* des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température	23
Tableau 4.1	: Subdivisions de la Molasse	25
Tableau 4.2	: Subdivisions stratigraphiques des terrains glaciaires et postglaciaires.	30
Tableau 4.3	: Domaines de perméabilité des roches cohérentes	33
Tableau 5.1	: Comparaison pour chaque commune des épaisseurs des trois grandes classes lithologiques définies	41
Tableau 6.1	: Comparaison pour chaque commune des puissances thermiques spécifiques extractibles [W/m]	59

1. INTRODUCTION

1.1 CADRE GÉNÉRAL - DÉFINITIONS

1.1.1 Historique

Les premières études qui relatent la possibilité de mettre en valeur la chaleur du sol par extraction diffusive ont été réalisées au début des années 1950 par E.B. Penrod de l'Université de Kentucky. En Suisse, c'est H. Grimm qui développa, au début des années 1970, un système de collecteurs horizontaux couplés à une pompe à chaleur. Le développement de ces systèmes fut favorisé par les crises pétrolières des années 1973 et 1978. Alors qu'il y a 20 ans, les ressources géothermiques n'étaient pratiquement pas exploitées, en 1996, la Suisse occupe le 3^e rang mondial en terme de puissance installée par habitant (40 W/hab). A ce jour, grâce au fort développement des sondes géothermiques combinées avec des pompes à chaleur, ce sont plus de 30000 installations. Notre pays présente aujourd'hui, la plus grande densité au monde de sondes géothermiques par unité de surface (1 installation pour 2 km²)! Le tableau ci-dessous mentionne la contribution des différentes sources d'énergie géothermiques en Suisse en 1999, exception faite des sources thermales :

Tableau 1.1: Contribution des différentes sources d'énergie géothermique en Suisse, 1999 (Rybach & al., 2000)

SYSTEME	PRODUCTION ANNUELLE (GWh)	PRODUCTION ANNUELLE (%)
Sondes géothermiques	362	58.60
Collecteurs enterrés horizontaux	32	5.20
Captage de l'eau souterraine	180	29.1
Pieux échangeurs (pieux de fondation)	3	0.49
Sondes géothermiques profondes	1	0.16
Aquifères profonds	36	5.80
Eau de tunnel	4	0.65
TOTAL	618	100

Le développement d'un marché pour ce type d'installation est conditionné par divers facteurs :

- Économique : augmentation générale du prix des autres sources d'énergie et diminution du prix du forage ;
- Technologique : augmentation des performances des pompes à chaleur et des techniques de forage ;
- Politique : incitation de la part des autorités (lois, aides financières,...) ;
- Ecologique : création de textes légaux visant à protéger l'environnement.

1.1.2 Situation présente et future

Ces dernières années, nous avons pris conscience que les réserves de combustibles ne sont pas inépuisables et le coût de leur production est toujours plus élevé. De plus, pour son approvisionnement énergétique, notre pays dépend de façon très importante des pays étrangers. Finalement, les répercussions néfastes sur l'environnement des combustibles fossiles sont de plus en plus importantes.

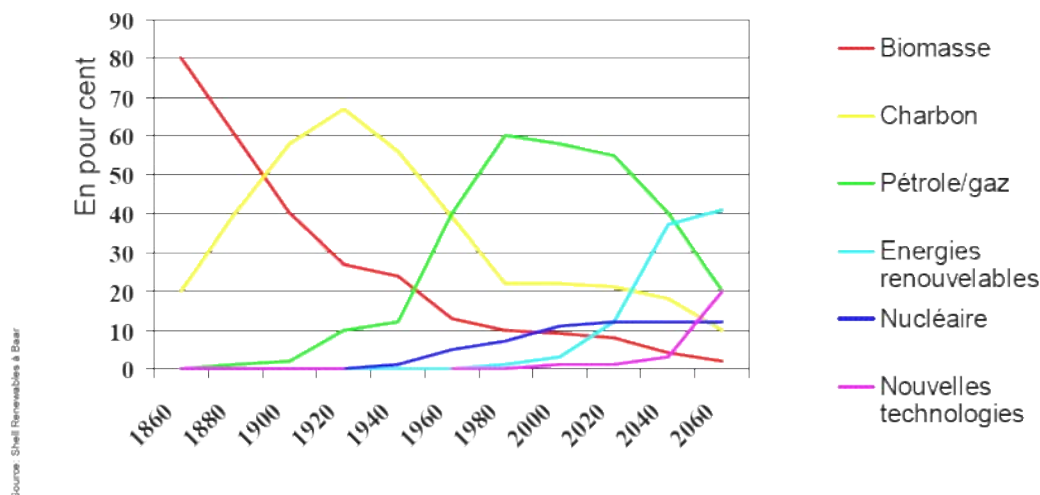


Figure 1.1 : Cycle de vie des sources d'énergie

Suite à ces prises de conscience, il est dans l'intérêt de chacun de chercher à diversifier et à décentraliser l'approvisionnement énergétique de notre pays. L'exploitation de la chaleur géothermique répond à ce choix et offre une perspective très encourageante en Suisse.

La géothermie est la seule parmi les sources d'énergie renouvelables (SER) qui soit disponible en permanence et qui ne nécessite pas de stockage intermédiaire. Le potentiel de la géothermie, compte tenu des profondeurs que permettent d'atteindre les technologies de forage actuelles, est pratiquement inépuisable.

Avec son programme Suisseénergie, la Confédération s'est fixée des objectifs de politique énergétique clairs, à savoir de réduire d'ici 2010 l'utilisation des combustibles fossiles et des émissions de CO₂ de 10%, ce qui représente une réduction des rejets de CO₂ d'un million de tonnes par année par rapport à 1990. De plus, les énergies renouvelables devront davantage participer à la production d'électricité et de chaleur. L'engouement pour la géothermie basse énergie en Suisse est depuis quelques années très prometteuse. La croissance annuelle du nombre d'installations est d'environ 10%.

1.2 DÉMARCHE DE L'ÉTUDE

1.2.1 Définition du mandat

Le Service des transports et de l'énergie du canton de Fribourg a mandaté le Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel (CHYN) en 2004, afin d'évaluer le potentiel géothermique du canton dans les quatre domaines suivants : les géostructures énergétiques, les ressources en aquifères profonds, la géothermie de haute énergie, ainsi que les conditions d'implantation des sondes géothermiques qui sont traitées dans ce travail de diplôme postgrade en hydrogéologie du CHYN.

1.2.2 Démarche générale

Le présent travail de diplôme contient les investigations effectuées sous mandat du Service des transports et de l'énergie du canton de Fribourg, concernant le chapitre traitant du potentiel et de l'implantation des sondes géothermiques verticales. En raison du nombre important d'installations existantes dans le canton, seules deux zones d'étude ont été choisies avec le mandataire.

Ce sont les régions de Bulle - La Tour-de-Trême et de Guin-Tavel: elles se différencient notamment par la géologie ainsi que par la densité de sondes installées et se caractérisent par une densité de population moyenne, une activité industrielle bien développée et de ce fait d'une demande en énergie élevée. L'exploitation de l'énergie géothermique dans le canton de Fribourg et particulièrement dans les deux régions choisies, a été grandissante au cours de ces dernières années. Cette situation est due à des conditions naturelles propices, telles que la géologie et des conditions climatiques appropriées pour l'implantation de sondes géothermiques.

Cet engouement pour les sondes géothermiques se développe surtout dans le domaine de l'habitation familiale et dans une moindre mesure pour des installations de plus grande envergure. Pour assurer le développement harmonieux de ces installations de chauffage, il est nécessaire de pouvoir bénéficier d'un outil de cartographie pour l'évaluation des sites favorables en vue d'implantation de sondes géothermiques verticales.

1.2.3 Buts de l'étude

Le but initial était de réaliser une cartographie multiparamètres à l'aide d'un support SIG (Système d'informations géographiques). Ce choix s'est imposé afin de pouvoir disposer d'un outil interactif et évolutif contrairement à l'élaboration d'une carte imprimée qui traduit une situation à un temps donné. La réalisation de ce SIG permet la mise en relation des données géographiques (topographie, emplacement des sondes installées), géologiques, hydrogéologiques (zones et secteurs de protection), géothermiques, géotechniques (zones instables) et localisations des zones contaminées afin d'obtenir un outil pour la gestion de l'exploitation de la chaleur au moyen des sondes géothermiques. Il permet également d'améliorer la prise de décision lors de l'examen des demandes d'implantation de sondes géothermiques verticales. Les différentes cartes ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcView et la base de données associée, a quant à elle, été réalisée à l'aide du programme Excel.

L'accent a été mis sur la convivialité de son utilisation et sur sa compatibilité de la base de données, en vue d'une future cartographie de l'ensemble du canton de Fribourg.

Le second outil créé est un programme de calcul permettant d'évaluer la puissance thermique spécifique de soutirage et donc à quantifier le potentiel géothermique selon la lithologie rencontrée. Ces deux outils ont pour objectifs communs de:

- Faciliter la prise de décision en matière d'autorisation et de gestion des données.
- Limiter la nécessité des expertises géologiques préliminaires aux cas les plus délicats.
- Quantifier si nécessaire, la puissance thermique spécifique soutirable minimum et maximum de la future installation, selon les conditions lithologiques et hydrogéologiques afin d'en optimiser le dimensionnement.
- Evaluer le potentiel géothermique d'un secteur dans une optique de développement urbain et de gestion quantitative.
- Permettre la promotion et l'utilisation des sondes géothermiques pour les besoins en chauffage.

1.2.4 Principales étapes de travail

Cette étude s'est déroulée selon les étapes suivantes :

- Collecte des données de forages (levés lithologiques des sondes existantes).
- Traitement quantitatif et qualitatif des données lithologiques : compilation, traduction et normalisation des termes lithologiques décrits par les différents bureaux de géologue.
- Informatisation des levés de forages disposant d'un log lithologique.
- Mise à jour et modifications de la base de données existante.
- Etablissement d'un SIG comme outil d'aide à la décision.
- Création d'une légende lithologique commune.
- Codage de l'ensemble des levés lithologiques.
- Création d'une base de données lithologiques (codage).
- Création d'un programme de calcul permettant l'évaluation de la puissance thermique spécifique soutirable et potentielle d'un forage existant ou d'une future implantation de sonde géothermique verticale.
- Evaluation des zones favorables pour l'implantation de SGV dans les régions étudiées.
- Création d'un protocole de forage.
- Elaboration d'une demande d'autorisation pour implanter de nouvelles sondes géothermiques verticales.

1.2.5 Structure du rapport

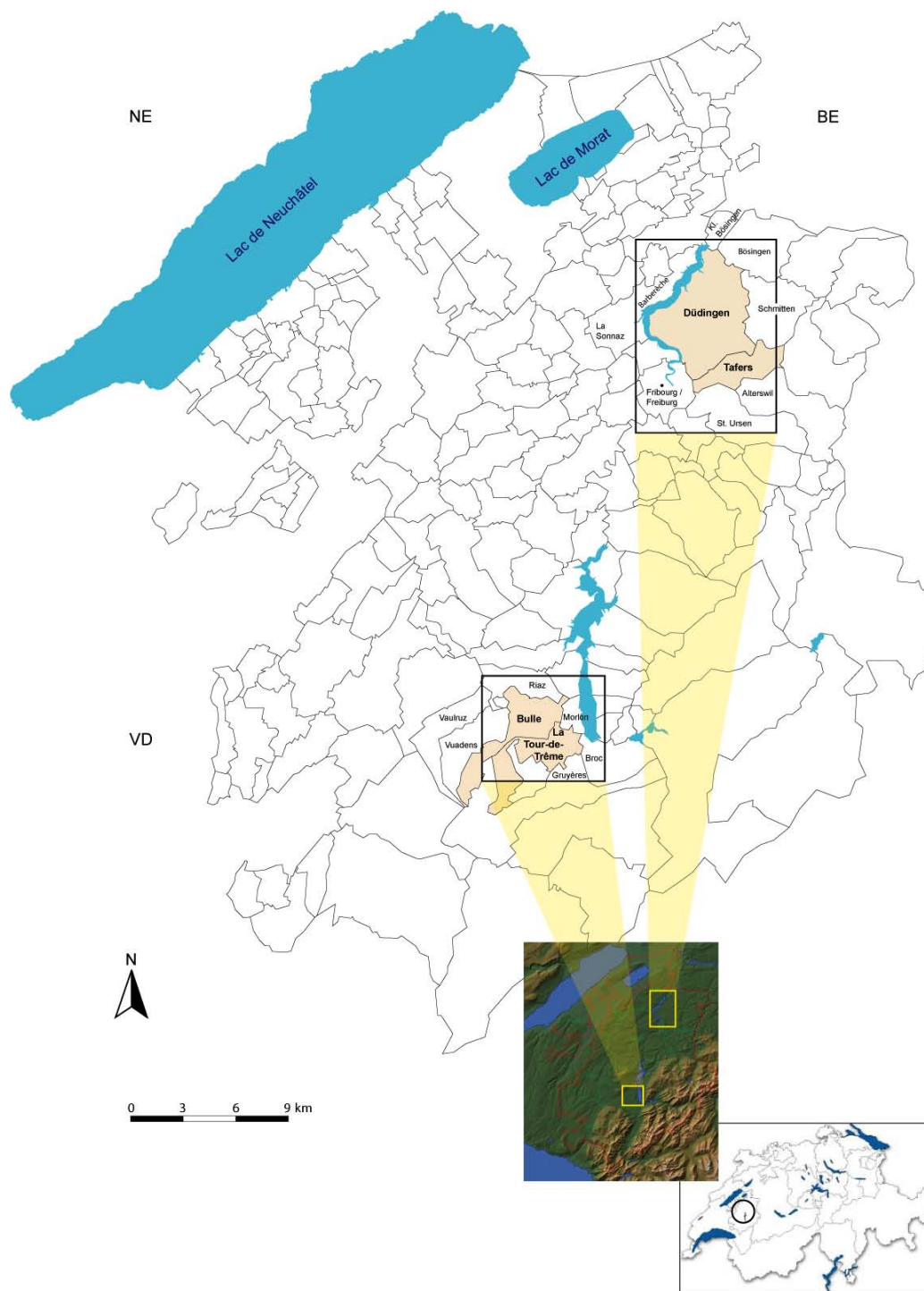
Le plan retenu pour le rapport suit la démarche évoquée ci-dessus. La présente introduction (Chapitre 1) est suivie par deux chapitres relatifs aux sondes géothermiques verticales.

Le chapitre 2 décrit le principe général d'une installation équipée d'une sonde géothermique (dimensionnement, installation, comportement à long terme, fonctionnement de la pompe à chaleur). Le chapitre 3 traite des aspects législatifs (précautions, sécurité, prescription selon les cantons). Les chapitres 4, 5 et 6 traitent respectivement les deux zones d'étude. Les conditions géologiques, structurales et hydrogéologiques sont abordées dans le chapitre 4. Le chapitre 5, expose les différents critères d'évaluation en vue d'implantation de sondes géothermiques et le chapitre 6 énonce les résultats obtenus sur les zones étudiées.

Chacun de ces chapitres forme un tout et dans le chapitre 7 une synthèse est proposée, des recommandations spécifiques ainsi que des perspectives sont discutées.

1.2.6 Localisation des zones étudiées

La première zone d'étude, d'une superficie de 16 km², se situe en Gruyère et regroupe les communes de Bulle et La Tour-de-Trême. La deuxième, d'une superficie de 54 km², comporte les communes de Guin (Düdingen) et Tavel (Tafers) en Singine.



Source: Office fédéral de la topographie, Berne, Office fédéral de la statistique: GEOSTAT, Neuchâtel / Service de la statistique du canton de Fribourg
 Quelle: Bundesamt für Landestopographie, Bern, Bundesamt für Statistik: GEOSTAT, Neuenburg / Amt für Statistik des Kantons Freiburg

Figure 1.2 : Localisation des régions étudiées dans le canton de Fribourg.

1.3 SITUATION DES SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES EN SUISSE ET DANS LE CANTON DE FRIBOURG

1.3.1 Bilan actuel sur le développement des sondes géothermiques

Les conditions lithologiques du Plateau molassique suisse sont très favorables pour l'implantation de SGV. Ces dernières représentent la plus forte contribution de l'énergie géothermique en Suisse (figure 1.3), en terme de nombre d'installations et de production de chaleur. La figure 1.4 montre la distribution des SGV dans le canton de Fribourg ainsi que le flux de chaleur moyen.

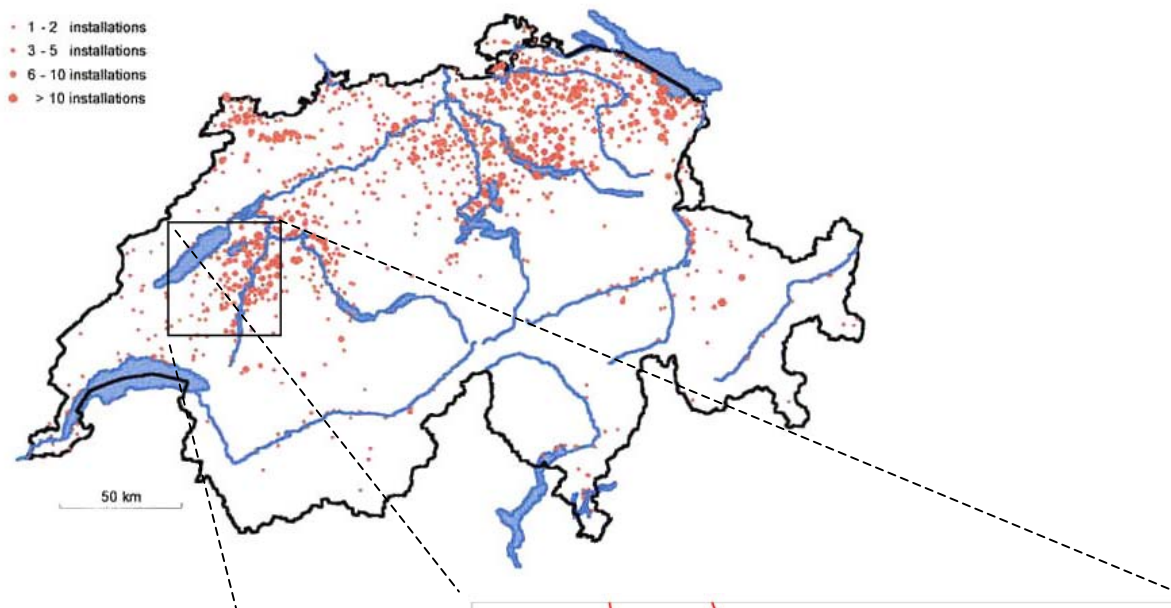


Figure 1.3 : Localisation des SGV installées en Suisse par GRUNDAG AG (Rybach & Eugster, 1998)

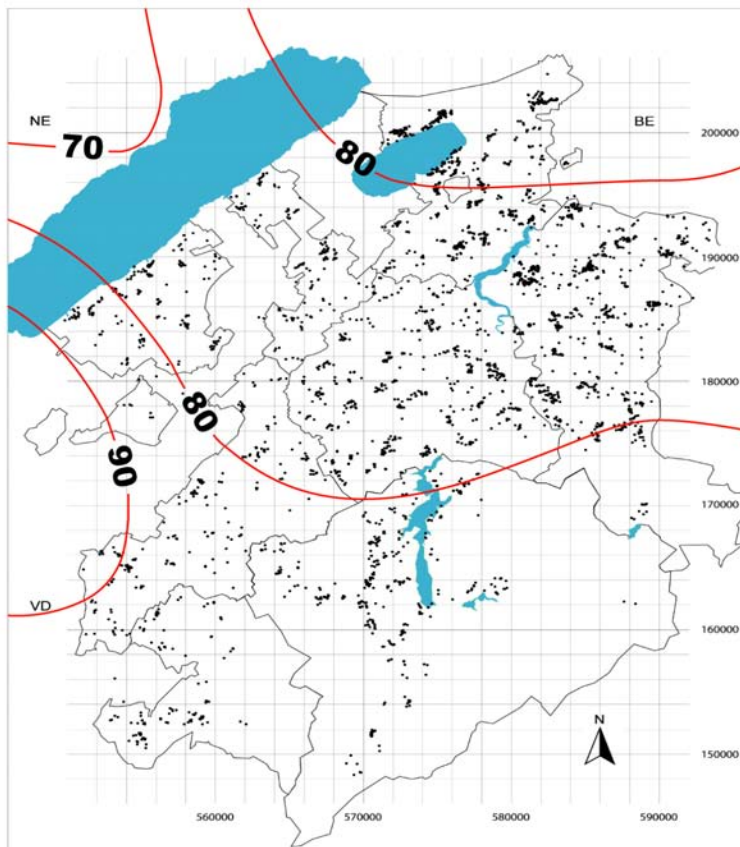


Figure 1.4 : Carte des isolignes de densité de flux de chaleur [mW/m^2] et localisation des forages de sondes géothermiques verticales dans le canton de Fribourg (Extrait BD, 2004)

Le rythme de développement des installations équipées de sondes géothermiques dans le canton de Fribourg est le plus élevé de Suisse romande. Ceci est dû à un certain nombre de facteurs techniques et économiques :

- conditions climatiques (longues périodes d'hiver avec une température proche de 0°C) ;
- conditions géologiques favorables (Plateau suisse), flux thermique favorable (fig. 1.5) ;

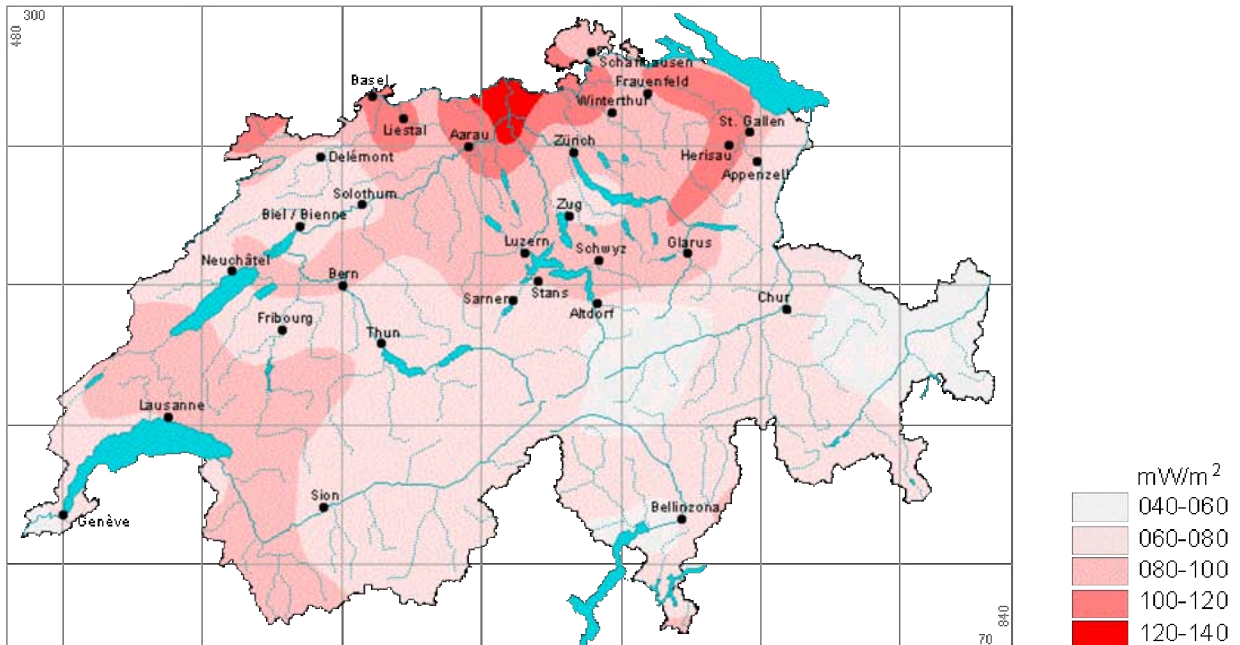


Figure 1.5 : Carte des isolignes de densité de flux de chaleur [mW/m²] en Suisse (Rybach L., <http://www.energie-atlas.ch/ge-CH.htm>)

- terrains souvent saturés en eau à faible profondeur ;
- choix du positionnement relativement libre et espace requis minimum ;
- contribution à réduire l'émission des gaz à effet de serre ;
- suppression des risques et des coûts de transport et de stockage de combustible ;
- dans la plupart des cas, la régénération thermique naturelle du sous-sol est suffisante.

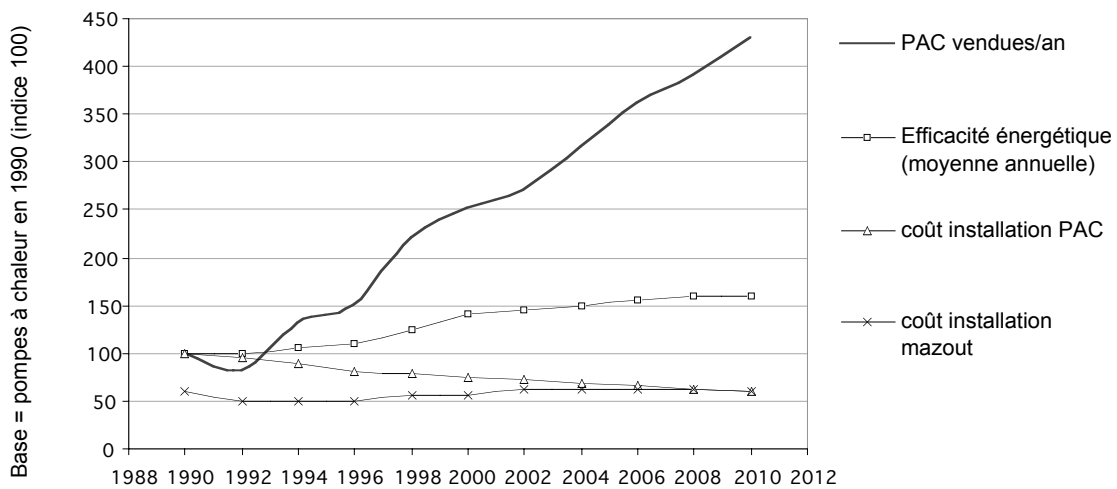


Figure 1.6 : Développement du marché des pompes à chaleur et estimation pour 2004-2010. http://www.pac.ch/stat_17.html

1.3.2 Statistiques et comparaisons

La figure 1.7 décrit l'évolution de la longueur totale des SGV installées en Suisse depuis 1993. Celle-ci totalise jusqu'à aujourd'hui environ 5 millions de mètres de forage !

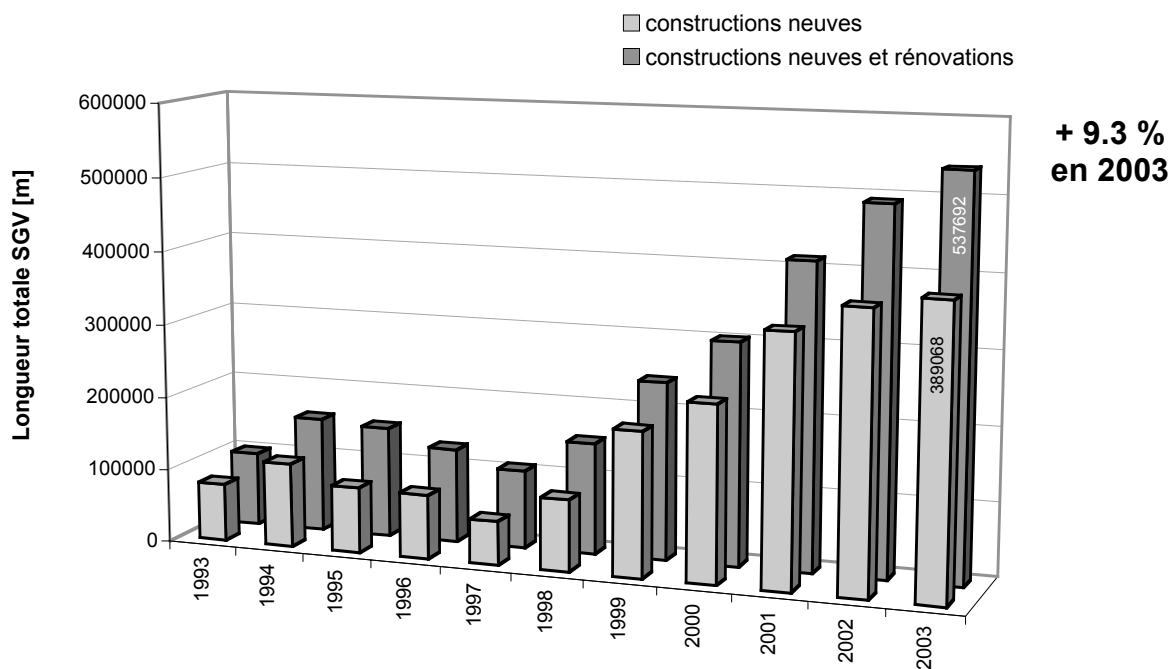


Figure 1.7 : Evolution de la longueur totale des sondes géothermiques en Suisse. http://www.pac.ch/stat_05.html

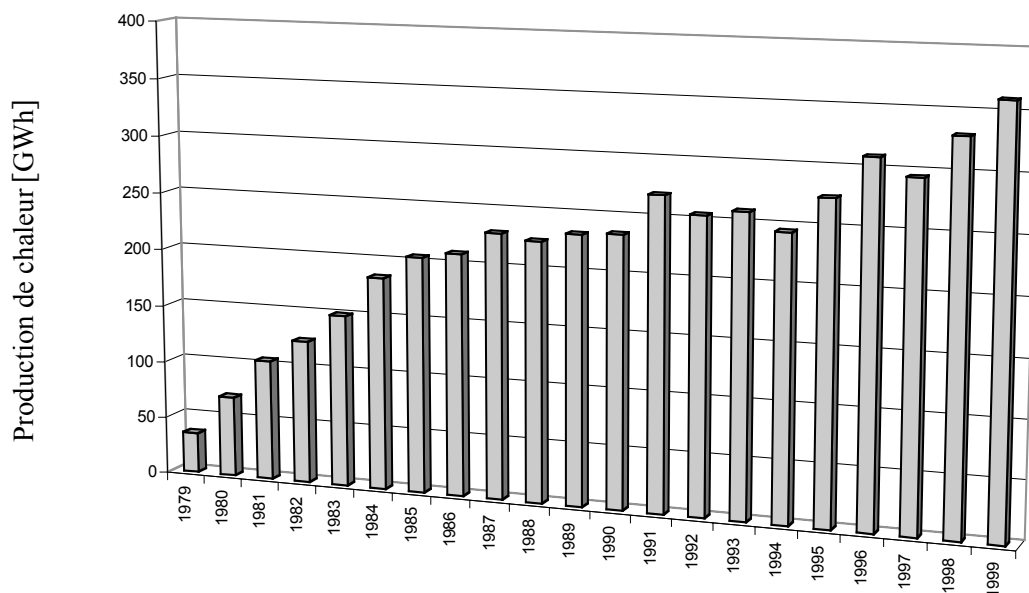


Figure 1.8 : Production d'énergie thermique produite par sondes géothermiques en Suisse http://www.pac.ch/chiffres_04.html

Les fluctuations apparaissant sur la tendance de développement (figure 1.8) sont expliquées par les changements annuels de demande de chaleur qui dépend de la température hivernale (Rybach et al.,2000).

Une estimation du nombre de sondes géothermiques verticales peut être faite en comparant les statistiques du nombre de pompes à chaleur vendues de type sol-eau pour les SGV. Les figures 1.9 et 1.10 démontrent bien l'augmentation de ce type d'installation en Suisse (figure 1.9) et plus particulièrement dans le canton de Fribourg (figure 1.10) dont le pourcentage a presque doublé de 1990 à 2000.

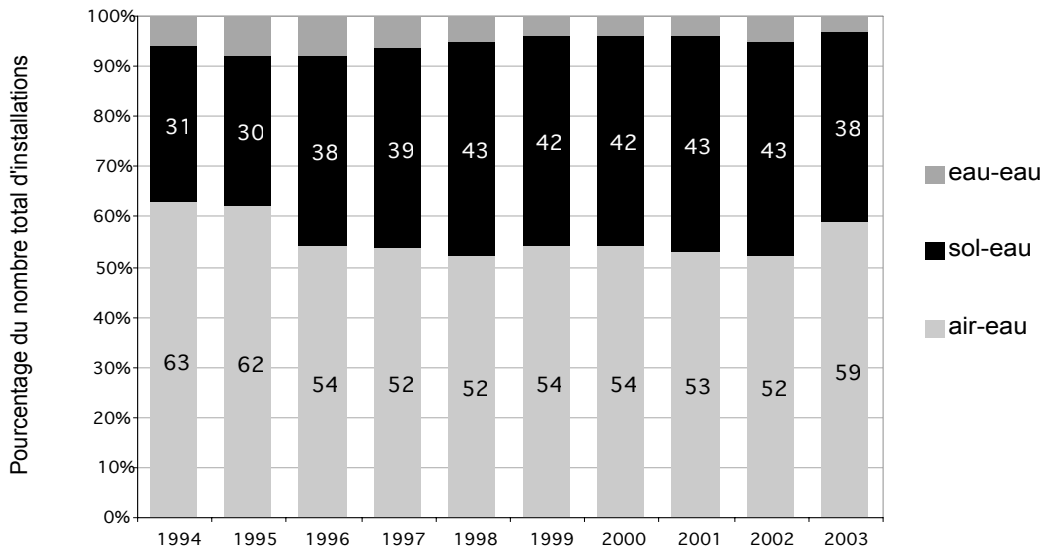


Figure 1.9 : Répartition des types de pompes à chaleur vendues en Suisse
http://www.pac.ch/stat_09.html

Sur les 15 dernières années, la progression moyenne des pompes à chaleur est d'environ 300 unités par année pour le canton de Fribourg. Il en existe plus de 5000, ce qui représente une puissance électrique installée de 20000 kW (60000 kW de puissance thermique). Aujourd'hui, c'est 105 GWh qui sont fournis annuellement sous forme de chaleur dont les deux tiers, soit plus de 70 GWh par an, sont extraits du sous-sol fribourgeois.

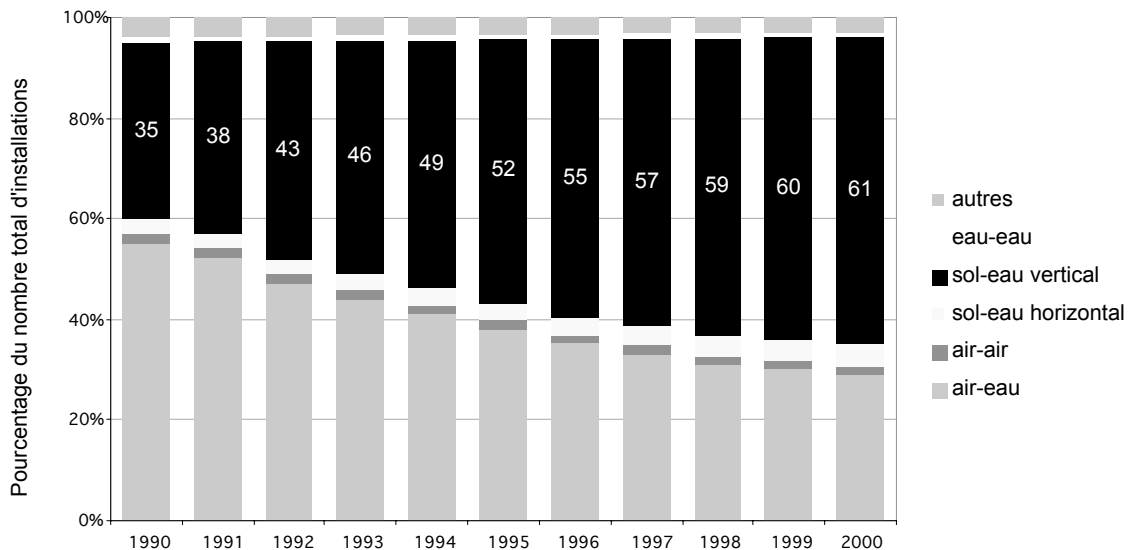


Figure 1.10 : Evolution du type de pompe à chaleur installée sur le canton de Fribourg
<http://www.fr.ch>

2. LES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES

2.1 INTRODUCTION

On parle de ressources géothermiques peu profondes (shallow geothermal resources) pour des forages d'une profondeur inférieure à 400 m (figure 2.1). Les conditions géologiques et climatiques du Plateau suisse sont favorables à l'implantation de sondes géothermiques verticales.

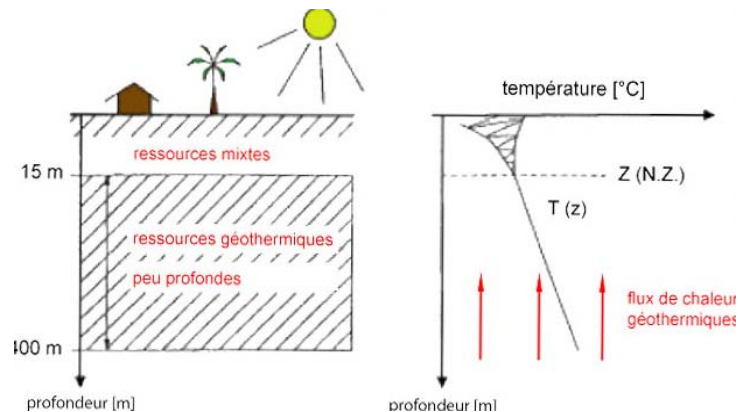


Figure 2.1: Ressources géothermiques de faible profondeur-basse énergie (Rybach & Sanner, 2000)

2.2 PRINCIPE

Les sondes géothermiques verticales sont utilisées aujourd'hui aussi bien pour l'habitation familiale que pour de plus grands bâtiments, principalement pour les besoins en chauffage mais aussi pour le refroidissement estival et l'accumulation d'énergie. Le dimensionnement d'une telle installation nécessite une connaissance précise des qualités thermiques du sous-sol. Les sondes géothermiques verticales (SGV), parfois aussi appelées collecteurs forés, sont des échangeurs de chaleur à circulation dite lente où circule un fluide caloporteur. Elles sont disposées le plus souvent verticalement mais peuvent être aussi forées obliquement si nécessaire. Il existe plusieurs types de sondes, mais le type le plus fréquemment utilisé est celui formé par deux tubes en « U ». La puissance thermique spécifique calculée pour une villa familiale de dimension moyenne (volume SIA d'environ 600 m³) sont d'environ 40 à 80 W par mètre de sonde selon le type de terrain.

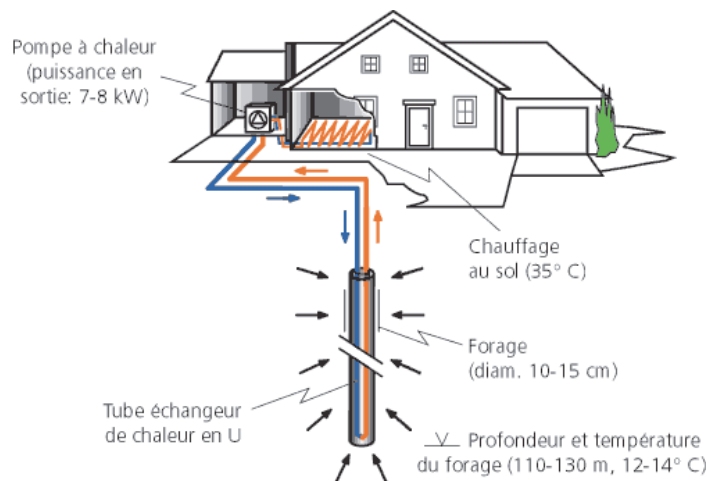


Figure 2.2 : Schéma d'une installation avec sonde géothermique verticale (SSG, 2001)

2.2.1 Le sol comme source de chaleur

Dans le cas d'une sonde géothermique, le transport de la chaleur s'opère, d'une part par conduction dans le terrain et d'autre part par convection associée au fluide caloporteur en mouvement.

▪ Conduction thermique

Ce mode de transfert exprime la proportionnalité du flux thermique au gradient de température :

$$\dot{Q} = \ddot{e} \cdot \frac{\ddot{\Delta T}}{\ddot{\Delta X}} \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$$

Le coefficient de proportionnalité \ddot{e} est la *conductivité thermique*, qui exprime la quantité de chaleur transférée par conduction au travers d'un corps d'épaisseur et de surface unitaire et pendant un temps unitaire.

▪ Convection

La phase fluide est en mouvement et chaque particule de fluide transporte son énergie au cours de son déplacement. Le premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie) est applicable. Le déplacement des particules d'eau à la vitesse V entraîne un flux convectif

$$\dot{Q} = \ddot{n} \cdot C_F \cdot V \cdot T_F \quad [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$$

Les échanges entre phases liquide et solide qui font intervenir des transferts par conduction et convection, sont souvent présents dans le sous-sol et plus particulièrement dans les couches quaternaires.

Tableau 2.1: Grandeurs intervenant dans les phénomènes thermiques en régime transitoire (SIA D025)

GRANDEUR PHYSIQUE	FORMULE, SYMBOLE	UNITE
Effet capacitif	$\rho c \Delta v \cdot \Delta T = \dot{Q} \Delta T$	
Densité ou poids spécifique	–	[kg m ⁻³]
Chaleur spécifique ou capacité calorifique massique	C	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
Capacité calorifique volumique	C _v	[J m ⁻³ K ⁻¹]
Diffusivité thermique	–	[m ⁻² s ⁻¹]

Un des paramètres important pour le dimensionnement des SGV est la capacité calorifique volumique, qui exprime la quantité de chaleur qu'il faut fournir à une unité de volume d'un corps pour en élever la température de 1°C. Etant donné que le sous-sol possède une capacité calorifique de 0.5 à 0.7 fois celle de l'eau et une conductivité thermique généralement comprise entre 1.5 et 3.5 [Wm⁻¹K⁻¹], celui-ci est donc plutôt un bon accumulateur mais un médiocre conducteur de la chaleur.

2.2.2 Les types de roches et leurs paramètres

▪ Les roches meubles

Cette catégorie regroupe les roches ayant une faible cohésion. Les plus courantes sont : sables, graviers, limons, argiles et les mélanges associés (moraine, alluvions,...). La plupart des roches quaternaires appartiennent à cette catégorie, et possèdent généralement une porosité effective assez élevée qui aura pour effet de modifier les propriétés thermiques de façon importante.

▪ Les roches cohérentes

Au contraire de la catégorie précédente, celles-ci ont une forte cohésion qui se traduit par une densité plus élevée. On citera : les calcaires, grès, schiste, gneiss et granite. On notera que la Molasse est un terme général qui s'applique à un grès à ciment calcaire. La porosité effective de ces roches est généralement faible.

Le tableau 2.2 présente une liste des principales roches rencontrées dans les régions étudiées et fréquentes en Suisse :

Tableau 2.2: Conductivité thermique et capacité volumétrique de différents types de roche (Pahud, 2002)

TYPE DE ROCHE	POROSITE [% VOLUME]	CONDUCTIBILITE THERMIQUE λ [W/mK]			CAPACITE THERMIQUE VOLUMETRIQUE λ [MJ/m ³ K]	
		MIN	VALEUR TYPIQUE	MAX	VALEUR TYPIQUE	
ROCHES COHERENTES	Calcaires	0.5 - 5	2.5	2.8	4.0	2.1 – 2.4
	Marne	20 – 40	1.5	2.1	3.5	2.2 – 2.3
	Quartzite		3.6	6.0	6.6	2.1 – 2.2
	Sel		5.3	5.4	6.4	1.2
	Grès	5 – 20	1.3	2.3	5.1	1.6 – 2.8
	Roche argileuse, limoneuse		1.1	2.2	3.5	2.1 – 2.4
	Conglomérats	2 – 15	1.5	2.5	3.3	1.7 – 2.6
ROCHES MEUBLES	Gravier, sec	20 – 25	0.4	0.4	0.5	1.4 – 1.6
	Gravier, saturé			env. 1.8		env. 2.4
	Sable, sec	20 – 30	0.3	0.4	0.8	1.3 – 1.6
	Sable, humide		1.7	2.4	5.0	2.2 – 2.9
	Argile/limon, sec	50 – 70	0.4	0.5	1.0	1.5 – 1.6
	Argile, limon, saturé		0.9	1.7	2.3	1.6 – 3.4
	Tourbe		0.2	0.4	0.7	0.5 – 3.8
AUTRES	Eau	-		0.58		4.19
	Bentonite		0.5	0.6	0.8	env. 3.9
	Béton		0.9	1.6	2.0	env. 1.8

2.2.3 Propriétés thermiques des roches

▪ **La conductivité thermique**

Aucune méthode ou dispositif simple et pratique pour déterminer la conductivité thermique n'est actuellement disponible sur le marché. Son estimation reste empirique, évaluée selon des abaques (Kersten, 1949 in Caspard & Santiago, 1988) ou de façon plus coûteuse en laboratoire (pour les roches cohérentes). Les abaques ci-contre (figures 2.3 et 2.4) donnent des valeurs indicatives. La teneur en eau (exprimée en % sur les abaques) est un facteur important qui fait évoluer de façon non linéaire la conductivité thermique.

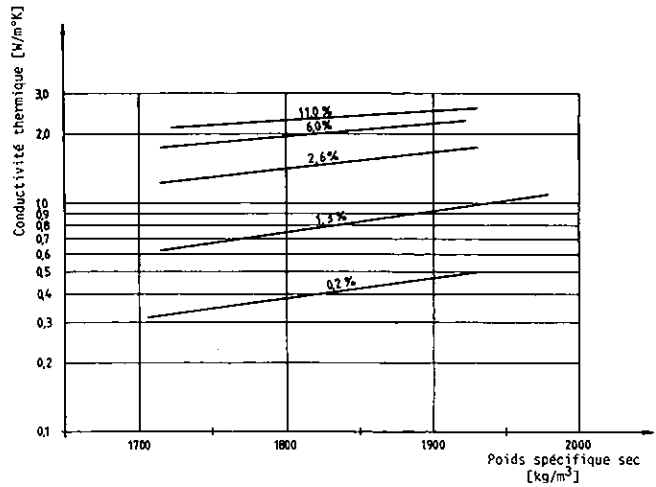
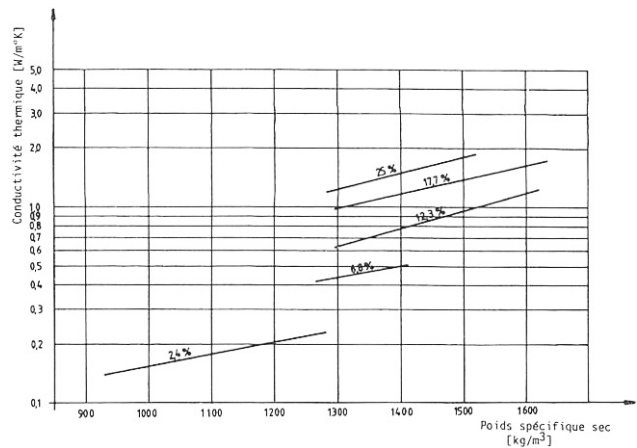


Figure 2.3 :Variation de la conductivité thermique en fonction du poids spécifique apparent sec pour un sol sableux.

Figure 2.4 :Variation de la conductivité thermique en fonction du poids spécifique apparent sec pour un sol argilo-limoneux.

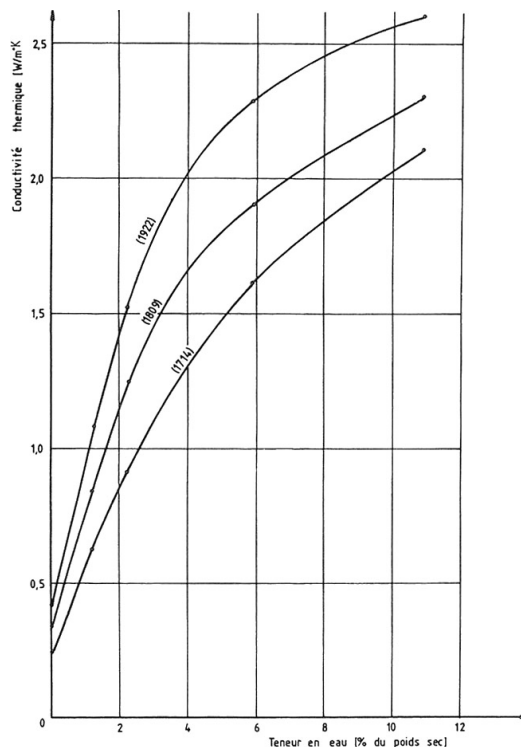


▪ **La chaleur spécifique et capacité calorifique volumique**

La forme et la taille des grains n'a aucune influence et seules la température et la teneur en eau font varier la chaleur spécifique d'une roche. La figure 2.5 montre que la chaleur spécifique augmente linéairement avec la température (Kersten, 1949)

Figure 2.5 :Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour un sol argilo-limoneux.

Les valeurs entre parenthèses indiquent le poids spécifique apparent sec.



2.3 DIMENSIONNEMENT, PUISSANCE ET ÉNERGIE DISPONIBLE

2.3.1 Dimension des sondes et zone d'influence

Le dimensionnement d'une SGV est basée sur les facteurs-clés cités précédemment tels que : la conductibilité thermique du sous-sol et son humidité, la présence de nappe souterraine en mouvement, le nombre d'heures d'exploitation annuel et accessoirement du diamètre de la sonde. Ce dernier étant dicté, principalement pour des raisons économiques, par le diamètre maximum de forage (forage destructif), qui est généralement de 4 3/4" (environ 120 mm). Le diamètre des sondes quant à elles sont généralement de 32x3 mm, voire actuellement 40x3 mm, en polyéthylène (PE) pour éviter le risque de corrosion.

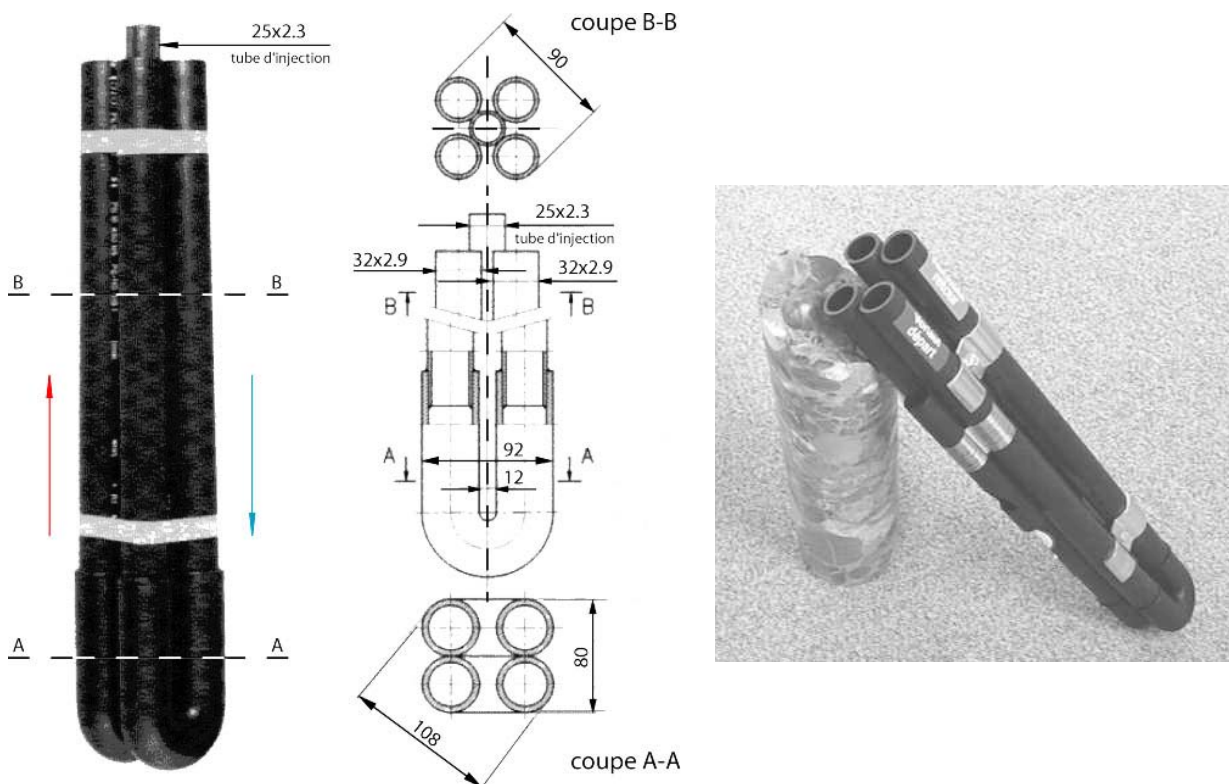


Figure 2.6 : Vue et coupes d'une sonde de type double U, (http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/dfs_langen/dfs_langen.htm)

Les SGV soutirent la chaleur du sol de façon radiale et introduisent, localement, un abaissement de la température qui se traduit par la création d'un cône d'appel thermique. Son extension dépend de la conductibilité thermique du terrain, de la quantité d'énergie extraite (annuelle à long terme), du potentiel de recharge du terrain (conditions aux limites) et dans une moindre mesure, de la chaleur spécifique (faibles variations).

Un sous-dimensionnement dans un terrain peu conducteur accentuera la profondeur du cône thermique, alors qu'un terrain très conducteur augmentera le rayon du cône sans abaissement significatif de la profondeur du cône. Les connaissances actuelles démontrent que la limite maximale d'extraction est de 160 kWh par année et par mètre de sonde. Aucune installation dimensionnée pour extraire 65 W/m et fonctionner 2200 heures par an n'a donné, à ce jour, de signe de surexploitation. Cependant, la puissance soutirée ne devrait pas dépasser 75 Watts par mètre de sonde (SIA D 025, 1988).

Les tableaux 2.3 et 2.4 mentionnent des valeurs indicatives de chaleur spécifique d'extraction selon quelques lithologies rencontrées en Suisse. Une distinction est faite suivant la prise en compte (2400 h/an) ou non (1800 h/an) de la production de l'eau chaude sanitaire (ECS) dans le calcul de la chaleur spécifique d'extraction.

Tableau 2.3: Valeurs indicatives d'extraction de chaleur spécifique (VDI Richtlinien 4640, part 2, 2001)

TYPE DE SOUS-SOL		CHALEUR SPECIFIQUE D'EXTRACTION	
		Durée de fonctionnement	
		1800 h/an	2400 h/an
VALEURS GENERALES		[W/m]	[W/m]
Sous-sol "pauvre" (sédiments secs)	$\lambda < 1.5$ W/mK	25	20
Sous-sol "pauvre" (sédiments secs)	$\lambda < 1.5$ à 3 W/mK	60	50
Sous-sol "pauvre" (sédiments secs)	$\lambda > 3$ W/mK	84	70
ROCHES INDIVIDUELLES			
Gravier et sable, sec		< 25	< 20
Gravier et sable, saturé		65 – 80	55 – 65
Pour écoulement souterrain important dans gravier et sable, pour système individuel		80 – 100	80 – 100
Argile et limon, humide		35 – 50	30 – 40
Calcaire (massif)		55 – 70	45 – 60
Sable		65 – 80	55 – 65

Tableau 2.4: Valeurs empiriques pour le «dimensionnement sommaire» d'une installation de sonde géothermique dans différentes roches. (www.geothermal-energy.ch/fr/index_fr.htm)

SOUS-SOL	CONDUCTIBILITE THERMIQUE λ (W/m K)	PUISSANCE D'EXTRACTION (W/m)	LONGUEUR DE SONDE PAR KW DE PUISSANCE DE CHAUFFE (m)	
			COP = 3	COP = 3.5
Roches indurées à conductibilité thermique élevée	> 3,0	70	19,5	10
Roches indurées ou roches meubles saturées d'eau	1,5 à 3,0	50	13	14
Sous-sol de mauvaise qualité (roches meubles sèches)	< 1,5	20	33	36
Gravier, sable, aquifère	1,8 à 2,4	55 à 65	10 à 12	11 à 13
Argile, limon, humide	1,7	30 à 40	17 à 22	18 à 24
Gravier, sable, sec	0,4	< 20	> 33	> 36
Calcaire, massif	2,8	45 à 60	11 à 15	12 à 16
Grès	2,3	55 à 65	10 à 12	11 à 13
Gneiss	2,9	60 à 70	9,5 à 11	10 à 16
Granite	3,4	55 à 70	9,5 à 12	10 à 13

COP = coefficient de performance (cf. chapitre 2.5)

Les chiffres du tableau 2.4 ne s'appliquent qu'au Plateau suisse, en prenant en considération un maximum de 1'800 heures de service par année (sans eau chaude sanitaire). Ils peuvent varier fortement en fonction de l'altitude et de la configuration locale des roches, par exemple en présence de fissures et de zones d'altération.

2.3.2 Nomogramme de dimensionnement

Pour des installations de faible ampleur, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a développé un outil simple pour dimensionner une SGV mais qui reste très approximatif. Il se présente sous forme d'un "nomogramme" valable pour les conditions suisses, s'appliquant aussi en Autriche et en Allemagne. Il est basé sur des simulations informatiques mais non validés par le suivi d'installations (Reuss & Sanner, 1990).

Les paramètres intervenant dans cet outil de calibration sont l'énergie thermique, la puissance thermique ainsi que les conditions climatiques (altitude). Son utilisation est décrite dans l'annexe VI.

2.3.3 Distance à respecter entre sondes

Pour le cas d'une sonde unique équipant une habitation familiale moyenne (puissance de chauffe de 12 kW), l'extraction du sous-sol atteint environ 20000 kWh/an. Dans l'hypothèse d'un régime stationnaire, cela impliquerait une surface d'environ 28000 m² délimitée par un rayon de 95 mètres (flux géothermique de 0.07 W/m²), malgré le fait qu'un régime stationnaire soit peu probable en raison d'apports d'eaux souterraines fréquents. Un abaque basé sur le calcul de l'abaissement de température en fonction de la conductibilité thermique du terrain définit le rayon d'action minimum à partir duquel la perturbation locale est de 1% de celle de la source (figure 2.7).

Par conséquent, dans un terrain bon conducteur ($\lambda=3.5$ W/mK), l'abaissement de température est négligeable au-delà de 3.5 mètres et le périmètre d'influence est donc de 7 mètres, dans lequel aucune autre sonde ne devrait être installée afin de ne pas avoir de problème de recoupement des rayons d'action thermiques. Une étude de la géométrie et de l'influence réciproque de sondes doit être faite dans le cas d'un champ de sondes.

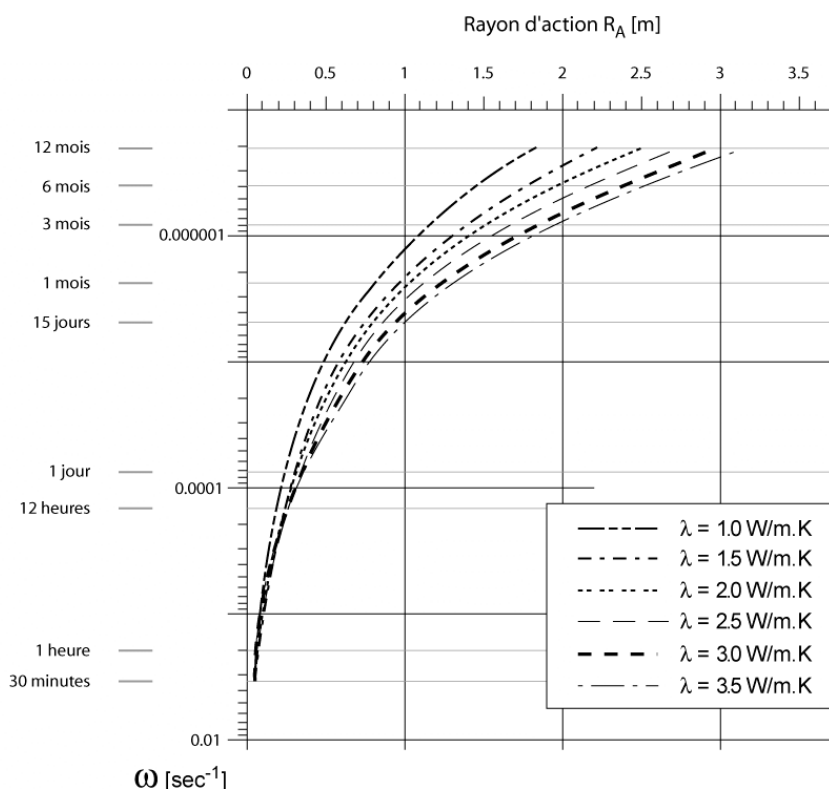


Figure 2.7: Calcul de la zone d'influence d'une perturbation de la température (Caspard & Santiago, 1988)

2.3.4 Test de réponse thermique du terrain

Le principe du test-réponse fut proposé pour la première fois par Morgensen en 1983. En 1995, les premiers dispositifs de mesures dits mobiles furent introduits en Suède et aux Etats-Unis. Cette méthode expérimentale consiste à faire circuler de l'eau chaude dans un forage équipé d'une sonde géothermique et de mesurer les températures d'entrée et de sortie du fluide contenu dans la sonde. Une estimation de la conductivité thermique moyenne à proximité du forage est faite à l'aide des enregistrements des mesures de températures. La conductivité thermique in situ est évaluée en observant le rétablissement de l'évolution de la température après le test-réponse. En effet, le signal est moins perturbé que durant le test.

L'avantage d'un test de réponse thermique est l'intégration des propriétés thermiques du sous-sol le long du forage, incluant les facteurs tels que l'eau souterraine et le matériel de remplissage, fournissant ainsi une mesure de la conductivité thermique « effective » et non « réelle », définie sous des conditions strictes de conduction de chaleur. Ce dispositif représente un moyen simple pour détecter un possible dysfonctionnement d'une SGV et sert également à dimensionner un futur champ de sondes (SSG, 2004).

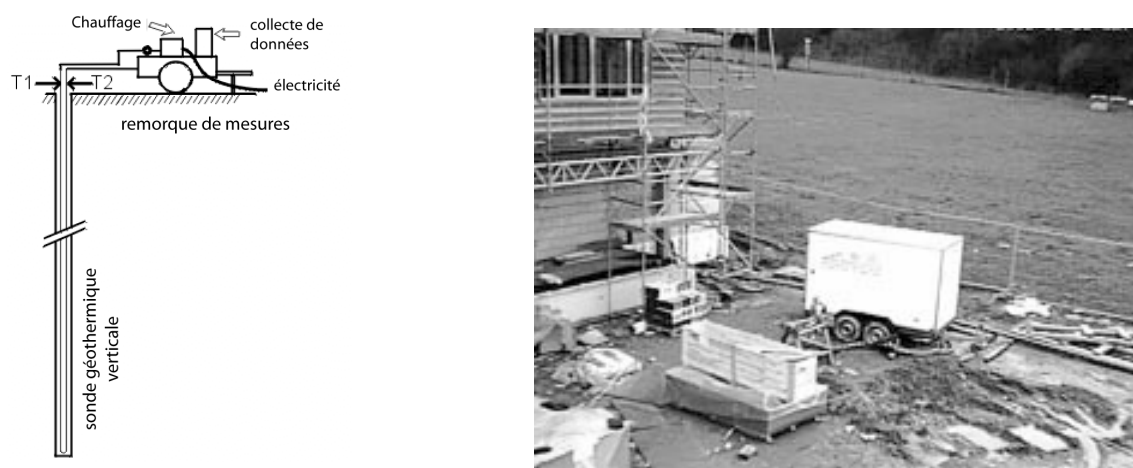


Figure 2.8: Schéma du dispositif mobile utilisé lors du test de réponse
<http://www.ubeg.de/Geothermie/Geoth5/geoth5.html>

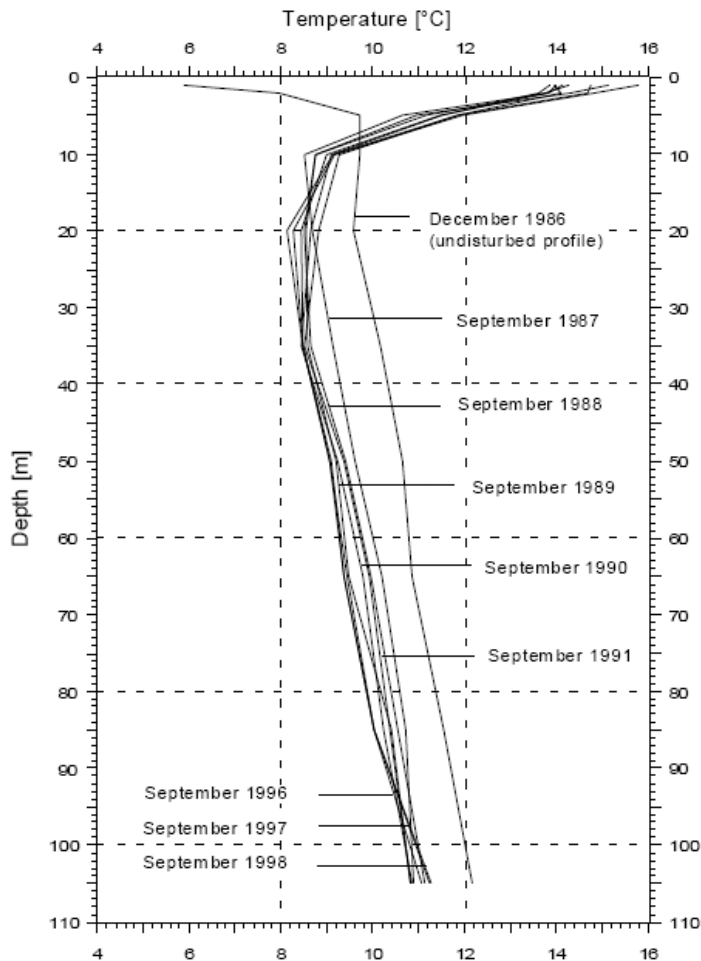
2.4 COMPORTEMENT À LONG TERME

Hormis les nombreuses interrogations concernant la durabilité et les incidences que peuvent engendrer ce type d'installation, il est important de se demander si les ressources de la géothermie de faible profondeur sont renouvelables, c'est-à-dire après quelle durée tel un système fonctionne sans abaissement de la production. Afin d'y répondre, une étude a été réalisée par EUGSTER & RYBACH (2000) sur une installation ancienne. Cette installation équipe une maison familiale à Elgg, près de Zurich et fonctionne depuis 1986. Elle est équipée d'une sonde géothermique simple, de type coaxial et d'une longueur de 105 m, alors que le remplissage est composé de bentonite et de ciment. L'approvisionnement maximum en puissance thermique est de 70 W par mètre de sonde.

Le but de la campagne de mesures était l'acquisition des températures du sous-sol tant au voisinage de la sonde que dans le système entier. Le dispositif de mesures a été installé tout au long du forage, ceci à une distance de 0.5 et 1 m de ce dernier. Des sondes de température ont été installées à 1, 2, 5, 10, 20, 35, 50, 65, 85 et 105 m de profondeur. La première campagne de mesures a duré de 1986 à 1991 (Eugster, 1991). Les températures du sous-sol reportées sur la figure 2.9 ont été mesurées à une distance d'un mètre du forage.

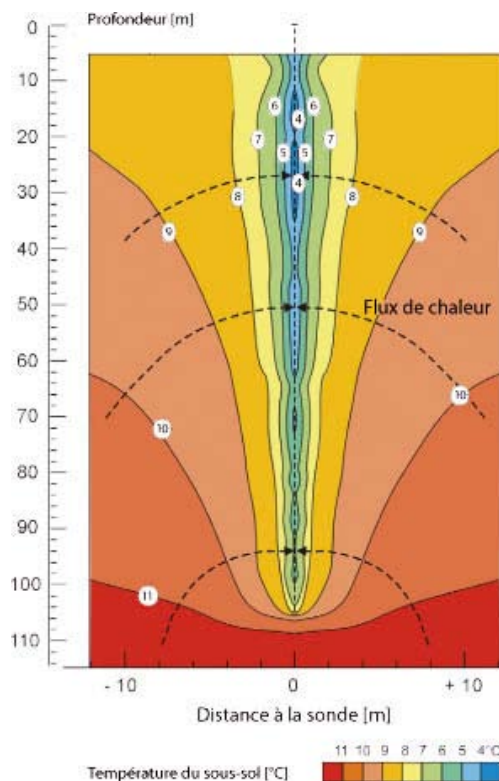
Il est normal d'observer un refroidissement progressif autour du forage pendant les 2-3 premières années d'exploitation. Cependant, le déficit de température décroît d'année en année jusqu'à atteindre un état d'équilibre thermique entre le sous-sol et le forage, avec une différence négative d'environ 1 à 2°C par rapport à la température originale. Ce déficit est caractéristique du site de mesure, ici en présence de Molasse tertiaire. La courbe de « décembre 1986 », montre un profil non perturbé au commencement de la première saison de chauffage. Les courbes suivantes décrivent les conditions après l'extraction de chaleur durant l'hiver et le rétablissement de l'été, juste avant la reprise de la saison de chauffage pour les années 1987 à 1998.

Figure 2.9: Profils de température du sous-sol sur l'installation à Elgg, Suisse (Eugster & Rybach, 2000)



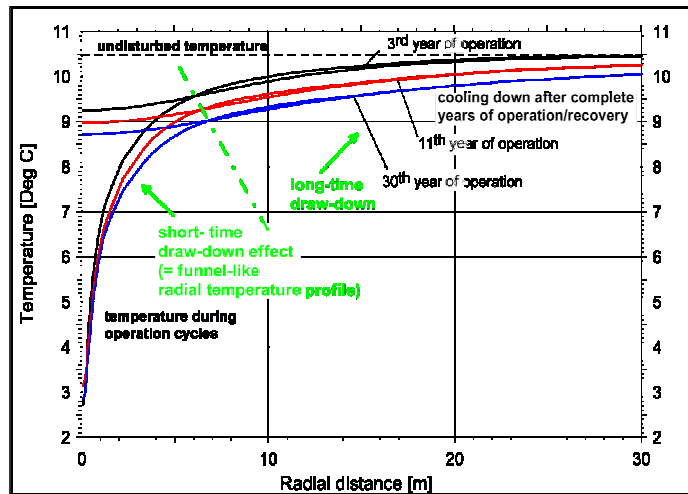
La figure 2.10 montre la distribution des températures du sous-sol en période hivernale. Les influences atmosphériques sont clairement visibles jusqu'à une profondeur de 15 m ; à partir de là, c'est le flux de chaleur géothermique qui domine.

Figure 2.10: Distribution des températures du sous-sol sur l'installation d'Elgg en période hivernale. L'influence des conditions atmosphériques sur le refroidissement de la sonde sont visibles jusqu'à une profondeur d'environ 10 à 15 m (Rybach, 1990)



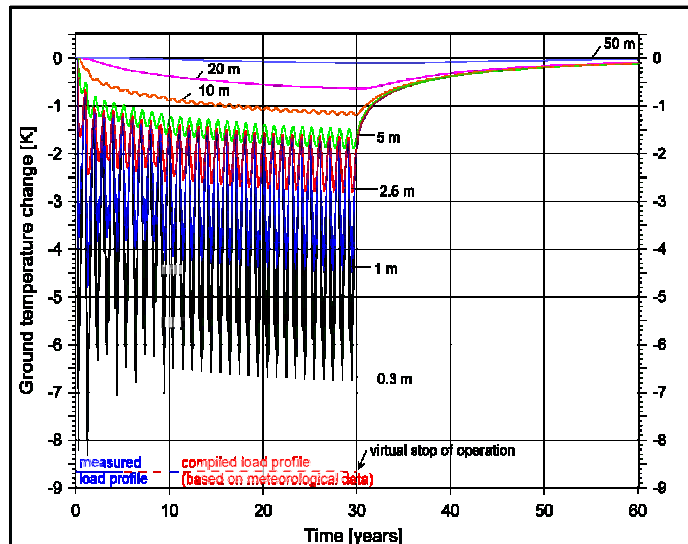
La deuxième campagne de mesures de déroula en automne 1996, dix ans après la mise en service de l'installation, mais on n'observe pas de différence notable sur les profils de température, ce qui démontre que le système a bien atteint un état d'équilibre. Cette opération a été extrapolée sur une durée de 19 ans, ce qui correspond à une durée totale d'exploitation de 30 ans (fig. 2.11).

Figure 2.11 : Distribution des températures et refroidissement à long terme (Eugster & Rybach, 2000)



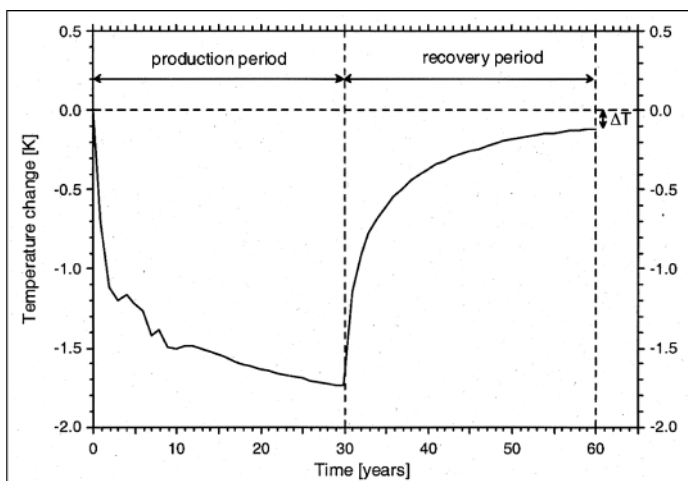
Les résultats de la simulation montrent une diminution (prévue) de la température annuelle du sous-sol et inversement, une augmentation du volume affecté par le refroidissement autour de la sonde. Après l'arrêt de l'extraction, la régénération du sous-sol commence (fig. 2.12).

Figure 2.12 : Variations des températures mesurées et modélisées à 50 m de profondeur (Eugster & Rybach, 2000)



La figure 2.13 montre les variations de températures à 50 m de profondeur et à une distance de 1 m d'une SGV (longueur = 100m) après une production et une recharge de 30 ans chacune.

Figure 2.13 : Variations de la température après une production et une recharge de 30 ans chacune (Eugster & Rybach, 2000)



2.5 IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

L'expérience est limitée concernant les risques éventuels et l'impacts sur l'environnement des sondes géothermiques verticales. Un point délicat est l'interaction potentielle de la sonde avec les eaux souterraines. Les recommandations publiées par l'OFEFP (1994) mentionnent deux types de risques majeurs.

2.5.1 Risques directs

Ils sont essentiellement dus à la propagation éventuelle dans le sous-sol, à la suite d'une rupture de la sonde par exemple, d'antigels glycoliques, fréquemment utilisés, à l'heure actuelle, comme additifs dans le fluide caloporteur. Il en résulte un risque accru de contamination des écoulements souterrains et des exutoires (source ou puits). Il est donc important d'évaluer la composition de ces fluides caloporteurs (majeurs ou traces), leur sorption et leur dégradation dans un sous-sol donné, leur toxicité, les conditions de mélanges dans les systèmes d'écoulement et les causes possibles de rupture des sondes (zones géologiquement instables).

Certains fluides frigorigènes utilisés auparavant dans les pompes à chaleur (CFC R12 et R502) ont été interdits car ils sont responsables de la destruction de la couche d'ozone. Ils concourent également d'une manière significative à l'effet de serre. Leur manipulation et autorisation sont réglées par l'Ordonnance sur les matières dangereuses pour l'environnement. Les réfrigérants de substitution actuellement utilisés sont le R134a (HFC) et le R407c (HFC). Il existe aussi des réfrigérants naturels comme le propane R290 (HC) et l'isobutane mais très rarement utilisés pour des systèmes de pompe à chaleur pour des habitations.

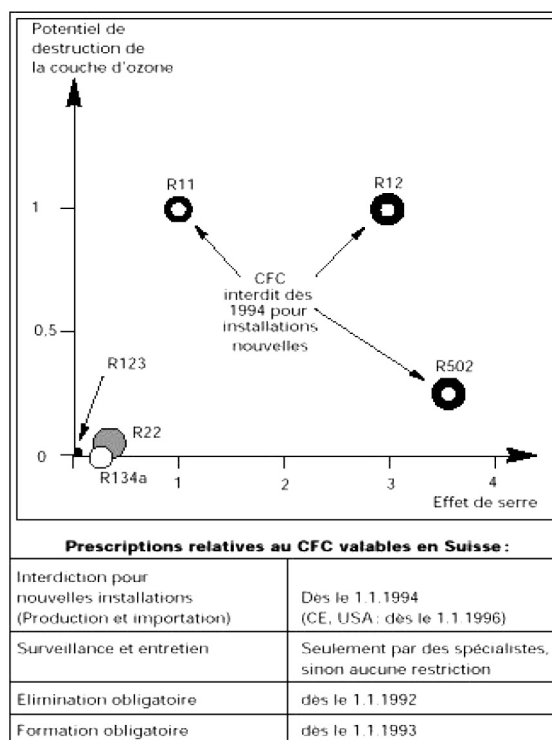


Figure 2.14 : Fluide frigorigène et impact sur l'environnement.

<http://www.ecube.ch/Publications/COURS%20POMPE%20A%20CHALEUR.pdf>

2.5.2 Risques indirects

Ils sont générés par le forage réalisé pour accueillir la sonde, qui peut créer des court-circuits entre aquifères. Un phénomène d'équilibrage des potentiels peut être induit par les écoulements souterrains et des réserves d'eau de qualité pourraient être contaminées par des arrivées de fluides indésirables.

D'autres risques existent tels que :

- la perturbation des écoulements souterrains et des températures du sous-sol ;
- la contamination à partir de la surface (aucune sonde implantée en zone contaminée) ;
- les incidences mécaniques et chimiques (l'étanchéité de la sonde peut être rompue par des glissements de terrain qui risquent de sectionner la sonde) ;
- Certaines eaux agressives ou fortement minéralisées peuvent attaquer chimiquement la paroi de la sonde ;
- les formations contenant du gaz (radon) rencontrées lors du forage ne doivent pas être sous-estimées.

2.6 FONCTIONNEMENT DE LA POMPE À CHALEUR

L'intérêt de la pompe à chaleur (PAC) réside dans le fait que, par compression du fluide frigorigène à l'état gazeux, le compresseur va amplifier l'énergie électrique/thermique utilisée, par un facteur (coefficient de performance) appelé COP d'un facteur compris entre 2 et 5 selon le type de source de chaleur et les températures de fonctionnement. C'est-à-dire que pour 1 kWh d'électricité consommée, l'installation reçoit de 3 à 6 kWh de chaleur selon les modèles de PAC. Au cours de ces 15 dernières années, la progression moyenne des ventes de pompes à chaleur est de 300 par année dans le canton de Fribourg. Il en existe actuellement plus de 5000 dont les deux tiers exploitent la chaleur du sol, ce qui représente une puissance électrique d'environ 20000 kW et 60000 kW de puissance thermique.

La pompe à chaleur est composée de deux échangeurs : l'évaporateur qui capte la chaleur de sous-sol et le condenseur qui restitue cette chaleur (amplifiée) au réseau de chauffage de l'habitation. Entre ces deux échangeurs, se trouve le compresseur (pompe à chaleur) qui sert d'amplificateur de chaleur. Le pilotage de l'évaporateur/condensateur est réalisé par le détenteur sous la forme d'une vanne d'expansion.

La figure 2.15 décrit les étapes successives, depuis la chaleur prélevée du sous-sol (sonde géothermique verticale) jusqu'au circuit chauffage de l'habitation et montre les trois circuits fermés et indépendants.

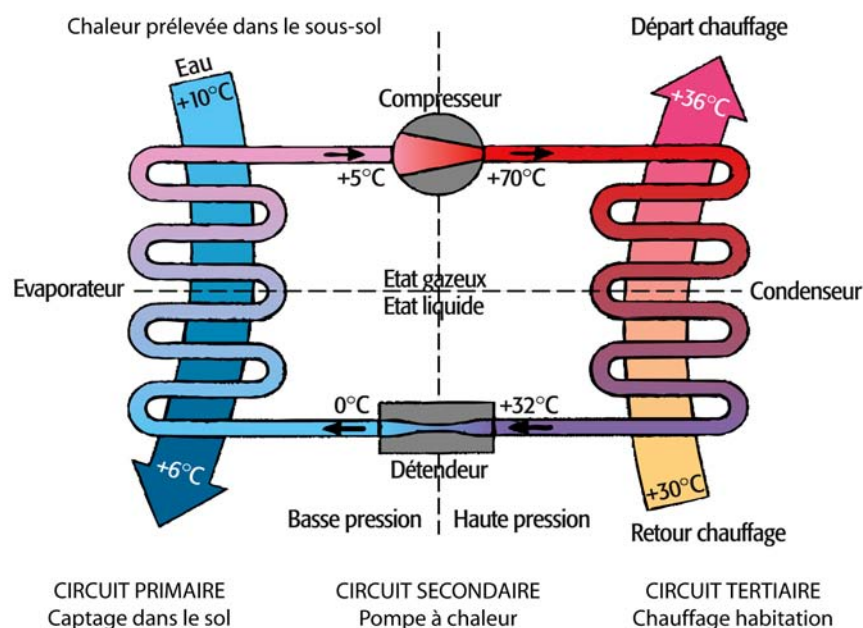


Figure 2.15 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur de type sol-eau (<http://www.fr.ch>).

Le principe général de fonctionnement est constitué de trois étapes :

- **LE CIRCUIT PRIMAIRE** : de la sonde à la pompe à chaleur (phase d'évaporation)

Par l'intermédiaire de la sonde géothermique verticale, la restitution de l'énergie calorifique se fait à l'aide du fluide caloporteur généralement de l'eau glycolée (1.5 à 3.5 litres par mètre de sonde). Cette eau réchauffe et vaporise le fluide frigorigène de la pompe à chaleur (PAC) par l'intermédiaire d'un échangeur thermique (évaporateur). La température dans le circuit primaire est un facteur primordial qui dépend d'un certain nombre de paramètres:

- champ des températures naturelles du sous-sol ;
- longueur cumulée et diamètre de la sonde ;
- vitesse du fluide caloporteur ;
- conductivité thermique du sous-sol (transfert de chaleur) ;
- circulations d'eaux souterraines (dans le cas où elles sont présentes).

- **LE CIRCUIT SECONDAIRE** : circuit de la pompe à chaleur (phase de compression)

Le compresseur de la PAC comprime ce fluide gazeux à basse température et le porte à haute température. En passant dans l'échangeur du circuit de chauffage, le fluide cède son énergie au circuit hydraulique de chauffage de l'habitation. Le fluide est ensuite refroidi en passant dans le détendeur, puis il repart vers l'échangeur du circuit primaire.

- **LE CIRCUIT TERTIAIRE** : de la pompe à chaleur au chauffage de l'habitation (phase de condensation)

Après s'être réchauffé au contact du fluide frigorigène de la PAC, le fluide de chauffage passe dans le réseau de conduites des planchers chauffants de l'habitation puis revient refroidi au condenseur de la PAC.

Le fonctionnement se déroule sur un cycle annuel ; ainsi pendant la période de chauffage, on injecte du froid et on extrait la chaleur du terrain. Pendant l'été, la sonde est généralement laissée au repos et le terrain se recharge naturellement par le flux géothermique. Pour de grands bâtiments dont il faut assurer la climatisation estivale (free cooling), il est possible d'extraire le froid et de réinjecter la chaleur du bâtiment dans le sous-sol.

3. ASPECTS LEGISLATIFS

Pour mémoire (déjà expliqué dans le chapitre 2.5.2), l'implantation de sondes géothermiques présente un certain risque pour l'environnement en général et plus particulièrement pour les eaux souterraines. En effet, durant la phase de forage, il y a un risque de connecter deux aquifères et de porter ainsi préjudice à la qualité et/ou à la quantité des eaux souterraines (art. 43, al. 3 LEaux). Les bases légales suivantes sont applicables fondamentalement aux sondes géothermiques :

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

De plus, ces installations contiennent des fluides pouvant porter préjudice aux eaux souterraines. L'Ordonnance du 1er juillet 1998 sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les polluer (OPEL) énumère la liste des liquides caloporteurs autorisés (cf. Annexe III). Ce sont autant de paramètres à prendre en compte lors de l'évaluation du potentiel géothermique d'une région.

3.1 BASE DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement des SGV qui dépend principalement des propriétés physiques, en particulier thermiques des roches, est rendu complexe en raison de la grande diversité des terrains rencontrés. Le tableau 3.1 donne des valeurs expérimentales des principales propriétés des roches :

Tableau 3.1: Base de dimensionnement* des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température

Propriétés hydrauliques et thermiques des principales roches meubles et cohérentes en Suisse selon la teneur en eau							
ROCHES	POROSITE	PERMEABILITE	CONDUCTIVITE THERMIQUE λ		CAPACITE CALORIFIQUE C_v		
	P [% vol]	K_D [ms ⁻¹]	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]		[MJm ⁻³ K ⁻¹]		
			Sec	Saturé	Sec	Saturé	
Roches meubles	Argile	50 – 70	$10^{-8} - 10^{-10}$	0,2 – 0,3	1,2 – 1,6	0,3 – 0,6	2,1 – 3,2
	Limon	30 – 50	$10^{-5} - 10^{-8}$	0,2 – 0,3	1,4 – 2,5	0,6 – 1,0	2,1 – 2,4
	Sable	20 – 30	$10^{-3} - 10^{-4}$	0,3 – 0,4	2,0 – 3,2	1,0 – 1,3	2,2 – 2,4
	Gravier	10 – 25	$10^{-1} - 10^{-3}$	0,3 – 0,4	2,5 – 3,3	1,2 – 1,6	2,2 – 2,4
Roches Cohérentes	Calcaire	0,5 – 5	$10^{-6} - 10^{-7}$	2,8 – 3,3	2,8 – 3,3	2,2 – 2,4	2,2 – 2,4
	Marne	20 – 40	$10^{-7} - 10^{-9}$	1,5 – 1,8	2,3 – 2,9	1,0 – 1,5	2,0 – 2,5
	Grès (molasse)	5 – 20	$10^{-4} - 10^{-6}$	1,8 – 3,5	2,3 – 4,0	1,8 – 2,4	2,3 – 2,6
	Dolomie	0,5 – 5	$10^{-6} - 10^{-7}$	2,8 – 3,8	3,5 – 4,5	2,6 – 2,8	2,7 – 3,0
	Granit	0,2 – 2	$10^{-7} - 10^{-8}$	2,6 – 3,8	2,7 – 3,8	2,3 – 2,5	2,3 – 2,5
	Gneiss	0,2 – 4	$10^{-7} - 10^{-8}$	2,4 – 3,3	2,5 – 3,5	2,3 – 2,5	2,3 – 2,5
	Schiste	0,5 – 1	$10^{-8} - 10^{-9}$	1,4 – 2,5	1,4 – 2,6	2,3 – 2,5	2,3 – 2,5
	Conglomérat	2 – 15	$10^{-5} - 10^{-6}$	1,5 – 2,0	2,9 – 3,3	1,7 – 2,2	2,2 – 2,6
Divers	Eau	---	---	---	0,58	---	4,19
	Laine minérale	---	---	0,04	---	0,1	---

*selon la directive SIA D025 et DO136 (VDI Richlinien 4640, part 2, 2001)

3.2 MESURES DE PRÉCAUTION ET DE SÉCURITÉ

La pose de sondes géothermiques verticales doit dans tous les cas faire l'objet d'une demande d'autorisation en matière de protection des eaux délivrée par le Service des transports et de l'énergie du canton de Fribourg.

L'admissibilité des installations dépend des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du sous-sol. La réglementation des zones de protection en matière de protection des eaux souterraines en dicte les précautions particulières notamment concernant la profondeur du forage ainsi que la présence éventuelle de sources de gaz naturel ou d'aquifères à caractère artésien.

L'installation de sondes géothermiques verticales n'est pas autorisée dans les cas suivants :

- certaines régions karstiques,
- les zones où l'eau souterraine est utilisée comme approvisionnement en eau potable, notamment dans les zones ou les périmètres de protection (zones S),
- les sites contaminés,
- les zones sujettes aux glissements de terrain ou attestées comme telles,
- les zones où il y a présence de construction souterraines (galeries, tunnels,...),
- les régions où la présence de gisements de gaz naturel est suspectée,
- les régions où il y a suspicion d'une nappe à caractère artésien.

MESURES DE PROTECTION DE L'INSTALLATION

Sitôt la phase de forage terminée et la pose de la SGV, il est indispensable d'étanchéifier l'espace laissé entre les parois du forage et la sonde, du pied du collecteur jusqu'à la surface à l'aide d'un coulis d'injection. Seules les matières liquides qui se solidifient par la suite sont recommandées, par exemple des mélanges de ciment/bentonite/opalite ou des suspensions équivalentes, assurent des conditions permanentes et stables du point de vue physique et chimique. Ceci garantit d'une part, une bonne étanchéité contre toutes infiltrations superficielles de liquides pouvant polluer les eaux souterraines, et d'autre part, une meilleure conductibilité thermique entre la sonde géothermique et la roche environnante.

Avant la mise en service de l'installation, il est impératif de contrôler le circuit afin de détecter d'éventuelles fuites de liquide. Toute fuite doit être immédiatement signalée à l'autorité compétente. Un contrôle périodique garantira un bon fonctionnement à long terme.

3.3 PRESCRIPTIONS CANTONALES

Des enquêtes réalisées dans le cadre de ce travail ont été menées auprès d'administrations cantonales ainsi qu'auprès d'entreprises spécialisées. Elles montrent que le cadre législatif régissant l'implantation des sondes géothermiques diffère fortement selon les cantons.

Bien qu'aucun accident significatif ne soit à déplorer jusqu'à aujourd'hui, suite à l'installation ou à l'utilisation de sondes géothermiques, beaucoup d'experts cantonaux restent très prudents quant à la sécurité et au risque d'impact sur l'environnement de ce type d'installation, notamment concernant les conditions de mise en place des sondes et leur suivi géologique et hydrogéologique. Beaucoup d'interrogations subsistent également quant à leur vieillissement et à la variation de densité du matériau PE.

4. CONTEXTE GEOLOGIQUE, STRUCTURAL ET HYDROGEOLOGIQUE DES ZONES ETUDIEES

4.1 INTRODUCTION

Le canton de Fribourg est composé de deux régions géologiquement différentes : le *Plateau molassique* qui appartient à la partie de l'avant-pays "autochtone" des Alpes, ainsi que les *Préalpes* qui sont constituées d'un empilement de nappes alpines charriées sur l'avant-pays. Celles-ci sont constituées de plusieurs unités géologiques de nature lithologique très différentes, leur arrangement ainsi que leur répartition restent fort complexes malgré les nombreux travaux effectués en géologie structurale et en sédimentologie.

Les sédiments détritiques d'âge tertiaire (Oligocène et Miocène) que constituent la Molasse sont abondamment représentés par d'épaisses couches de grès intercalés avec des marnes. Le tableau 4.1 décrit les subdivisions habituellement reconnues ainsi que leur nomenclature locale pour les régions étudiées.

Tableau 4.1: Subdivisions de la Molasse (Labhart T. & Decrouez D., 1997 ; Bertrand J, Hydrap, 1992)

PRESENCE REGIONALE	SUBDIVISION CLASSIQUE DE LA MOLASSE	DESIGNATION LOCALE	EPAISSEUR [M]		AGE (MA)	ECHELLE INTERNATIONALE			
	Molasse d'eau douce supérieure (OSM)			Molasse subalpine	5	MIOCÈNE	Tortonien Serravallien Langhien	"Tortonien"	
Bulle et Guin	Molasse marine supérieure (OMM)				16.3		"Helvétien" supérieur		
					22.5		Burdigalien		
Guin	Molasse d'eau douce inférieure (USM)	Couche de Gérignoz	2500			24	Aquitaniens		
		Couches de Chaffa	400			30	OLIGOCÈNE	Chattien	"Stampien"
		Couches de passage	0-30			30		Rupélien	
Bulle et Guin	Molasse marine inférieure (UMM)	Grès de Vaulruz Marnes de Vaulruz	25-30 250			36		Lattorfien	
		Formation de Cucloz							

4.2 RÉGION BULLE ET LA TOUR-DE-TRÊME

La géomorphologie du paysage actuel de la région de Bulle-La Tour-de-Trême est le résultat de l'action érosive des glaciers quaternaires associée à leurs dépôts morainiques, glaciolacustres ou fluvioglaciaires. Les principales rivières, la Trême et la Sionge, parcourent la région suivant des tracés qui s'alignent le plus souvent sur des accidents tectoniques et des limites d'unités.

4.2.1 Tectonique

L'esquisse géologique (figure 4.1) et tectonique (figure 4.2) montrent de grands décrochements subméridiens, sénestres recoupant différentes unités et les affectant dans leur structures supposant une déformation principale postérieure à la mise en place des nappes. Une zone de dislocation N-S est à signaler dans la région de Bulle et qui semble délimiter à l'est, la nappe du Gurnigel du massif de la Chia et à l'ouest, les terrains ultrahelvétiques de Bouleyres. Celle-ci fait apparaître en surface, une importante masse de Wildflysch. En direction du nord, cette zone d'accidents semble se prolonger dans le cours de la Sionge (légère flexure de la Molasse subalpine).

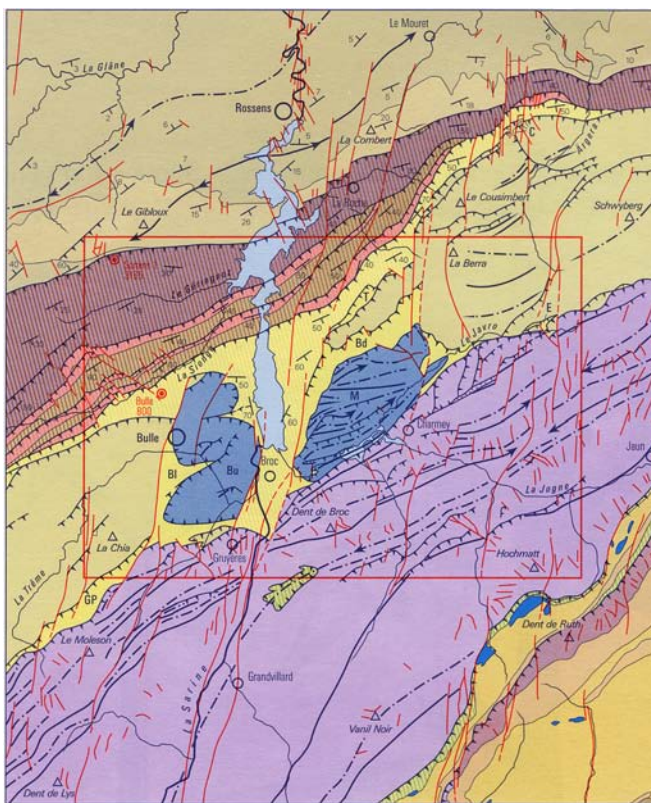


Figure 4.1 : Esquisse géologique de la région de Bulle-La Tour-de-Trême (A. Pugin, 1987)

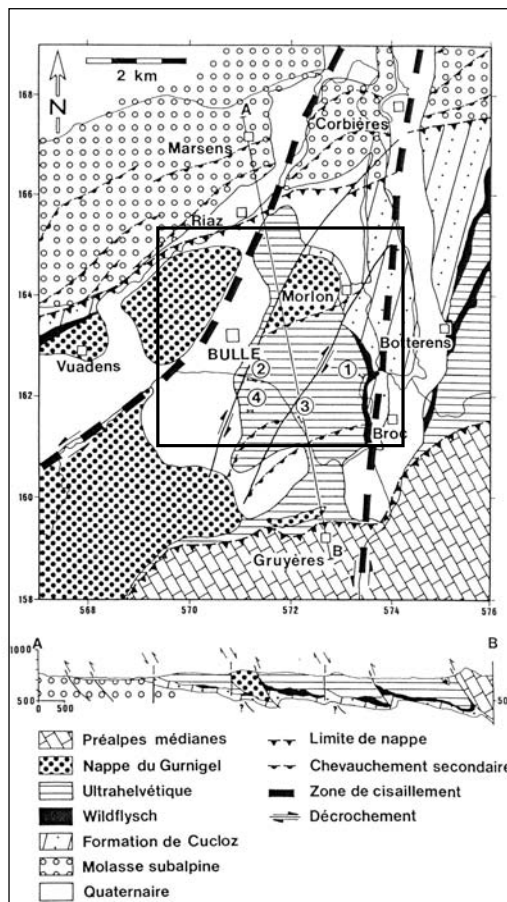


Figure 4.2 : Esquisse tectonique au 1 :200000 avec position du périmètre de la feuille Gruyères.

Les différentes unités géologiques représentées sur l'esquisse géologique (figure 4.1) sont détaillées sur la légende ci-dessous.

La nomenclature locale utilisée pour la Molasse subalpine est reprise de la carte géologique au 1 :25000 de la feuille Gruyères (OFEG, 2004, en préparation).

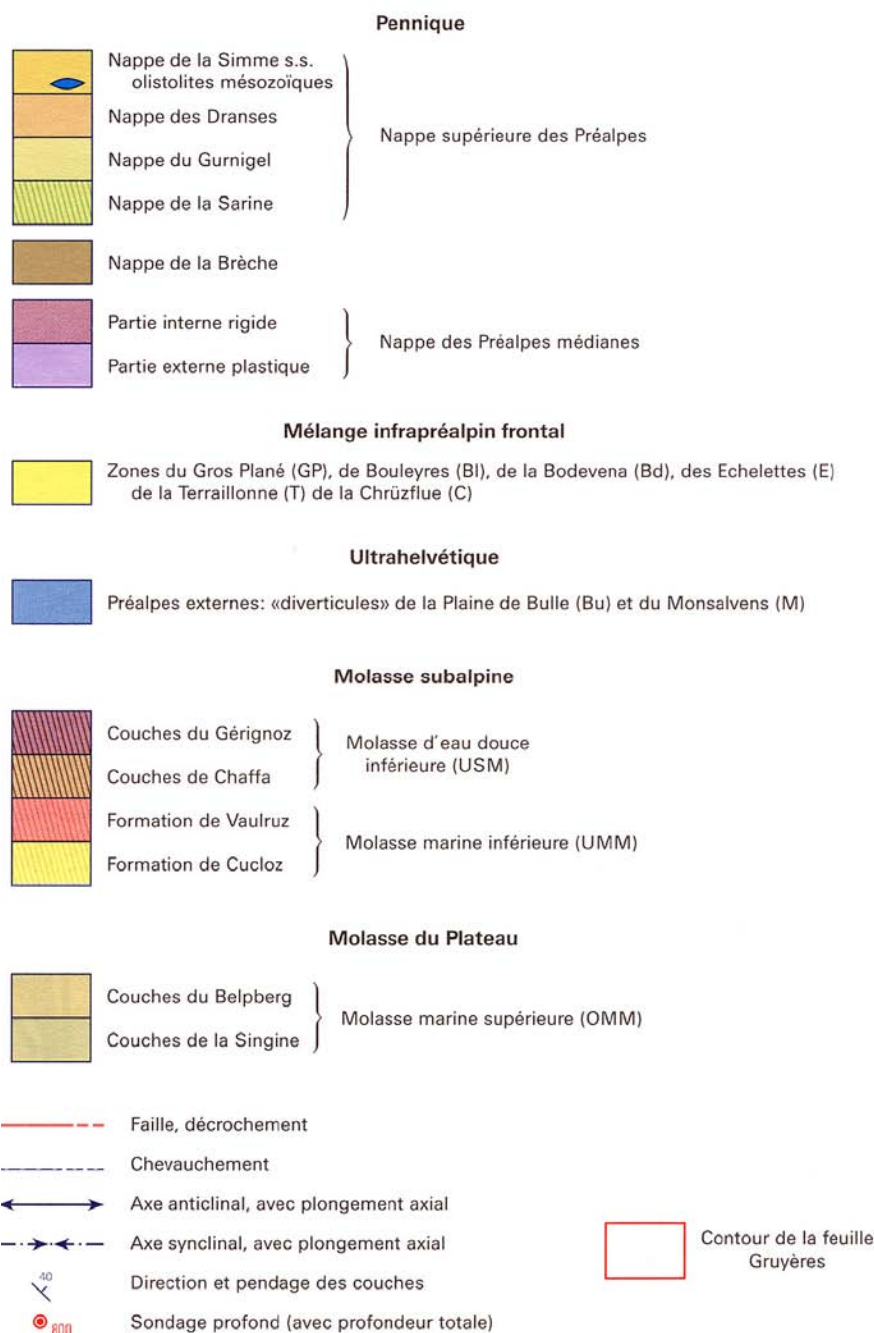


Figure 4.2 : Esquisse tectonique au 1 :200000 avec position du périmètre de la feuille Gruyères.

4.2.2 Géologie

La région de Bulle et La Tour-de-Trême se situe entre la bordure externe des Préalpes et la zone de contact avec le Plateau molassique. De manière générale, l'empilement des nappes allochtones, d'origine interne, chevauchent la Molasse autochtone en direction du NW. On distingue les unités suivantes, des plus externes aux plus internes :

- Molasse de Plateau
- Molasse subalpine (y compris flysch subalpin)
- Ultrahelvétique
- Mélange infrapréalpin
- Nappe des Préalpes médianes
- Nappe du Gurnigel
- Nappe de la Simme

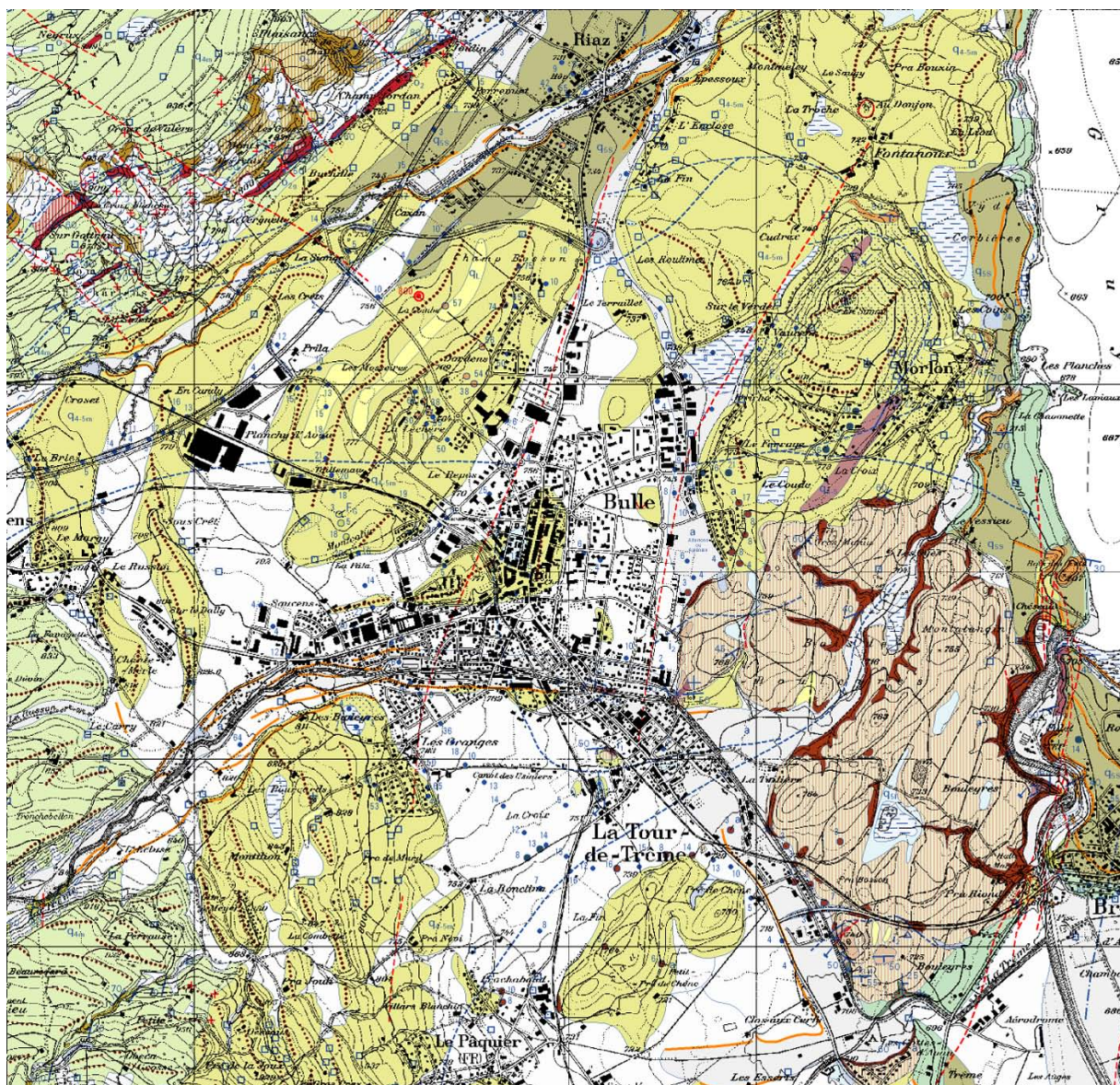


Figure 4.3 : Carte géologique au 1 :25000 de la région de Bulle-Tour-de-Trême (OFEG, 2004, en préparation)

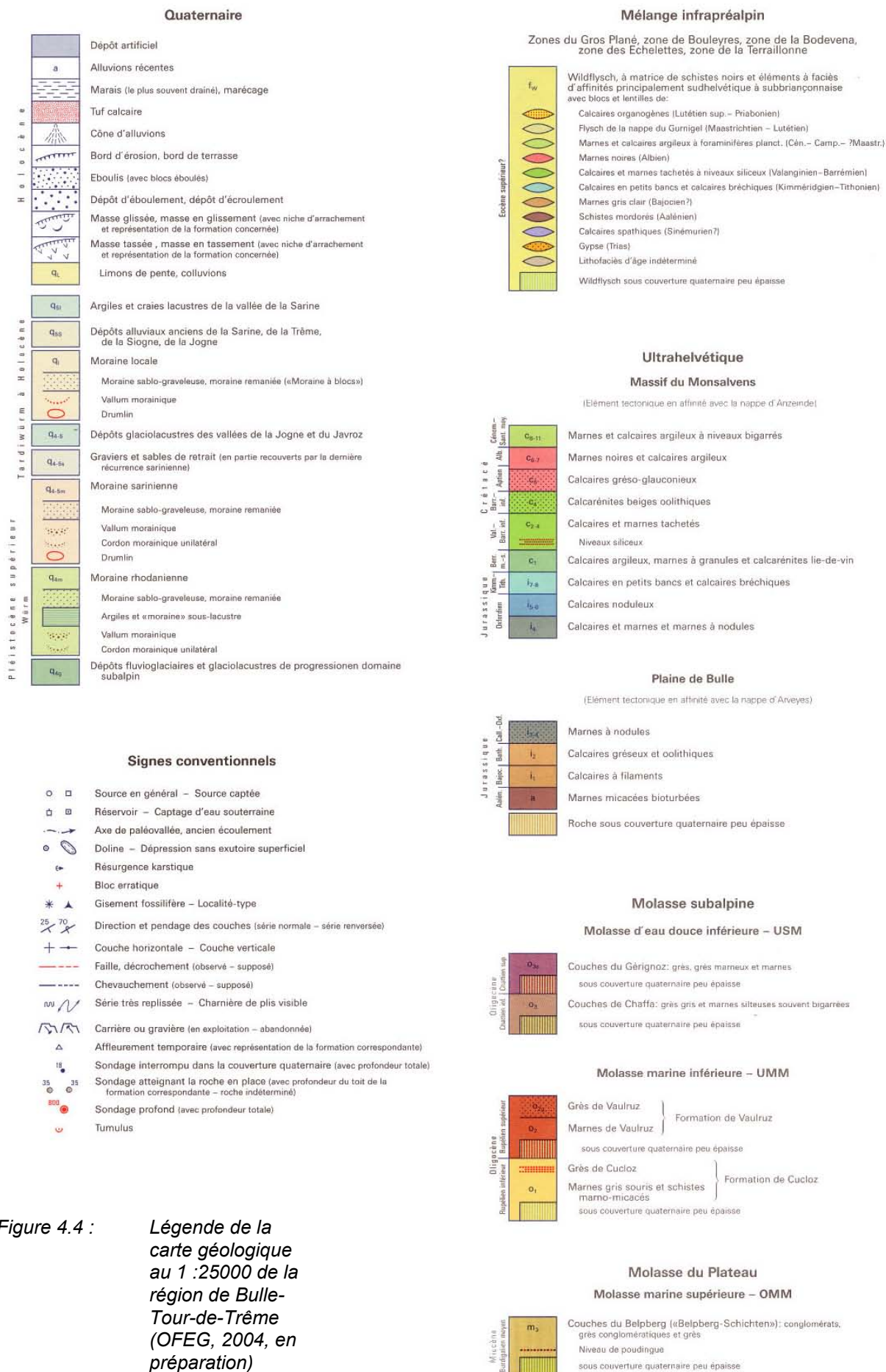


Figure 4.4 : Légende de la carte géologique au 1 :25000 de la région de Bulle-Tour-de-Trême (OFEG, 2004, en préparation)

La stratigraphie de la région de Bulle et la Tour-de-Trême est composée de :

- Quaternaire
- Molasse marine supérieure (OMM)
- Molasse marine inférieure (UMM)
- Ultrahelvétique (HEV : abréviation utilisée lors de cette étude)

REMARQUE : Certaines descriptions géologiques suivantes font référence à des levés lithologiques des forages réalisés dans les zones d'étude (la première partie du code indique le lieu : Bu=Bulle ; TT=Tour-de-Trême ; Du=Düdingen ; Ta=Tafers et la seconde partie, le numéro du forage. Par exemple : Bu_35 signifie le forage no 35 de Bulle).

Le Quaternaire

L'histoire quaternaire de la région est principalement documentée par des observations, émanant du développement économique de la région et provenant notamment de l'implantation de sondes géothermiques, l'exploitation de gravières, de prospections géophysiques, de sondages destinés à la construction d'infrastructures routières (route de contournement de Bulle A189) qui fournissent de précieuses connaissances du sous-sol. Ces données sont collectées par différents bureaux privés ou collectivités publiques et leur existence n'est malheureusement pas toujours connue. Les sédiments quaternaires occupent une grande superficie de cette région, sous forme de dépôts glaciolacustres, fluvioglaciaires, glaciaires ou alluviaux qui sont d'épaisseurs très variables, de 10 à 70 m environ. La complexité de leur géométrie et l'absence de datation rendent l'interprétation des terrains quaternaires très problématique.

Tableau 4.2: Subdivisions stratigraphiques des terrains glaciaires et postglaciaires.

AGE	EPOQUE	LITHOLOGIE	ORIGINE
10000	POST WURM	Alluvions actuelles	
		Alluvions des terrasses et cône de déjection élevé	
		Moraine graveleuse	
80000	WURM dernière glaciation	Moraine argileuse	Glacier de la Sarine
		Graviers interstadiaires	
		Moraine graveleuse	
		Moraine de fond	Glacier du Rhône
120000	RISS-WURM interglaciaire	Graviers de progression	
		Graviers fluviatils sariniens	
		Argiles à lignites, graviers et sables	
300000	RISS Avant dernière glaciation	Argiles stratifiées à galets striés, graviers et sables, lambeaux de	
		moraine de fond	
		Moraine de fond	Glacier rhodanien
	PRE-RISS	Graviers fluviatils sariniens	

Les premiers dépôts quaternaires de la région proviennent de la fonte du dernier stade maximum würmien (23000 BP), où la région de Bulle était localisée sur la confluence des glaciers de la Sarine et du Rhône dont une branche s'écoulait du sud-ouest vers le nord-est (Hantke, 1980). Jäckli (1962) a estimé que l'épaisseur de glace pouvait atteindre 500 à 700 m, ce qui exerçait une action érosive très importante, surcreusant ainsi de nombreuses vallées et pouvant entailler d'importants sillons dans le substratum molassique.

Pléistocène supérieur

Sous cette dénomination sont classés plusieurs types de dépôts :

- Les *dépôts fluvio-glaciaires et glaciolacustres de progression*. Sous forme d'accumulations de graviers, sables, limons et argiles. Ils sont le plus souvent recouverts par la moraine du Würm et localisée dans le fond de la plaine ainsi que sur les flancs des vallées.
- La *moraine rhodanienne* que l'on rencontre dans le bassin surcreusé de Bulle. Le matériel serait constitué d'éléments provenant du glacier du Rhône et au fur et à mesure que l'on se dirige vers le débouché de la vallée de la Sarine, d'éléments préalpins.
- La *moraine sarinienne* quant à elle, se distingue essentiellement sur des critères morphologiques (orientation de vallums) et pétrographiques (nature des éléments).
- Une réavancée du glacier de la Sarine s'est produite après le retrait du glacier du Rhône suite à un réchauffement climatique ou à une diminution des forces de frottement à la base du glacier. C'est la récurrence sarinienne. Plusieurs phases de retrait du glacier de la Sarine ont été mises en évidence par Pugin (1989), sept au total selon le même auteur de Vuadens à Bulle. Ces retraits ont laissé une succession de vallums morainiques qui sont perpendiculaires à ceux laissés par le glacier du Rhône (Mornod 1946, 1949). Non loin de la zone étudiée, sur le versant NE-E au lieu-dit « La Chia » (coordonnées 568412/159312/1309) sont représentés des dépôts du dernier maximum würmien du glacier sarinien où ce dernier rencontrait le glacier du Rhône. La limite a dû fluctuer au cours du temps et est transitionnelle entre la moraine typiquement rhodanienne et celle typiquement sarinienne.

Pléistocène supérieur-Holocène

- Les *graviers et sables de retrait* sont également des dépôts fluvioglaciaires et/ou glaciolacustres plutôt grossiers, sédimentés lors des périodes de fonte des glaces würmiennes.
- Les *dépôts alluviaux anciens de la Sarine, de la Trême, de la Sionge et de la Jogne* se trouvent aujourd'hui, sous forme de terrasses qui sont connectées à des cônes de déjection (composante deltaïque). Ces dépôts d'origine deltaïque peuvent être très épais (une dizaine de mètres), provenaient d'anciens ruisseaux et rivières qui se jetaient dans le paléo-lac de la région de Bulle qu'avait laissé le retrait des glaciers. Cette unité correspond aux « alluvions des terrasses et cônes de déjection élevés » de Mornod (1947) et présent dans les forages Bu14 et TT14 rencontrés lors de cette étude.

Holocène

Les *dépôts holocènes* présents sur cette zone d'étude sont d'une part, représentés par des alluvions récentes à actuelles, qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur (forages Bu19 et 30 interprétés lors de cette étude). Elles sont constituées de graviers, sables et argiles où elles forment la partie distale du cône d'alluvion.

Il faut aussi mentionner les dépôts artificiels sous forme de remblais qui ne sont parfois pas négligeables (comblement de gravières, construction routières,...). Toutefois, ils ne représentent que de faibles épaisseurs sur les forages étudiés.

LA MOLASSE

Les géologues ont reconnu depuis longtemps les alternances de molasse marine et d'eau douce, qui sont le résultat des fluctuations du niveau marin et du mouvement vertical du paléo-bassin molassique. La molasse marine se caractérise généralement par des couches relativement épaisses de grès, d'argiles et de marnes bien stratifiées qui recèlent quelques fossiles (gastéropodes, bivalves,...), alors que la molasse d'eau douce comporte des grès plus grossiers et plus fins, des marnes ainsi que des argiles rouges avec quelques fossiles de mammifères terrestres et végétaux d'origine tropicale.

Molasse marine supérieure (OMM)

Burdigalien moyen

Couramment appelé "Helvétien" par plusieurs auteurs, cette unité appartient à la molasse de Plateau. Elle se présente sous forme de grès grossiers gris-vert, très durs et plaquetés à la base, friables et localement conglomératiques au sommet. Son épaisseur est estimée à 25-30 m. Les galets présents atteignent en général 10 à 30 cm, provenant principalement des diverses nappes calcaires et de flyschs des Préalpes. Ces dépôts sont associés à des variations d'apports détritiques fluviaux et progradants dans une mer peu profonde.

Molasse marine inférieure (UMM)

Rupélien

Cette unité-ci se divise en deux formations :

- Formation de Cucloz, *Rupélien inférieur*

Les anciennes nomenclatures : "Grès de Culoz", "couches de Villarvolard", flysch subalpin ou subhelvétique sont à bannir. Longtemps rattachée aux Préalpes externes, MORNOD (1945, 1949) apporta les preuves d'une origine parautochtone et celle-ci fut finalement regroupée avec la molasse subalpine. LATELTIN (1988) confirme la position basale de cette formation au sein de la Molasse marine inférieure. La limite inférieure est marquée par un contact tectonique chevauchant sur la formation de Vaulruz ou sur les couches de Chaffa, alors que la limite supérieure est quant à elle marquée par le chevauchement de la nappe du Gurnigel. L'épaisseur totale de la Formation de Cucloz est estimée à plus de 300 m (WEIDMANN, en prép.). La Formation détritico-turbiditique de Cucloz comprend trois faciès principaux : les marnes gris souris (CORMINBOEUF, 1959), les schistes marno-micacés et les Grès de Cucloz. Le milieu de dépôt est interprété comme une sédimentation de front deltaïque, turbidites fines de "pro-delta", accumulations grossières de chenaux et lobes gréseux.

- Formation de Vaulruz, *Rupélien supérieur*

Cette formation comprend les marnes de Vaulruz (base de la formation) et les grès de Vaulruz (sommet de la formation).

L'Ultrasubalpin

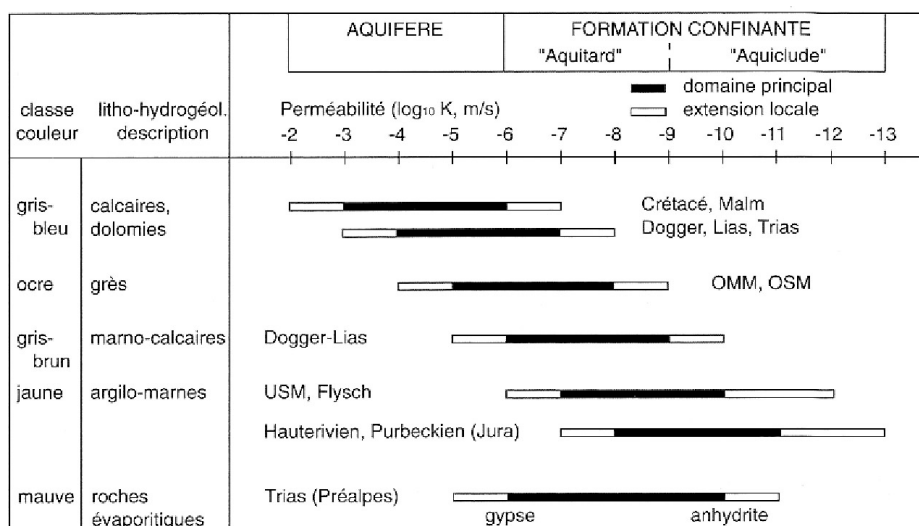
Cette unité est désignée au front des Préalpes par le terme de Préalpes externes. La Plaine de Bulle (désigné avec ce terme sur la carte géologique, OFEG 2004) est présente sur la zone étudiée et se compose de schistes marno-silteux noirs, déposés en milieu anoxique et d'âge aalénien.

4.2.3 Hydrogéologie

Les principales informations concernant l'hydrogéologie de la région étudiée proviennent des synthèses de Pasquier & al. (1999) et sont présentes dans la notice explicative de la carte hydrogéologique au 1 :100000 de la feuille Sarine (figure 4.5). En règle générale, tous les terrains à perméabilité élevée à moyenne, scellés par des couches imperméables, peuvent receler une nappe. C'est surtout le cas pour des dépôts fluvioglaciaires et glaciolacustres, des alluvions anciennes, des cônes de déjection et dans une moindre mesure la moraine graveleuse. On notera la présence particulière d'une nappe d'eau souterraine s'écoulant vers le nord, au sein de la terrasse de Vuadens. Celle-ci est formée par la partie distale d'un ancien bras du cône de déjection de la Trême.

Dans le tableau 4.3, une synthèse des valeurs de perméabilités des roches cohérentes qui ont été classées en fonction de leur type lithologique et de leur perméabilité probable (classes litho-hydrogéologiques).

Tableau 4.3: Domaines de perméabilité des roches cohérentes (utilisé pour la feuille Sarine, 1999)



PERMÉABILITÉ ÉLEVÉE

CALCAIRES ET DOLOMIES

On mentionnera les calcaires et brèches du Malm (Kimméridgien et Portlandien) de la région des Alpes et de la Tour-de-Trême.

PERMÉABILITÉ HÉTÉROGÈNE, MOYENNE A FAIBLE

GRÈS ET CONGLOMÉRATS, AVEC ALTERNANCES DE MARNES OU DE SCHISTES

Dans la région étudiée, ce sont des grès de la Molasse marine supérieure (OMM) et accessoirement dans la Molasse subalpine où ils sont intercalés avec des marnes.

PERMÉABILITÉ FAIBLE A TRES FAIBLE

MARNES, ARGILES ET ALTERNANCE DE MARNES ET GRÈS

C'est essentiellement dans la Molasse d'eau douce inférieure (USM) ainsi que dans la Molasse subalpine avec diverses formations terrestres et marines (couches de Vaulruz), que l'on trouve des marnes et argiles avec alternance de grès. Ce qui est plus rare dans l'USM supérieure représentée par l'Aquitainien.



Figure 4.5 : Extrait de la carte hydrogéologique de la feuille Sarine au 1 :100000

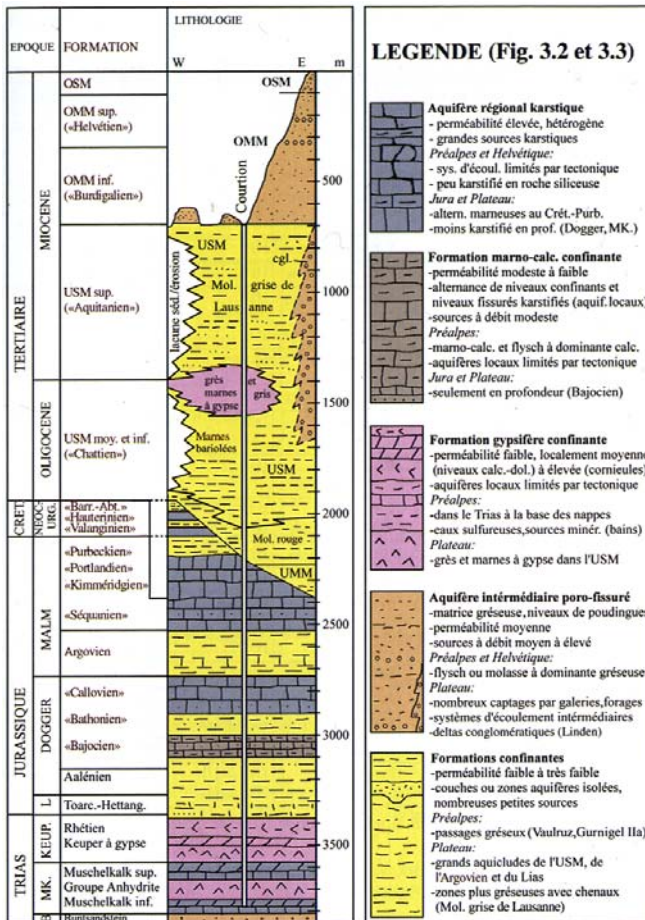


Figure 4.6: Profils hydrogéologiques synthétique du Plateau suisse. D'après Fischer & Luterbacher, 1963 ; Gwinner, 1971 ; Kiraly, 1973 ; Frei & al., 1974 ; Matthey, 1986b ; Schlunegger & al., 1993 ; Python, 1996 ; Bouzelboudjen & al., 1997b ; Gabus, 1999.

(sans Quaternaire ; L=Lias, MK=Muschelkalk, B=Buntsandstein, cgl=conglomérats)

4.3 RÉGION GUIN-TAVEL

4.3.1 Géologie et tectonique

Morphologiquement, on distingue les culminations qui sont en général des collines molassiques orientées généralement SW-NE, tandis que les dépressions appartiennent à des terrains quaternaires.

LE QUATERNAIRE

Suite aux derniers mouvements orogéniques pliocènes, s'installe une longue période de pénéplation au cours duquel se forme un réseau fluvial. Les vallées se surcreusent et atteignent de grandes profondeurs estimées par endroit à 200 m. Au cours de la glaciation du Riss, le matériel sous-glaciaire colmate ces thalwegs. Puis, au cours de l'interglaciaire Riss-Würm, la Sarine et la Singine ont coulé dans des lits larges de centaines de mètres en confluent dans le bassin de Guin. Quant au bassin de Tavel, tout montre que les alluvions préwürmiennes sont contemporaines de celles de Fribourg. Simultanément, il se forme un lac dans le bassin de Tavel .

La Molasse

Molasse marine supérieure (OMM)

Burdigalien

Les divers types pétrographiques du Burdigalien diffèrent assez peu les uns des autres. Ce sont essentiellement des grès avec intercalations de marnes.

Molasse d'eau douce inférieure (USM)

Aquitaniens

Cette unité est visible sur les hauteurs de la Stockera, du Brunnenbergrain et de Rohr au SE et à l'E de Tavel. De nature très variable, les sédiments aquitaniens recèlent tous les termes pétrographiques compris entre les grès et les marnes. Les grandes assises gréseuses possèdent de grandes bigarrures, ce qui en fait leur particularité. Les variations latérales de ce faciès rendent malaisé l'interprétation de profils stratigraphiques, même sur de faibles distances. Les dépôts fluviaux et lacustres font défaut, conduisant à interpréter pour l'Aquitaniens, une sédimentation fluvio-terrestre en eaux stagnantes ou marécageuses.

4.3.2 Hydrogéologie

Cette région comporte essentiellement des aquifères constitués de dépôts fluvioglaciaires, semblables aux alluvions mais se différenciant par le fait que ce sont d'anciennes vallées périglaciaires qui ont été comblées et qui sont en grande partie sèches ou non exploitables pour l'eau potable. Les perméabilités sont élevées à moyennes en dehors des fonds de vallées. Souvent recouverte de moraine peu perméable, la nappe peut être mise en charge et présente par endroit un caractère artésien. Les eaux sont en général stockées en profondeur et de ce fait bien protégées contre une pollution de surface. Les roches molassiques constituent le deuxième type d'aquifère présent dans cette région. Seuls les grès appartenant à la Molasse d'eau douce inférieure et les grès de la Molasse marine supérieure peuvent contenir de l'eau en suffisance. L'altération superficielle provoque la dissolution du ciment calcaire sur une dizaine de mètres d'épaisseur, conférant ainsi à la roche une porosité d'interstices favorisant le stockage d'eau souterraine.

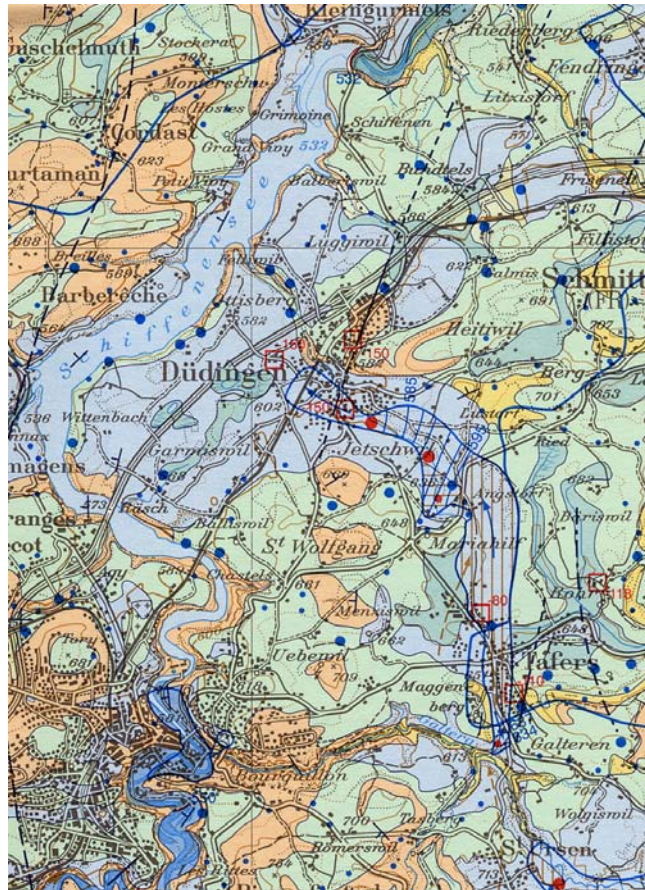


Figure 4.7 : Extrait carte hydrogéologique de la feuille Sarine au 1 :100000



5. IMPLANTATION DES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES

5.1 INTRODUCTION ET PRINCIPE DE BASE

Comme mentionné précédemment, le potentiel géothermique des premières couches géologiques dépend fortement de la conductivité thermique du sous-sol et de la présence d'eau. Or, il n'existe de manière générale que peu de données précises disponibles en raison notamment de la difficulté des mesures. Lors de cette étude, l'ensemble des données (localisation des SGV existantes, géologie, hydrogéologie) ont été exploitées pour construire les différentes cartes visant à évaluer le potentiel géothermique régional. Les informations concernant les SGV existantes ainsi que la délimitation des zones de protection des eaux souterraines proviennent du Service de l'environnement du canton de Fribourg. L'extrait des cartes géologiques utilisées ont été délivrées par l'OFEG. La carte hydrogéologique est un extrait de la feuille « Sarine » à l'échelle 1:100000.

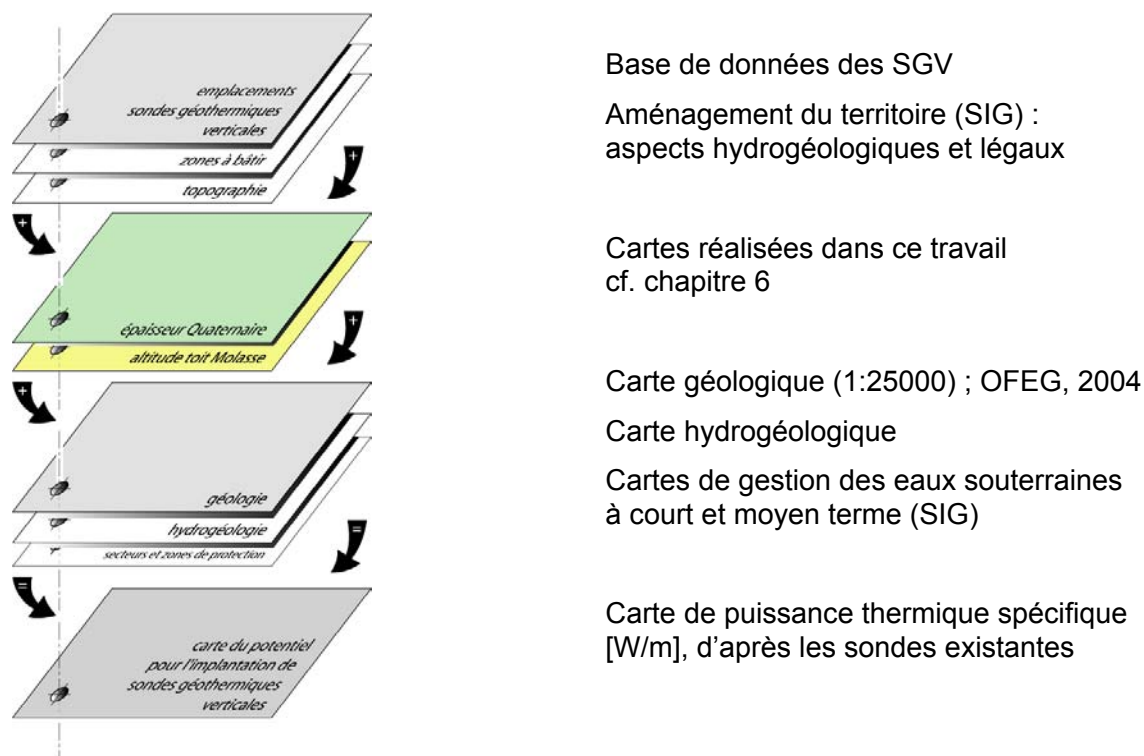


Figure 5.1 : Structure du SIG et superposition des critères sélectionnés par couches (layers)

Cette cartographie multiparamètres, appelé Système d'informations géographiques (SIG) a été réalisée avec le logiciel ArcView. Ce SIG se trouve sur le CD-R joint avec le rapport. Il constitue un outil d'aide à la décision, notamment en matière d'évaluation des demandes ainsi que pour la délimitation des zones favorables, respectivement défavorables lors de l'implantation de sondes géothermiques verticales. En comparaison d'une carte classique imprimée, ce type d'outil offre une plus grande souplesse d'utilisation, notamment dans le choix d'affichage des différentes couches (figure 5.1) et permet une mise à jour des données quasi instantanée. Les cartes géologique et hydrogéologique sont, à l'heure actuelle, sous un format de type « image », c'est-à-dire, que l'utilisateur n'a pas la possibilité d'effectuer des requêtes au sein des différents horizons géologiques par exemples. Sitôt les versions digitalisées disponibles, il sera très aisé de les remplacer afin de pouvoir disposer d'un outil encore plus efficace.

5.2 CRITÈRES D'IMPLANTATION

Plusieurs critères sont à prendre en considération avant toute démarche pour l'implantation d'une SGV. Ils peuvent être classés en deux catégories.

Critères imposés : contraintes dictées par les aspects législatifs

- **Hydrogéologie** La loi sur la protection de eaux souterraines (LEaux) ainsi que la loi sur l'environnement (LPE) interdisent toute implantation dans les zones de protection S1 et S2. Concernant la zone de protection S3, une étude géologique complémentaire peut être exigée par le Service de l'environnement afin d'estimer les risques éventuels encourus par l'implantation de ce type d'installation. Les critères diffèrent de manière très importante suivant le type d'aquifère présent, dépendant notamment de la perméabilité de celui-ci. S'il y a risque de court-circuit entre aquifères lors de la phase de forage, l'implantation de SGV est strictement interdite.
- **Géotechnique** La loi interdit de la même manière, toute implantation de SGV dans des zones classées comme instables. Ceci afin de prévenir tout risque de rupture de la sonde pouvant entraîner une pollution des eaux souterraines.
- **Géologie** S'il y a présomption de couches contenant du gaz (par ex. radon), ce qui est fréquent dans les grès molassiques subalpins. Aucune restriction particulière ne devrait restreindre l'autorisation d'exploiter des sondes géothermiques dans les formations pouvant contenir des couches gonflantes. Néanmoins, leur présence peut mettre en danger l'étanchéité de la sonde par écrasement du tube.
- **Occupation du sol** Contraintes liées à la surface de la parcelle (quartiers résidentiels, affectation du terrain).

Critères naturels : paramètres favorables à la performance d'une SGV

- **Hydrogéologie** La présence d'eau est un facteur très intéressant si la vitesse de migration de celle-ci n'est pas trop importante. Une perméabilité faible sera plus intéressante du point de vue thermique.
- **Géologie** Sous l'hypothèse simplificatrice que toutes les formations sont dépourvues d'eau, la puissance thermique spécifique de la Molasse est beaucoup plus importante que celle du Quaternaire (critère lithologique).

Autre outil d'aide à la décision : l'organigramme de décision

Il existe différents outils d'aide à la décision, notamment sous forme d'organigrammes, permettant l'évaluation des sites pour l'implantation de sondes géothermiques. Ce type de procédure tient compte de plusieurs critères permettant d'apprécier les caractéristiques du milieu où pourraient être implantés des SGV, ainsi que les impacts qu'auraient de telles installations sur les eaux souterraines. A ces paramètres viennent s'ajouter les lois et règlements visant à protéger les captages et les eaux souterraines.

Un exemple de procédure est décrit sur la figure 5.2. De cette méthode résulte en partie la carte réalisée sur support SIG montrant les possibilités d'implantation des SGV dans les zones étudiées. Il est important d'adapter la procédure à chaque région suivant le type d'aquifère rencontré, l'épaisseur de la couverture (vulnérabilité aux pollutions) et le pouvoir de filtration de cette même couverture.

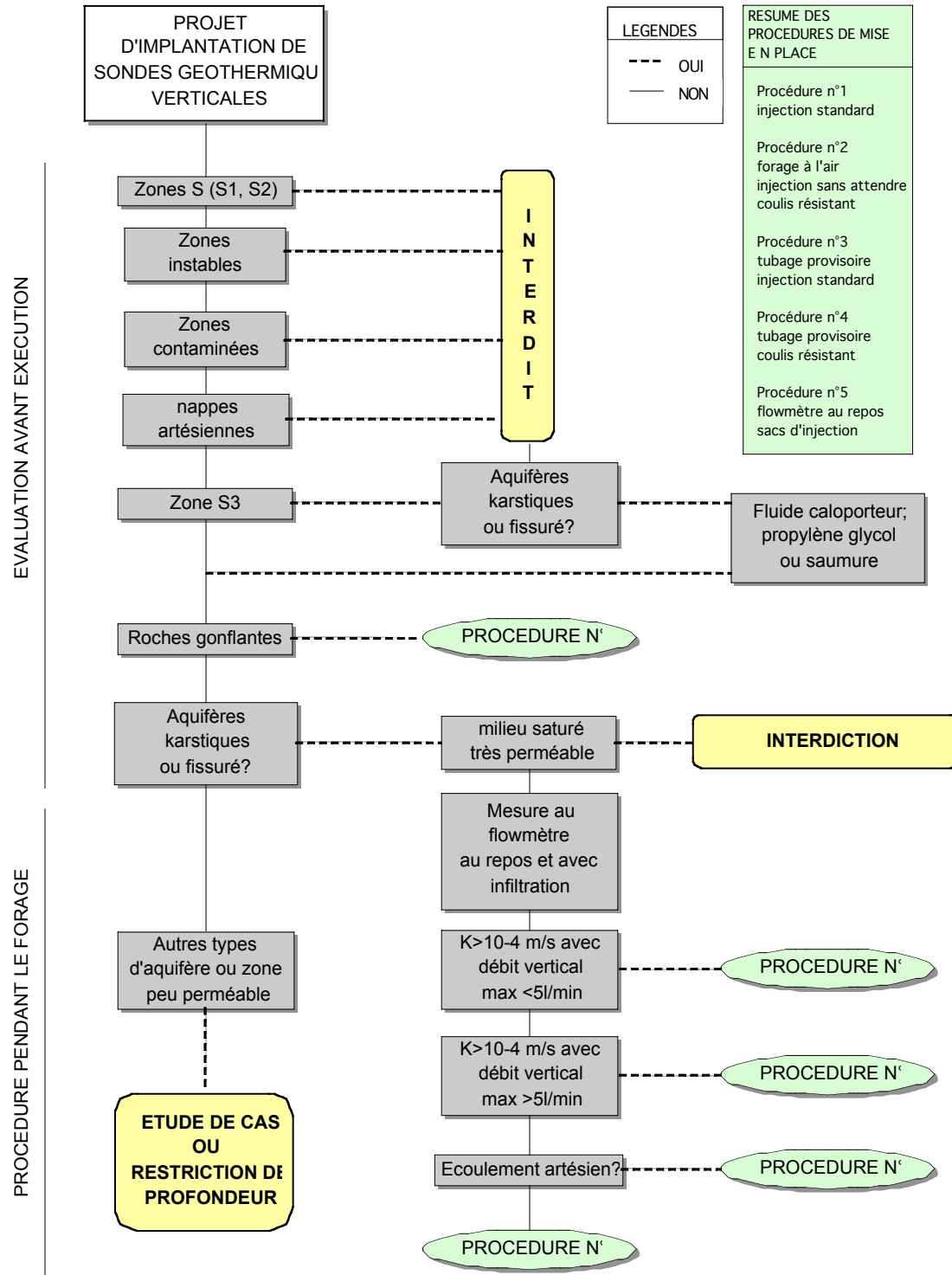


Figure 5.2 : Organigramme de décision pour l'implantation de sondes géothermiques (modifié d'après Parriaux, 1998)

5.3 EVALUATION DU POTENTIEL THERMIQUE

5.3.1 Données lithologiques

Les unités géologiques rencontrées dans les zones étudiées forment les trois groupes suivants : **Quaternaire**, **Molasse** (divisée en Molasse marine supérieure, OMM ; Molasse marine inférieure, UMM et Molasse d'eau douce, USM) et **Ultraselvétique** (seulement pour la région de Bulle-La Tour-de-Trême). Les différentes classes lithologiques sont basées sur des critères granulométriques. Cette classification est inspirée des travaux de Leu & al. (1999) et notamment du programme de calcul des propriétés thermiques du bassin molassique suisse SwEWS des mêmes auteurs.

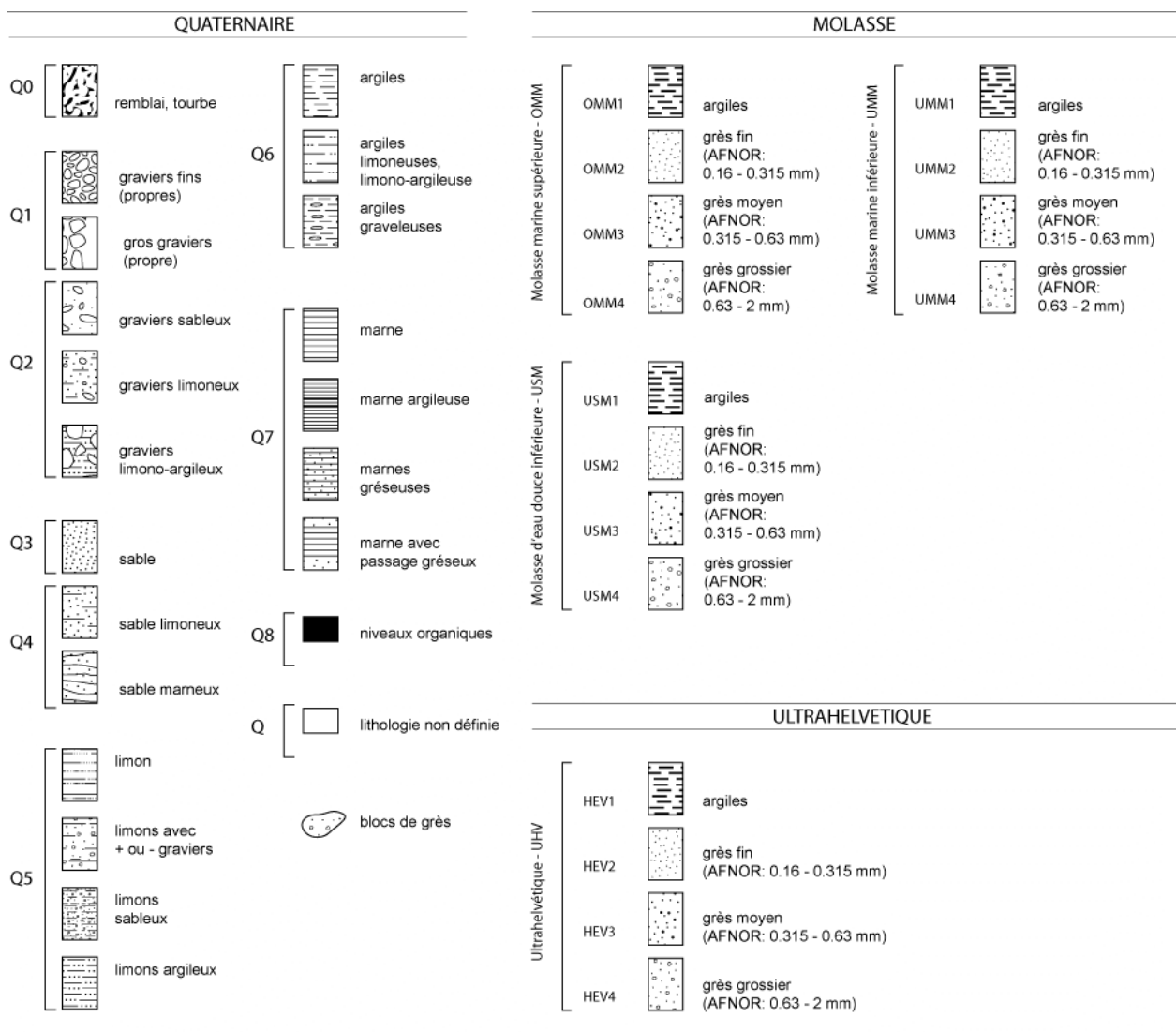


Figure 5.3 : Classification des catégories lithologiques

Les données lithologiques sont issues des profils de forages, de qualité variable, interprétés par différents bureaux. Au total, 53 logs de forages pour la région de Bulle-La Tour-de-Trême et 164 logs de forages pour la région de Guin-Tavel, ont été dépouillés, interprétés et informatisés, soit au total 217 levés de forages. Pour chaque profil, la position des marqueurs principaux, soit l'altitude de la topographie, la base du Quaternaire qui est par définition égale à l'altitude du toit de la Molasse a été relevée (cf. exemple de levé géologique informatisé dans

l'Annexe I). La première étape fut donc de réinterpréter l'ensemble des logs lithologiques des forages en suivant cette classification et en s'inspirant de la littérature (cf. figure 5.8). Ceci constitue la base de données lithologiques (cf. figure 5.9) comprenant pour chaque horizon, son épaisseur et son code lithologique correspondant (Q : Quaternaire ; OMM, UMM et USM : Molasse ; UHV : Ultrahelvétique). Les différentes étapes citées précédemment sont expliquées de façon plus détaillée dans le chapitre 5.3.3.

Les dépôts quaternaires sont caractérisés par une granulométrie très variable et sans grande continuité latérale. Les dépôts molassiques sont souvent décrits de façon très approximative sans aucune indication granulométrique. Dans ce cas, il est difficile de distinguer différentes catégories. Le tableau 5.1 souligne les différences géologiques des deux régions étudiées.

Tableau 5.1: Comparaison pour chaque commune des épaisseurs des trois grandes classes lithologiques définies

	QUATERNAIRE [m]			MOLASSE [m]			ULTRAHELVETIQUE [m]		
	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX
Bulle	10	48	117	0	65	168	0	46	76
Tour-de-Trême	2	63	104	0	49	53	26	47	69
Guin (Düdingen)	0	27	74	0	90	220			
Tavel (Tafers)	0	12	90	0	89	182			

5.3.2 Conductivité thermique et puissance thermique de soutirage

Les valeurs de puissance thermique spécifique proposées sont tirées en partie de la littérature et d'autre part des mesures de Leu & al. (1999) dans la base de données du programme SwEWS. Il ressort que les valeurs des propriétés thermiques sont nettement plus élevées en présence d'eau dans le terrain.

La figure 5.4 montre la relation quasi linéaire qui existe entre la puissance thermique spécifique en [W/m] et la conductivité thermique en [W/mK] pour les roches habituellement rencontrée sur le bassin molassique suisse. La granulométrie des marnes étant faible à très faible, les circulations d'eau au sein de celles-ci sont très réduites et par conséquent la puissance thermique spécifique soutirable peu élevée.

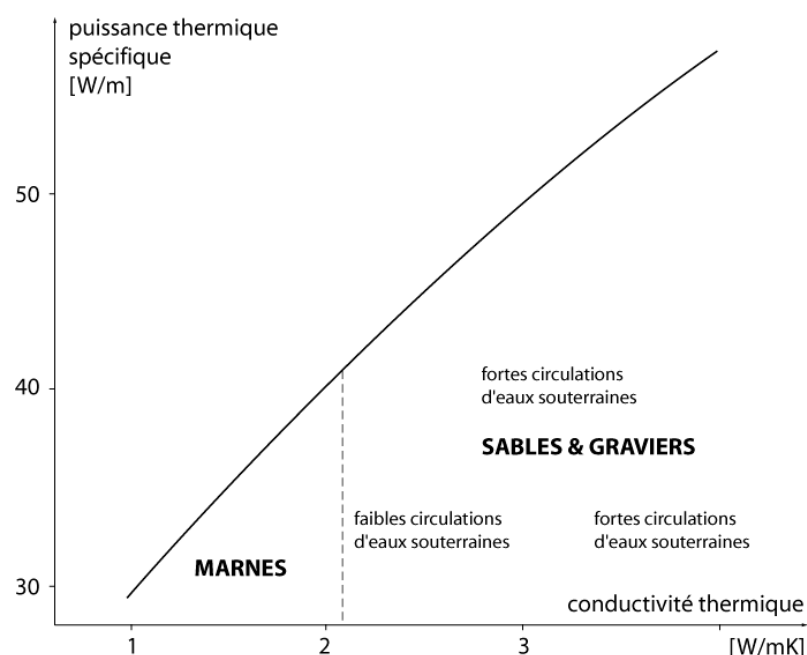


Figure 5.4 : Relation puissance thermique de soutirage-conductivité thermique (Sanner, 1999).

Au sein de la Molasse, les écarts de conductivité thermique sont très faibles. Ce sont des valeurs indicatives qui peuvent être modifiées en tout temps par l'utilisateur. Les (cases de droite sur fond vert) à l'aide d'un menu déroulant. La création d'un fichier regroupant les valeurs de conductibilité thermiques, les valeurs de puissance de soutirage servent de données-sources pour évaluer la puissance thermique spécifique recherchée par le programme de calcul (chapitre 5.3.3).

La figure 5.5 indique la relation linéaire qui existe entre la conductivité thermique et la puissance thermique spécifique en fonction du nombre d'heures de soutirage et de l'existence ou non d'une migration d'eau souterraine.

CONDUCTIBILITE DU TERRAIN λ [W/m K]		PUISSANCE DE SOUTIRAGE [W/m]					
		avec ECS - 2100h/a		sans ECS - 1800h/a			
		sans migration d'eau souterraine	avec migration d'eau souterraine	sans migration d'eau souterraine	avec migration d'eau souterraine		
	0.1	19.4		20.7			
	0.2	20.6		22.0			
	0.3	21.8		23.2			
	0.4	22.9		24.4			
	0.5	24.1		25.7			
	0.6	25.3		26.9			
	0.7	26.4		28.1			
	0.8	27.6		29.3			
	0.9	28.7		30.5			
1	1.0	29.8	35.0	31.6	36.6		
2	1.1	30.9	36.2	32.8	37.8		
3	1.2	32.1	37.3	34.0	39.0		
4	1.3	33.2	38.5	35.1	40.2		
5	1.4	34.2	39.6	36.2	41.3		
6	1.5	35.3	40.6	37.3	42.4		
7	1.6	36.3	41.7	38.4	43.4		
8	1.7	37.3	42.7	39.4	44.5		
9	1.8	38.3	43.8	40.5	45.6		
10	1.9	39.4	44.8	41.6	46.7		
11	2.0	40.4	45.8	42.6	47.7		
12	2.1	41.4	46.8	43.7	48.7		
13	2.2	42.4	47.8	44.7	49.7		
14	2.3	43.4	48.8	45.6	50.7		
15	2.4	44.3	49.7	46.6	51.6		
16	2.5	45.3	50.6	47.6	52.5		
17	2.6	46.2	51.5	48.5	53.4		
18	2.7	47.1	52.4	49.4	54.3		
19	2.8	47.9	53.2	50.3	55.1		
20	2.9	48.8	54.0	51.2	55.9		
21	3.0	49.7	54.8	52.0	56.7		
22	3.1	50.5	55.6	52.9	57.5		
23	3.2	51.3	56.4	53.7	58.3		
24	3.3	52.1	57.2	54.7	59.1		
25	3.4	52.9	57.8	55.3	59.8		
26	3.5	53.7	58.6	56.3	60.5		
27	3.6	54.4	59.3	56.8	61.1		
28	3.7	55.2	60.0	57.5	61.8	64.7	
29	3.8	55.9	60.6	58.3	62.5	65.5	
30	3.9	56.6	61.2	59.0	63.1	63.1	66.1
31	4.0	57.3	61.7	59.7	63.8	63.7	66.8

Figure 5.5 : Puissances thermiques de soutirage en fonction de la conductibilité thermique du terrain, ECS = eau chaude sanitaire (Sanner, 1999).

La figure 5.6 montre un extrait de la base de données « PARAM » où figure les données thermiques en fonction de la classification lithologique établie (figure 5.3). Ce sont les valeurs sur fond vert qui sont prises en compte par le programme de calcul décrit dans le chapitre 5.3.3.

SOURCES: QUATERNAIRE: VDI 4640, 2000
 USM: SONDAGE DE COURTIGN (572410189420599); SONDAGE DE ROMANENS (564200167400947)
 OMM: SONDAGE DE ROMANENS (564200167400947)


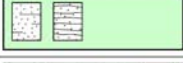


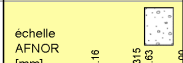
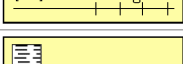



CODE	LITHOLOGIE	VARIABLE	SATURATION	VALEURS PROPOSEES					VALEURS CHOISIES		
				CONDUCTIBILITE THERMIQUE [W/m K]		PUISSANCE DE SOUTIRAGE [W/m]		DENSITE [kg/m ³]	PUISSANCE DE SOUTIRAGE [W/m]		
				MINIMUM	MAXIMUM	MINIMUM	MAXIMUM	MOYENNE	MINIMUM	MAXIMUM	
	Q0	remblai, tourbe	-	0.2	0.7	20.6	26.4			20.6	20.6
	Q1	gravier	propre	0.3	0.4	21.8	22.9			21.8	22.9
	Q2	gravier	sableux	0.1	0.3	19.4	21.8			19.4	21.8
	Q3	sable	propre	0.3	0.4	21.8	22.9	1500		21.8	22.9
	Q4	sable	limoneux	0.1	0.3	19.4	21.8			19.4	21.8
	Q5	limon	propre avec des graviers sableux, argileux	0.2	0.3	20.6	21.8	1800		20.6	21.8
	Q6	argiles	"propre" limoneuse graveleuse	0.2	0.3	20.6	21.8			20.6	21.8
	Q7	marnes	"propre" argileuse greseuse	1.5	1.8	35.3	38.3			35.3	38.3
	Q8	niveaux organiques								20.0	20.0
	OMM1	marnes	sec	2.1	2.5	41.4	45.3	2450		41.4	45.3
	OMM2	grès fin	sec	2.4	2.9	44.3	48.8	2450		44.3	48.8
	OMM3	grès moyen	sec	2.5	3.0	45.3	49.7	2400		45.3	49.7
	OMM4	grès grossier	sec	2.4	2.8	44.3	47.9	2300		44.3	47.9
	UMM1	marnes	sec	2.1	2.4	41.4	44.3			41.4	44.3
	UMM2	grès fin	sec	2.4	2.9	44.3	48.8			44.0	48.0
	UMM3	grès moyen	sec	2.0	2.6	40.4	46.2			40.4	46.2
	UMM4	grès grossier	sec	2.4	2.8	44.3	47.9			44.0	47.0
	USM1	marnes	sec	1.9	2.3	39.4	43.4	2000		39.4	43.4
	USM2	grès fin	sec	2.2	2.5	42.4	45.3	2184		42.4	45.3
	USM3	grès moyen	sec	2.2	2.6	42.4	46.2	2250		42.4	46.2
	USM4	grès grossier	sec	2.0	3.0	40.4	49.7	2036		40.4	49.7

Figure 5.6 : Extrait de la base de données »PARAM «

5.3.3 Description du programme de calcul

Comme mentionné précédemment, pour mieux caractériser le potentiel géothermique d'une région ou d'une future implantation de SGV, il est primordial d'estimer avec la plus grande précision possible, la puissance thermique spécifique de soutirage exprimée en [W/m] des horizons composant le sous-sol. Dans cette optique, Un programme de calcul a été élaboré pour estimer ce paramètre, en tant qu'outil d'aide à la décision pour la planification et le dimensionnement d'installations géothermiques à faible profondeur.

Ce nouveau programme calcule de manière automatique les valeurs estimées de la puissance thermique spécifique [W/m] minimum et maximum. Il est possible d'évaluer ce paramètre soit pour l'ensemble des forages existants soit dans le but de dimensionner une future installation dont on connaît la lithologie. Par défaut, toutes les valeurs sont exprimées pour des horizons dépourvus d'eau. Il est possible, en tout temps, de modifier ce paramètre si l'utilisateur dispose d'une information hydrogéologique. Les valeurs sont alors modifiées automatiquement.

Le programme de calcul lie les différentes sources d'informations nécessaires comme : les valeurs de puissance (figure 5.5), la base de données « PARAM » (figure 5.6) et la base de données lithologique (figure 5.9), pour évaluer la puissance thermique spécifique. L'affichage a été réalisé de manière à pouvoir visualiser l'ensemble des facteurs pris en compte dans le calcul :

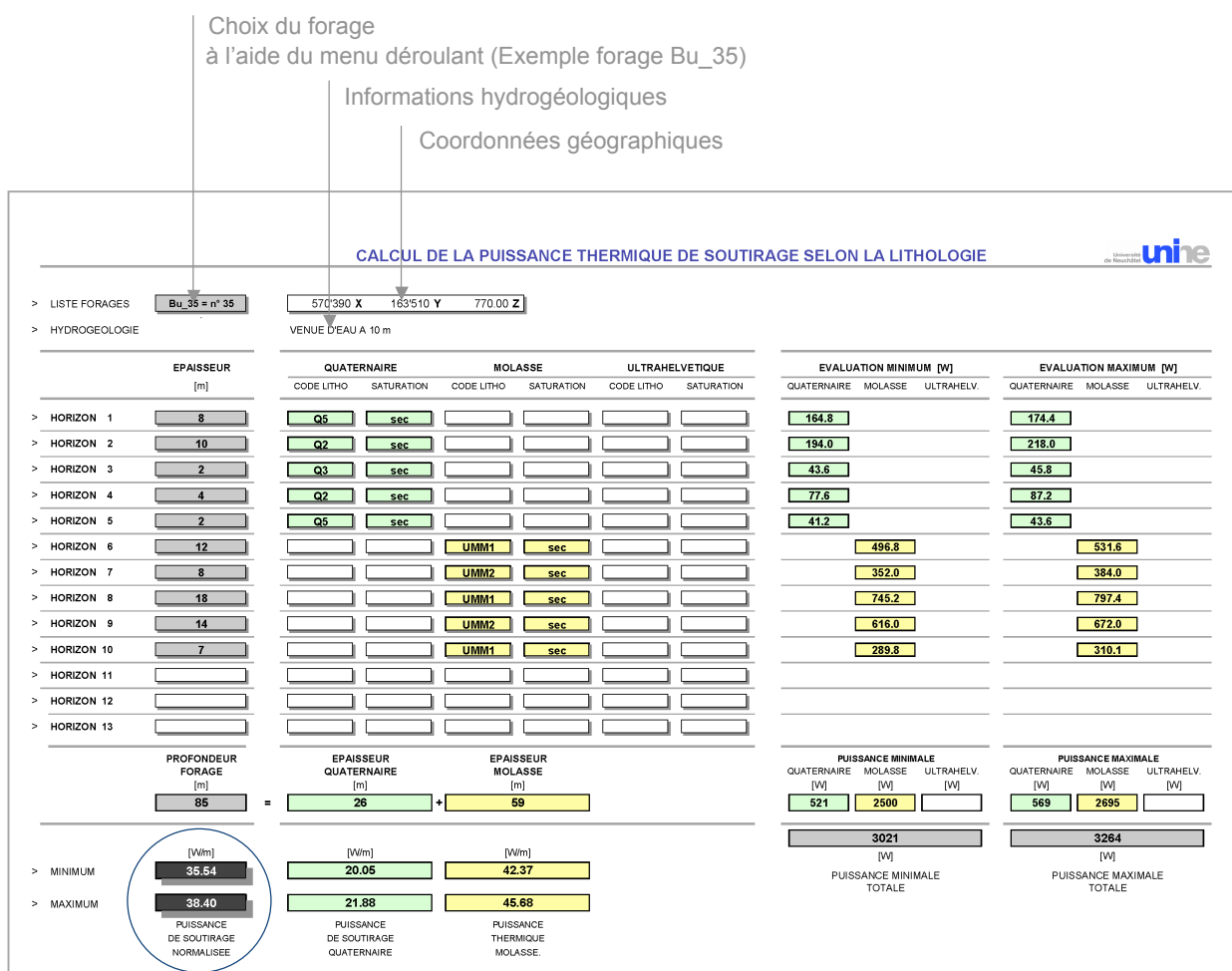


Figure 5.7 : Représentation de la fenêtre «Excel» du programme de calcul (exemple forage Bu_35)

Affichage de la puissance thermique spécifique minimum et maximum en [W/m] pour le forage Bu_35.

Après avoir réinterprété le levé lithologique (étape A, figure 5.8) en utilisant la classification proposée (codage), ces informations ont été introduites dans la base de données lithologiques (étape B, cf. figure 5.9).

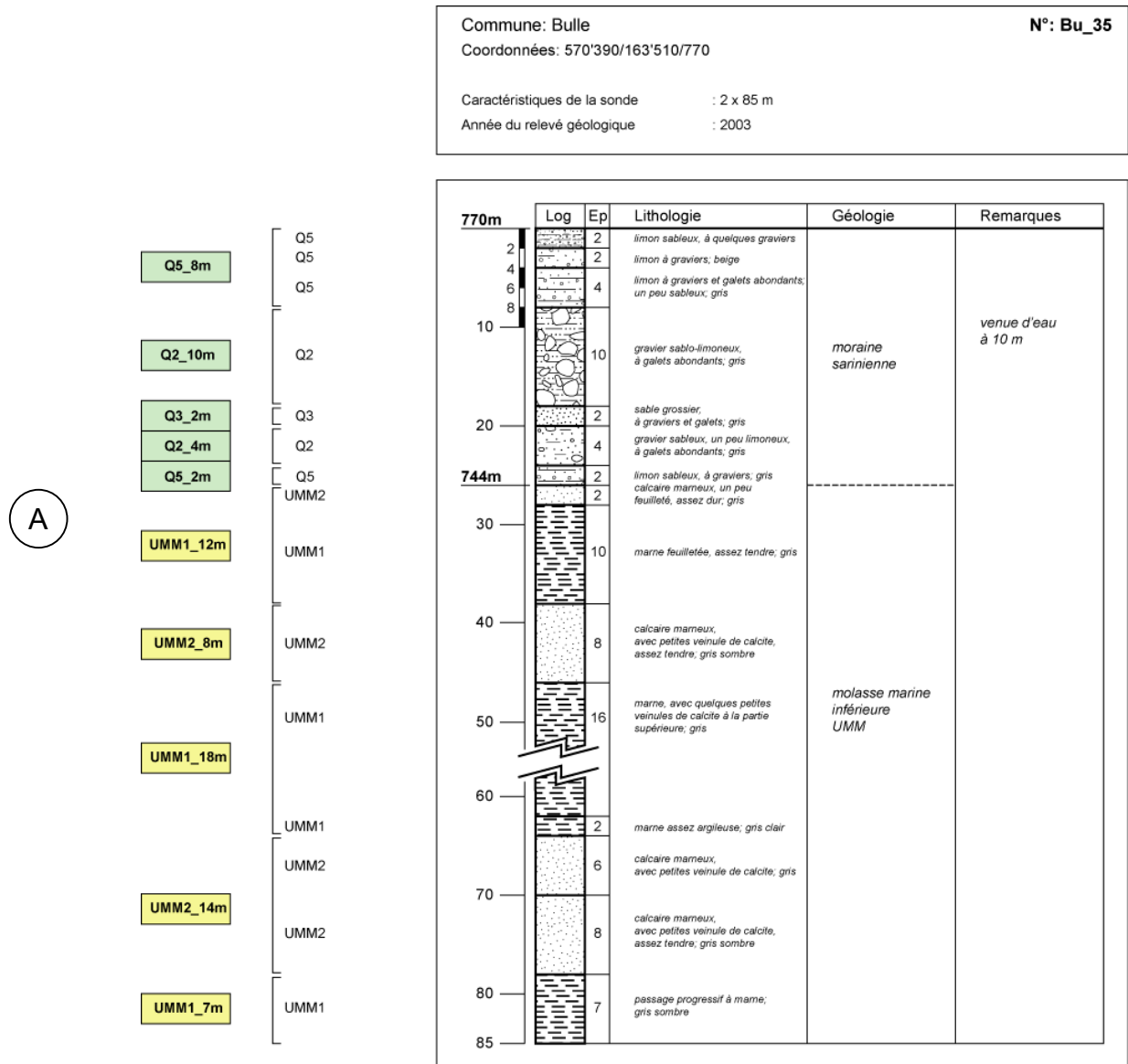
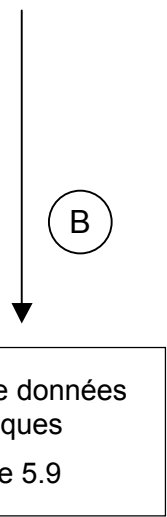


Figure 5.8 : Levé lithologique Bu_35 informatisé (échelle 1:500 ; ici réduite)



CODAGE LITHOLOGIQUE

FORAGE NO	HORIZON 1		HORIZON 2		HORIZON 3		HORIZON 4		HORIZON 5		HORIZON 6		HORIZON 7		HORIZON 8		HORIZON 9		HORIZON 10		HORIZON 11		HORIZON 12		HORIZON 13		
	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	CODE	EP [m]	
BuL_01	O5	2	O2	42	O6	2	O2	4	O6	10																	
BuL_02	O5	20	O2	34	O5	11																					
BuL_03	O5	2	O2	6	O1	2	OMM1	8	OMM2	6	OMM1	10	OMM2	12	OMM1	2	OMM2	2									
BuL_04	O0	2	O2	2	O1	6	O5	6	O5	6	OMM1	18	OMM1	4	OMM1	8											
BuL_05	O5	2	O2	18	O8	4	O2	20	O1	12	O8	6	O2	13													
BuL_06	O5	24	O1	4	O2	2	O5	20																			
BuL_07	O5	6	O1	8	O2	60	HEV1	21			HEV3	31															
BuL_08	O5	2	O2	8	O1	4	O2	8	O5	12	HEV1	20															
BuL_09	O5	4	O2	14	O1	4	O2	8	HEV1	20																	
BuL_10	O5	65																									
BuL_11	O5	24	HEV2	56																							
BuL_12	O5	50																									
BuL_13	O2	2	O1	26	O2	6	O1	4	UMM1	32																	
BuL_14	O2	28	O5	27	O4	23	O8	7	O5	32																	
BuL_15	O2	9	O4	30	O8	3	O5	23																			
BuL_16	O5	2	O1	10	O2	8	O4	4	O4	12	O5	4	O	20													
BuL_17	O5	2	O2	11	HEV3	17	HEV1	2	HEV3	27																	
BuL_18	O2	4	O1	12	O2	8	O2	8	O5	14																	
BuL_19	O4	3	O3	0	O2	11	UMM2	16	O5	14																	
BuL_20	O2	4	O2	28	O1	2	UMM1	4	O5	22																	
BuL_21	O5	33	UMM1	28	UMM2	2	UMM1	4																			
BuL_22	O5	2	O2	8	O1	6	O2	20	O1	19																	
BuL_23	O5	2	O2	34	UMM2	104																					
BuL_24	O5	6	O2	12	O1	15	UMM1	18	UMM2	8	UMM1	16	UMM2	8	UMM1	24	UMM2	8	UMM1	36							
BuL_25	O6	5	O2	15	O1	15	UMM1	95																			
BuL_26	O2	6	O5	8	O2	6	O4	8	O5	6	O2	12	O5	24	UMM2	30											
BuL_27	O5	2	O2	6	O4	4	O2	20	UMM1	28																	
BuL_28	O5	4	O6	18	O2	8	O5	3	UMM1	42																	
BuL_29	O3	9	O5	36	O	15	O4	25																			
BuL_30	O5	18	O2	13	UMM1	44																					
BuL_31	O5	6	O2	4	O5	6	O2	16	O3	4	O1	2	O5	4	UMM1	64	UMM2	20	UMM1	72	UMM2	12					
BuL_32	O5	2	O2	2	O1	6	O2	28	UMM1	92																	
BuL_33	O5	4	O1	14	O2	6	O1	6	O5	4	O2	6	O1	6	UMM2	46	UMM1	4	UMM2	39							
BuL_34	O5	8	O2	10	O3	2	O2	4	O5	2	UMM1	12	UMM2	8	UMM1	18	UMM2	14	UMM1	7							
BuL_35	O5	8	O1	6	O2	6	O5	8	O2	24	O5	20	HEV1	48													
BuL_36	O2	8	O1	6	O2	6	O5	8	O2	24	O5	20	HEV1	48													
BuL_37	O5	24	O2	4	O6	16	HEV1	76																			
BuL_40	O5	25	O2	9	O5	30	O6	11	UMM1	125																	

Figure 5.9 : Extrait de la base de données lithologique de la commune de Bulle

5.3.4 Fiche d'information du forage

Après avoir estimé la puissance spécifique d'un forage à l'aide du programme de calcul (cf. chapitre 5.3.3), l'utilisateur a la possibilité de consulter la fiche d'information relatif à ce forage. Il serait aisément possible de la compléter ou d'y apporter des modifications selon les besoins de l'utilisateur. Cette fiche montre les informations importantes présentes dans la base de données de façon claire et pratique (figure 5.10).

- **Informations générales :** commune, coordonnées, parcelle, code du forage selon la nouvelle numérotation, ancien numéro, année de réalisation, requérant.
- **Informations géologiques :** épaisseur du Quaternaire, de la Molasse et de l'Ultraschelvétique, profondeur du forage.
- **Informations du forage:** bureau de géologue, date du relevé géologique, entreprise de forage.
- **Informations hydrogéologiques :** si connues, profondeur des venues d'eau.
- **Informations sur la SGV :** longueur, diamètre, nombre de sondes, nom de l'installateur.
- **Informations sur la puissance :** valeur de la puissance spécifique moyenne minimum/maximum du forage [W/m].
- **Recherche de forages environnants :** possibilité d'effectuer une requête de proximité selon un rayon [en mètres] choisi par l'utilisateur (figure 5.11).

FICHE D'INFORMATIONS SUR LE FORAGE

> REGION **Bulle**

> N° FORAGE **Bu_35**

> ANCIEN N° FORAGE PAS D'ANCIEN NUMERO

> ANNEE REALISATION **2003**

> REQUERANT **Simple Asa + Michael**

> PARCELLE N° PAS D'INFORMATION

570'390 X **163'510** Y **770** Z

> EPAISSEUR QUATERNAIRE

> EPAISSEUR MOLASSE **26** [m]

> EPAISSEUR ULTRAHEL.V.

> PROFONDEUR FORAGE **85** [m]

> BUREAU GEOLOGUE **Hydrap**

> LEVE GEOLOGIQUE **00.01.00**

> ENTREPRISE FORAGE **Augsburger forages**

> HYDROGEOLOGIE **VENUE D'EAU A 10 m**

> SONDE **2x 85 m**

> PUISSANCE THERMIQUE MINIMUM **35.54** [W/m]

> PUISSANCE THERMIQUE MAXIMUM **38.40** [W/m]

> INSTALLATEUR **FormuHabitat et M. Richard, Bulle**

> FORAGES ENVIRONNANTS

REGION	FORAGE	PROFONDEUR [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	DISTANCE [m]	DIAMETRE DE RECHERCHE
Bulle	Bu_19	70	570'350	163'800	767	98.49	
Bulle	Bu_21	60	570'339	163'638	766	137.79	
Bulle	Bu_22	60	570'275	163'547	770	120.81	
Bulle	Bu_25	140	570'390	163'570	767	60.00	
Bulle	Bu_26	130	570'320	163'620	768	130.38	
Bulle	Bu_28	60	570'284	163'569	766	148.72	
Bulle	Bu_33	130	570'400	163'600	770	90.55	

Figure 5.10 : Représentation de la Fiche d'information du forage (exemple pour forage Bu_35)

Requête de proximité

Il est possible d'effectuer une recherche sur les forages environnants selon le critère de la distance la plus courte [en mètres].

La figure 5.11 montre les points importants de la marche à suivre :

- Cliquer le bouton « *diamètre de recherche* ».
- Choisir « *Personnalisé* ».
- Dans la fenêtre « *Filtre automatique personnalisé* », choisir « *est inférieur à* ».
- Indiquer le rayon de recherche [en mètres] dans la cellule de droite.
- Choisir « *différent de* » pour ne pas afficher le forage-source en tapant « 0 » dans la cellule de droite.
- La liste des forages (No, profondeur, coordonnées et distance) s'affiche automatiquement.

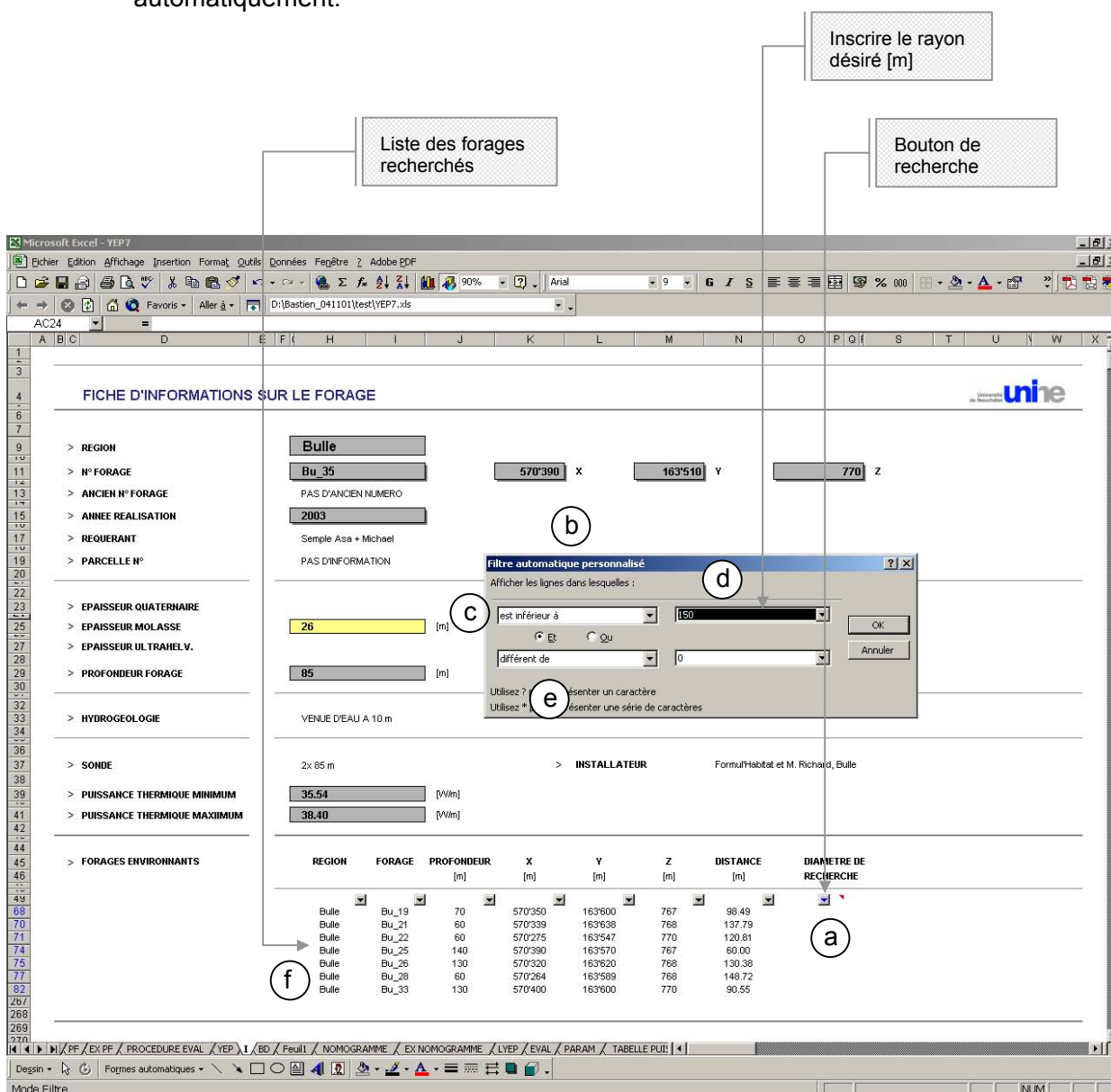


Figure 5.11 : Etapes pour la requête de proximité à partir de la fiche d'information du forage.

6. PRESENTATION DES RESULTATS

6.1 RÉGION BULLE-LA TOUR-DE-TRÈME

Le périmètre de la région Bulle-Tour-de-Trême initialement délimitée par les coordonnées 568000-575000 et 160000-166000, a été réduit aux coordonnées 569000-573000 et 161000-165000 par souci de précision quant à l'extrapolation des différentes cartes réalisées. Ce nouveau domaine représente une surface de 16 km² totalisant 37 forages interprétés pour la commune de Bulle et 15 pour la commune de la Tour-de-Trême. La profondeur des forages varie entre 50 et 150 m et leur position est représentée sur la figure 6.1.

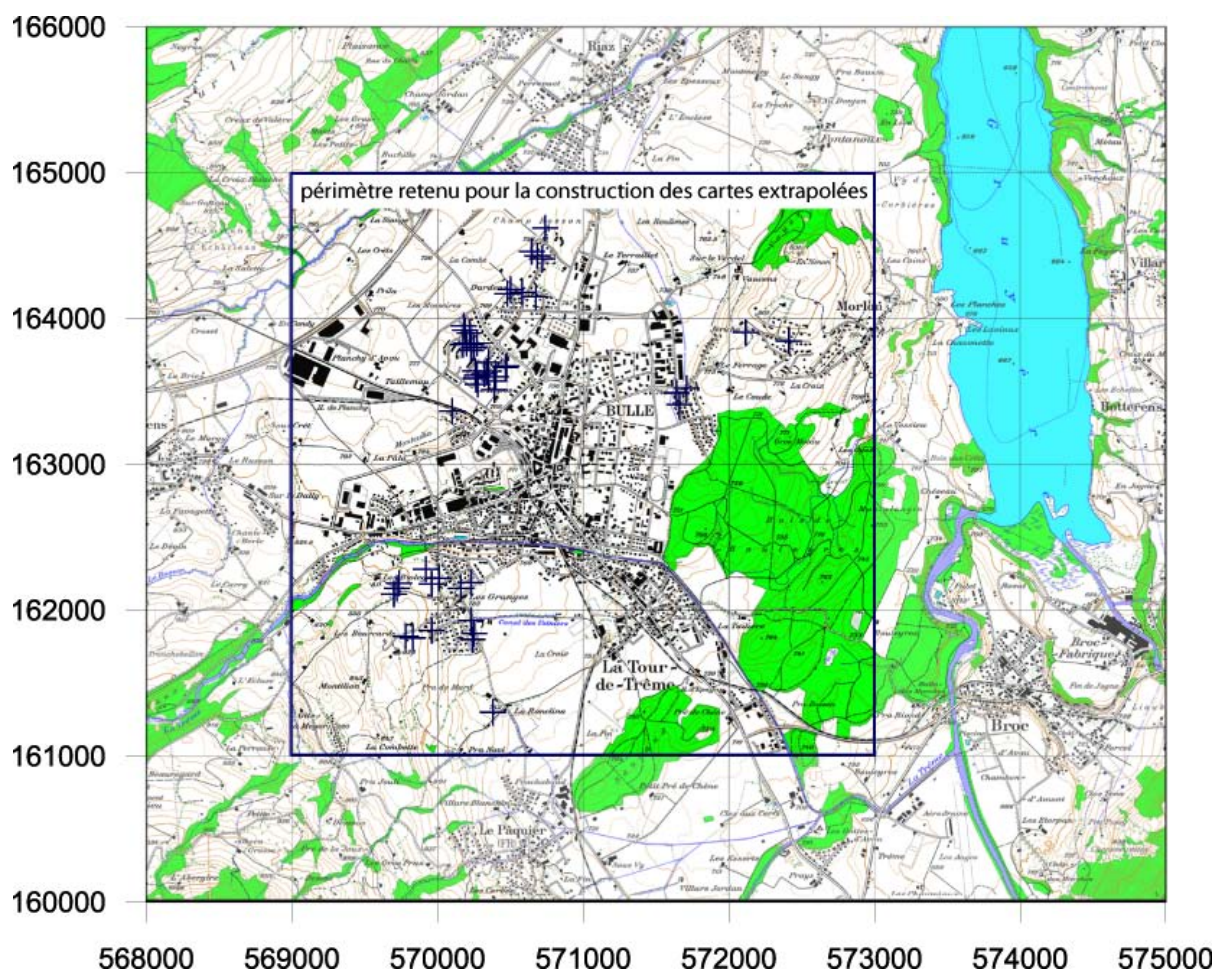


Figure 6.1 : Localisation des SGV existantes dans le périmètre retenu de Bulle - La Tour-de-Trême

La carte des puissances thermiques spécifiques installées exprimée en [W/m] a été obtenue avec le programme de calcul réalisé dans cette étude. Le modèle est basé sur les valeurs de puissance minimale normalisées avec l'hypothèse d'horizons secs. En effet, le choix de ne pas intégrer les paramètres hydrogéologiques (venue d'eau dans le forage, niveau d'eau,..) est dû au fait que ceux-ci ne sont malheureusement que rarement mentionnés sur le levé lithologique de forage, et seulement 30% possèdent une information hydrogéologique.

Avec les seules données lithologiques prises en compte, il a été possible d'établir la carte de l'altitude du toit de la Molasse et celle de l'épaisseur du Quaternaire. En effet, la lithologie rencontrée au sein de la Molasse possède une conductivité thermique plus élevée et donc on cherchera à mettre en évidence les zones où l'épaisseur du Quaternaire est la plus faible possible (cf chapitre 5.4.2).

6.1.1 Evaluation du potentiel thermique

Une première approximation du potentiel géothermique peut être déduite de l'influence de l'épaisseur du Quaternaire. Sur la figure 6.2, les zones de couleur rouge indiquent une épaisseur de Quaternaire relativement faible (inférieure à 35 m) et au contraire, les zones de couleur bleue symbolisent une épaisseur de Quaternaire plus importante (supérieure à 55 m). Selon les hypothèses mentionnées précédemment, de grandes épaisseurs de sédiments quaternaires sont nettement moins intéressantes du point de vue du potentiel thermique. De manière générale, cette région possède une couverture de Quaternaire assez importante mais reste intéressante pour le développement de la géothermie de basse température, du fait que ces terrains quaternaires ont généralement un taux de saturation en eau élevé. Néanmoins, il serait préférable, de pouvoir forer à des profondeurs de l'ordre de 150 m afin d'assurer une bonne efficacité des SGV.

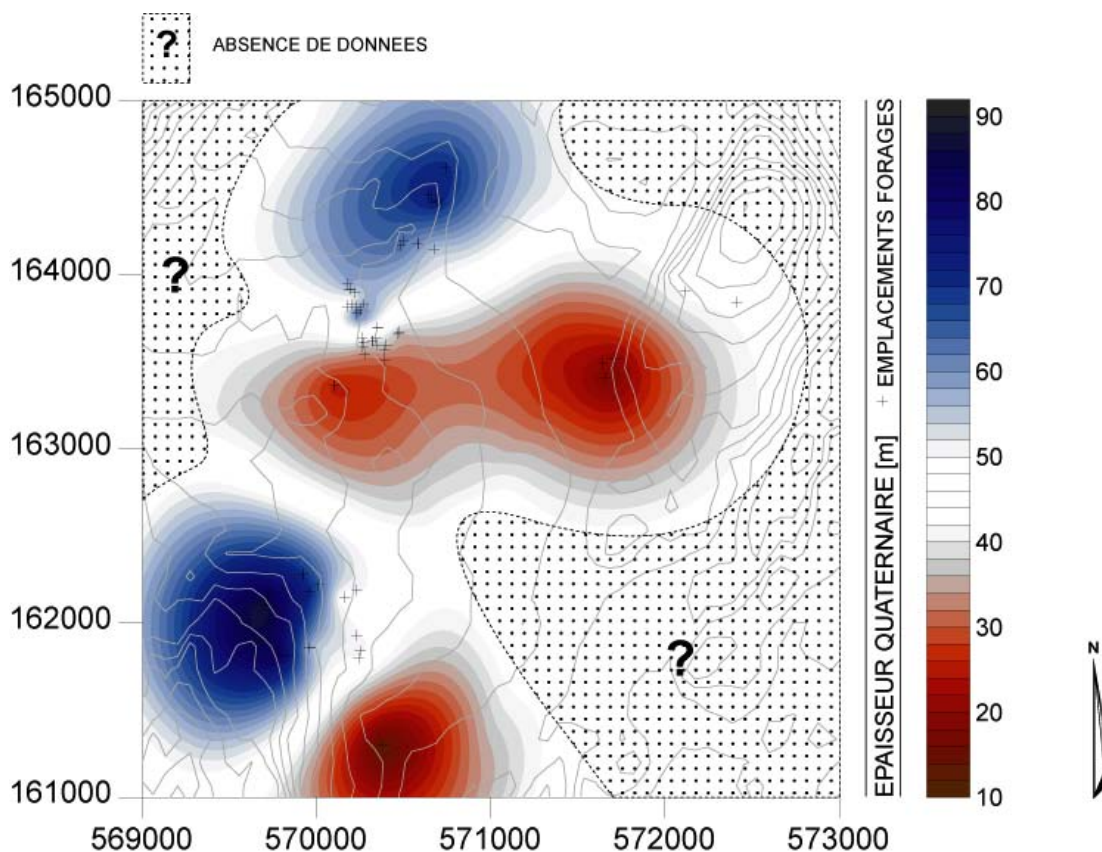


Figure 6.2 : Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : épaisseurs du Quaternaire

La figure 6.3 servant à l'évaluation du potentiel thermique à partir des épaisseurs du Quaternaire est similaire à celle de la figure 6.2 et représente les isolignes des épaisseurs. De manière générale, le variogramme obtenu reproduit bien les variations des données, à l'exception des données correspondant au lag compris entre 1000 et 1200. Ce « pic » peut être expliqué par le fait que les groupes de forages appartenant aux communes de Bulle et La Tour-de-Trême sont distants d'environ 1000 m et qu'il n'y a aucun forage compris entre les latitudes 162300 et 163300. L'extrapolation dans ce secteur n'est donc pas de bonne qualité.

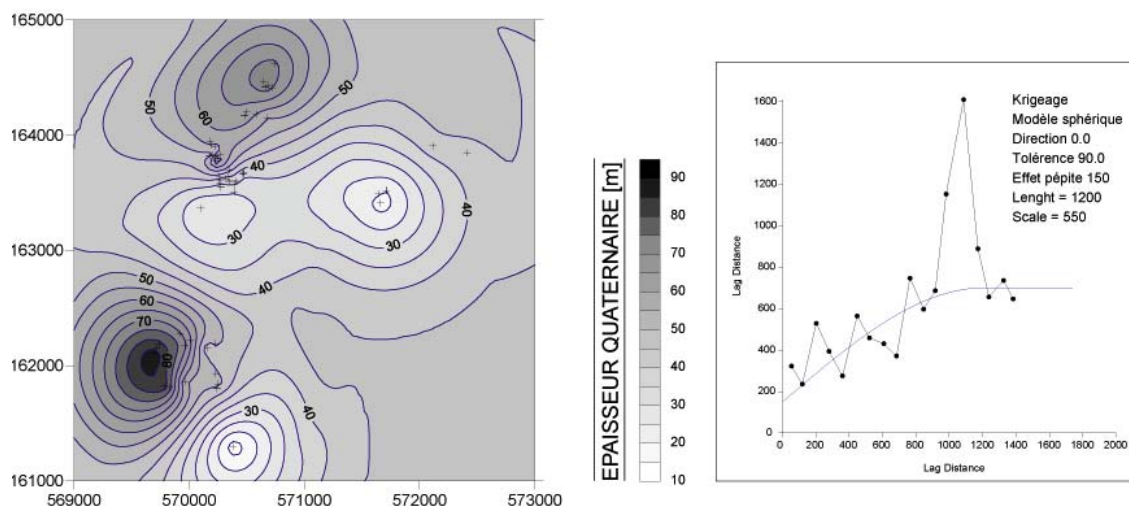


Figure 6.3 : Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : isolignes des épaisseurs du Quaternaire

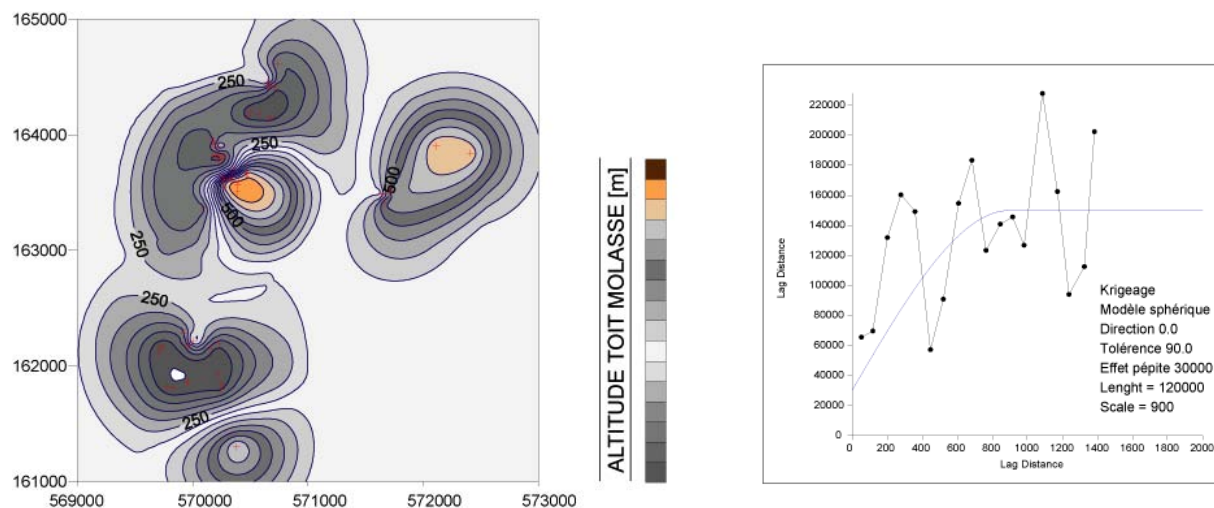


Figure 6.4 : Cartes pour l'évaluation du potentiel thermique à partir de l'altitude du toit de la Molasse

La carte représentant l'altitude du toit de la Molasse a été construite à l'aide d'outils géostatistiques tel que le krigeage auquel est ajouté un modèle sphérique ainsi qu'un effet de pépite. Ils ont été choisis et ajustés afin de représenter au mieux la tendance générale du variogramme obtenu, dans le but réduire au maximum l'effet des variations spatiales des données. Le variogramme obtenu (figure 6.4) étant de bonne qualité, cela permet de valider la carte.

Finalement, la carte représentant la puissance thermique spécifique installée par forage a également été construite à l'aide de l'outil géostatistique du krigeage (figure 6.5). Le variogramme obtenu ne semble pas tenir compte de la répartition spatiale de cette propriété à partir du lag 1000 environ. Deux paramètres importants sont à souligner concernant la construction de cette carte : la longueur de la sonde installée et la puissance thermique soutirée. En effet, ceux-ci vont influencer la représentation.

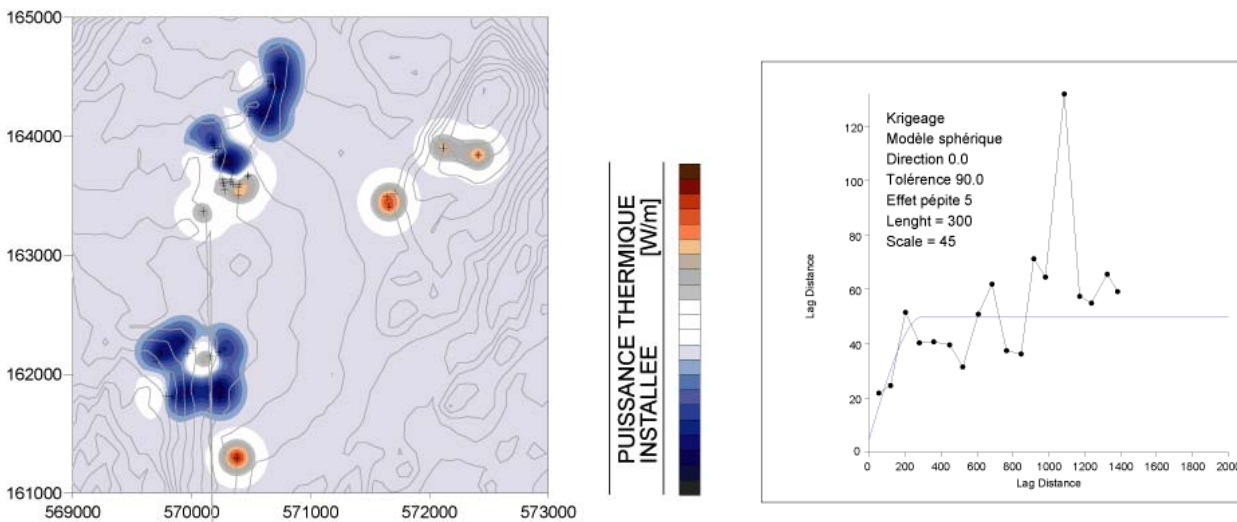


Figure 6.5 : Carte de la puissance thermique spécifique installée [W/m]

Dans le but de réaliser une carte d'évaluation du potentiel thermique de cette région, les deux paramètres cités précédemment devraient être normalisés, ce qui est difficilement concevable, d'autant plus que l'on ne dispose jamais d'information sur la puissance thermique de chaque installation. Un formulaire de demande d'autorisation pour l'implantation des SGV est proposé dans le chapitre 7.3 dans le but de disposer à l'avenir de cette information.

6.1.2 Cartes des contraintes liées aux eaux souterraines et à l'affectation des terrains

La carte des zones de protection (S0, S1, S2 et S3) représente une contrainte importante pour l'implantation de sondes géothermiques verticales (figure 6.6). A ce jour, aucune SGV installée dans la région de Bulle - La Tour-de-Trême n'entrave les prescriptions en matière de protection des eaux souterraines. Néanmoins, une grande vigilance est nécessaire afin d'assurer le bon développement de ce type d'installations.

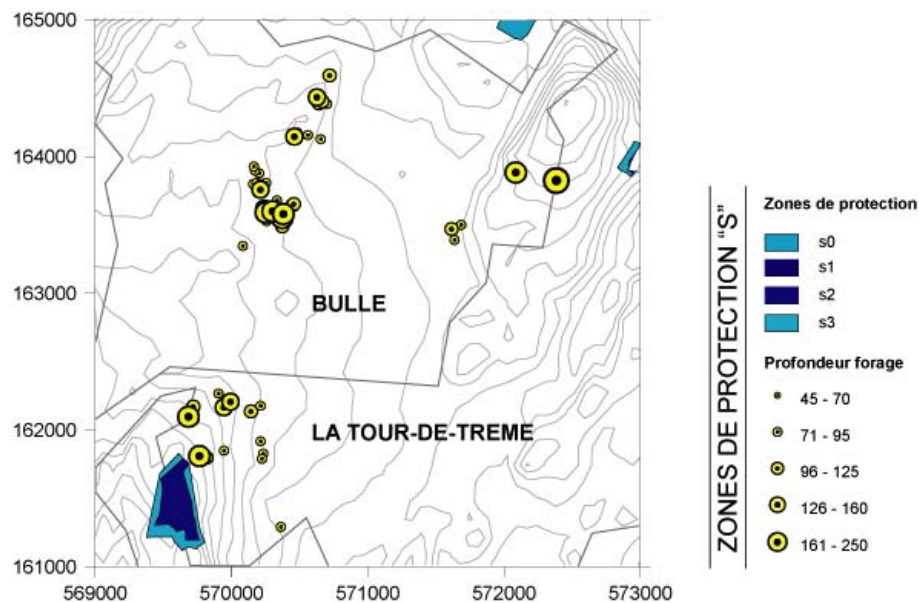


Figure 6.6 : Carte des contraintes liées aux zones de protection des eaux souterraines et emplacement SGV

La carte d'évaluation du potentiel thermique est à mettre en relation avec la carte d'affectation du sol afin de délimiter les zones susceptibles d'être intéressantes pour le développement de cette forme d'énergie telles que les zones résidentielles ou industrielles (figure 6.7).

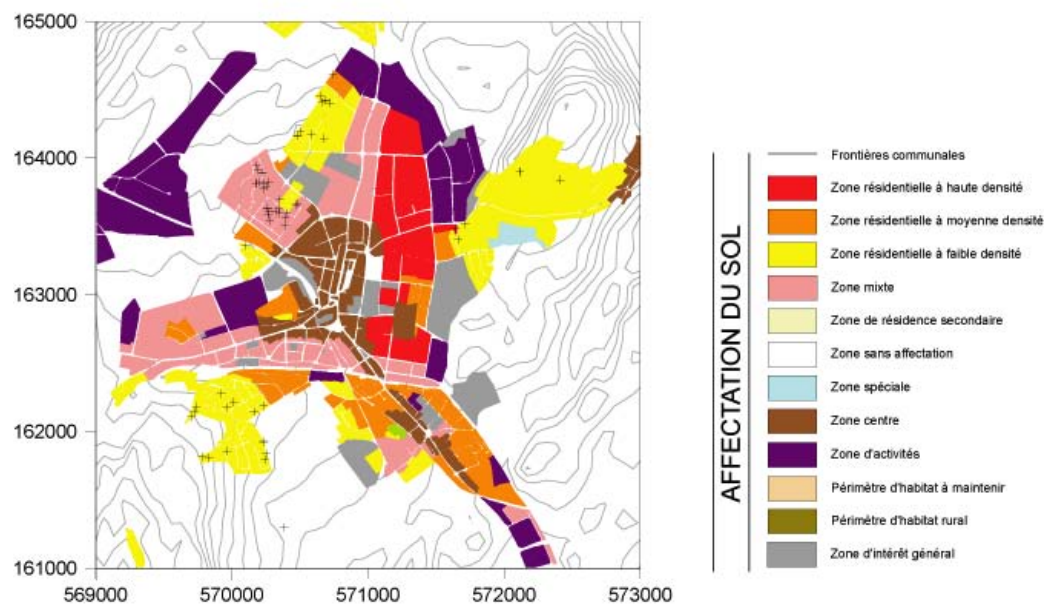


Figure 6.7 : Carte d'affectation du sol

6.2 RÉGION GUIN-TAVEL (DÜDINGEN-TAFERS)

Le périmètre de la région étudiée Guin-Tavel (Düdingen-Tafers) initialement délimitée par les coordonnées X-577000-585000 et Y-185000-193000 a été réduite aux coordonnées X-579000-585000 et Y-183000-192000 pour construire les différentes cartes d'extrapolation. Ce nouveau domaine représente une surface de 54 km² totalisant 109 forages interprétés pour la commune de Guin et 55 pour la commune de Tavel. La profondeur des forages varie de 75 à 250 m et leur position spatiale est représentée sur la figure 6.8.

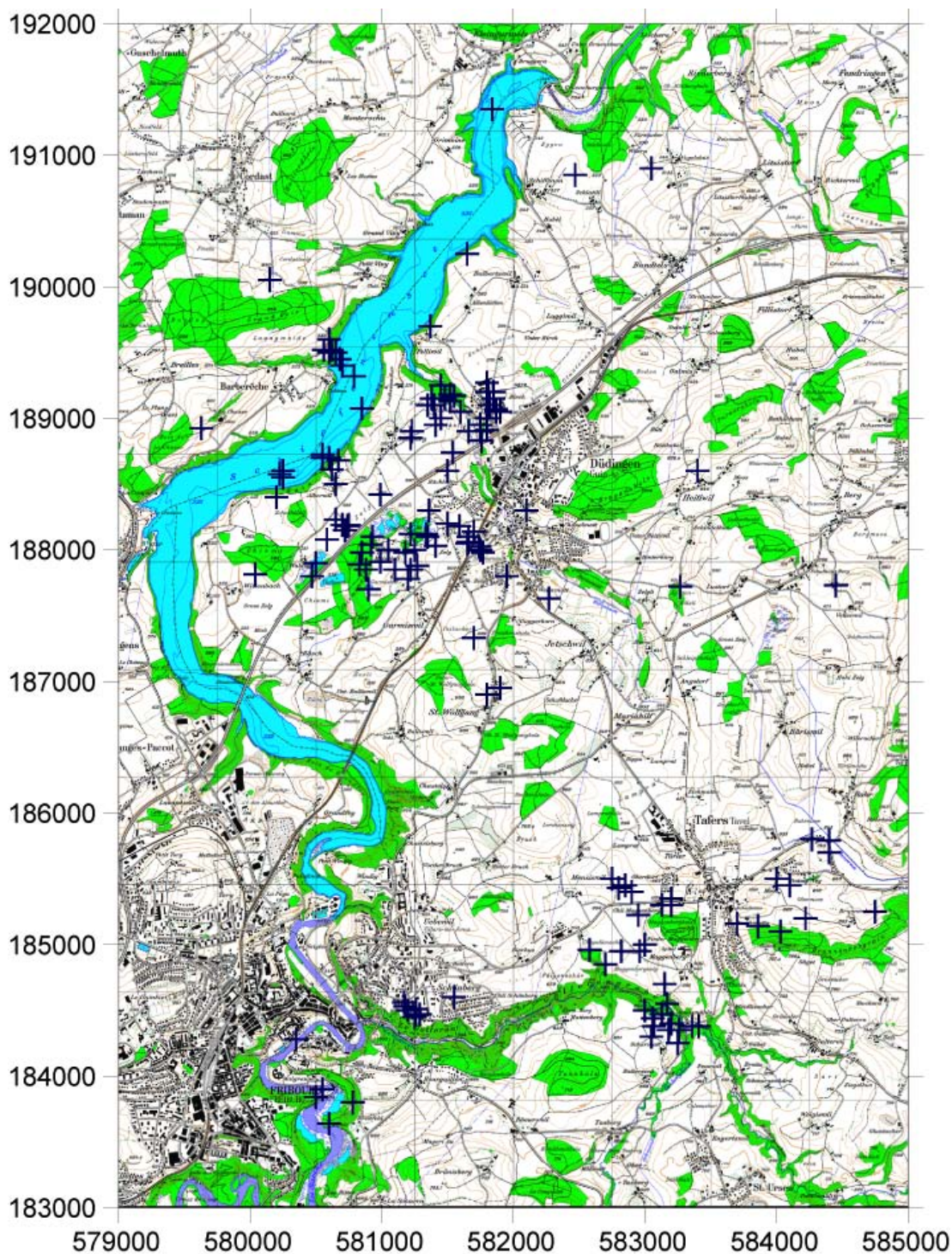


Figure 6.8 : Localisation des SGV existantes dans la région de Guin-Tavel

6.2.1 Evaluation du potentiel thermique

Comme discuté précédemment, l'épaisseur du Quaternaire est liée au potentiel thermique (cf chapitre 5.3). Sur la figure 6.9, les zones de couleur rouge indiquent une épaisseur de Quaternaire relativement faible (inférieure à 20 m) et au contraire, les zones de couleur bleue symbolisent une épaisseur de Quaternaire plus importante (supérieure à 35 m). De manière générale, cette région possède une couverture de Quaternaire relativement peu importante, ce qui est très favorable pour le développement des sondes géothermiques verticales.

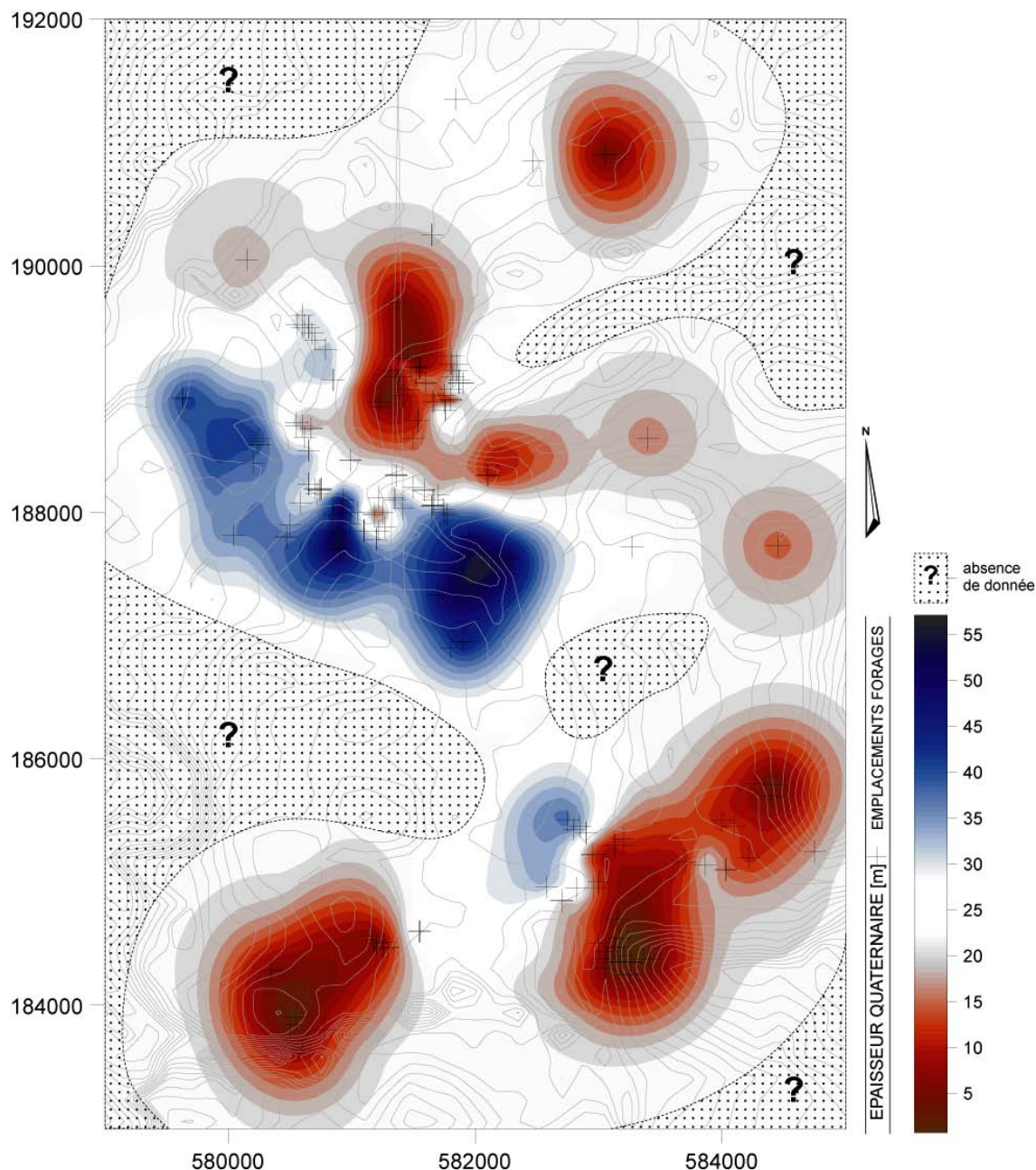


Figure 6.9 : Carte d'épaisseur du Quaternaire dans la région de Guin-Tavel

La figure 6.10 servant à l'évaluation du potentiel thermique est similaire à la carte de la figure 6.9 et représente les isolignes des épaisseurs de Quaternaire. Le variogramme obtenu reproduit bien les variations des données.

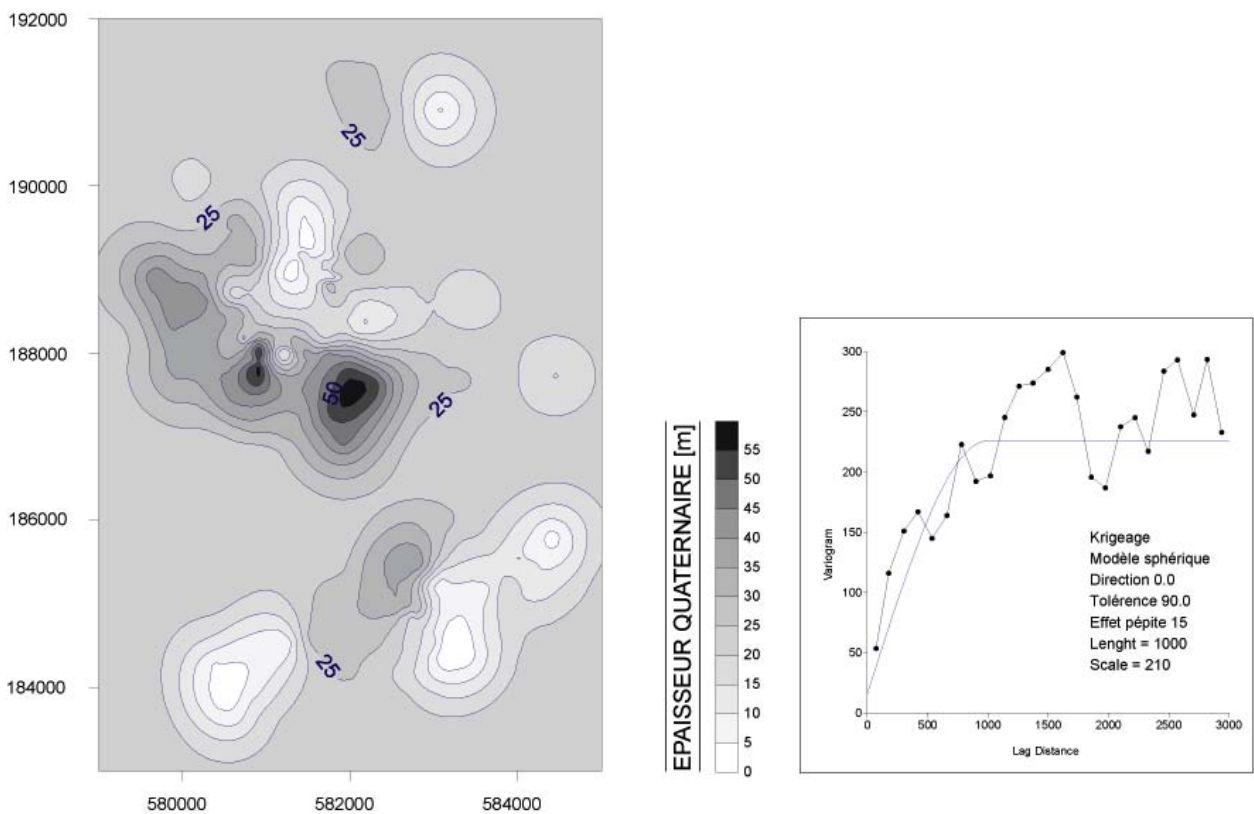


Figure 6.10 : Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : isolignes des épaisseurs du Quaternaire

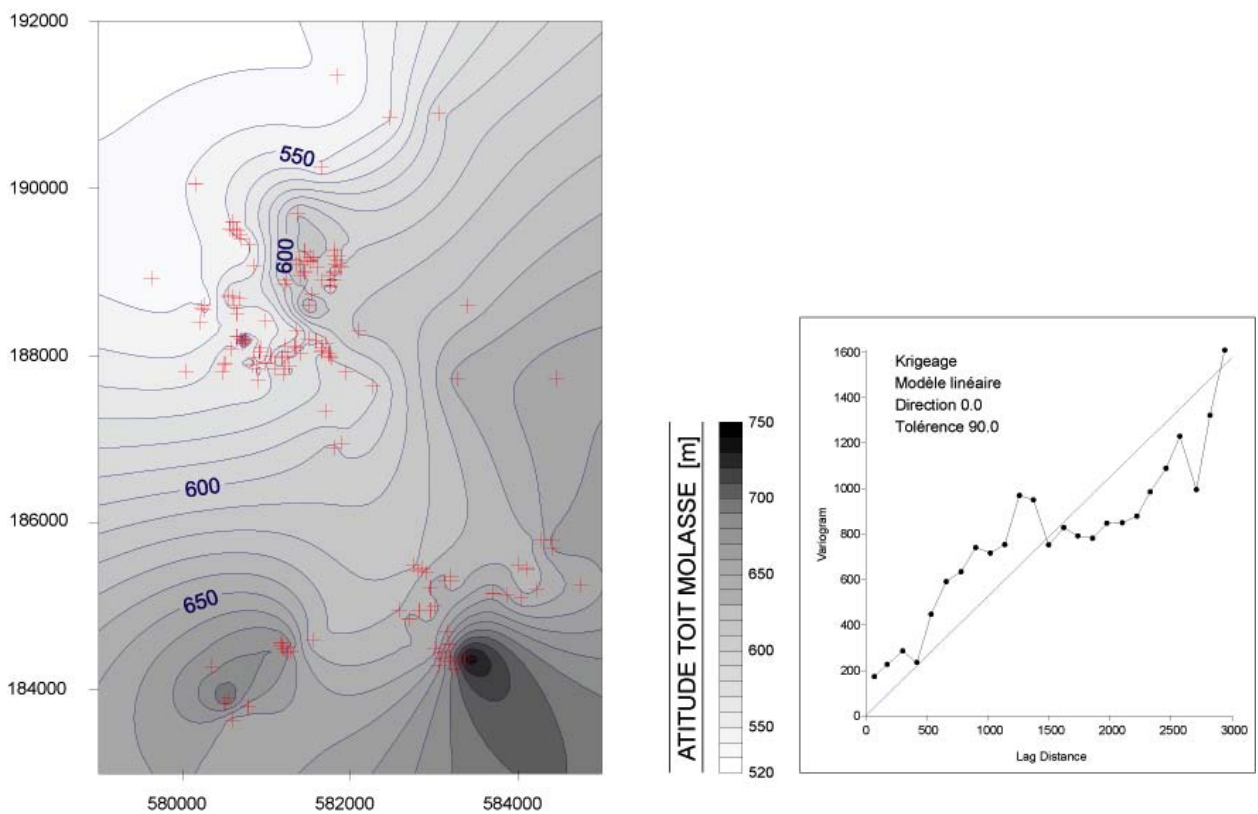


Figure 6.11 : Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : altitude du toit de la Molasse

La carte représentant l'altitude du toit de la Molasse a été construite à l'aide d'outils géostatistiques tel que le krigeage auquel est ajouté un modèle sphérique ainsi qu'un effet de pépite, afin de représenter au mieux la tendance générale du variogramme obtenu pour réduire au maximum l'effet des variations spatiales des données (figure 6.11). Le variogramme obtenu étant de bonne qualité, cela permet de valider la carte.

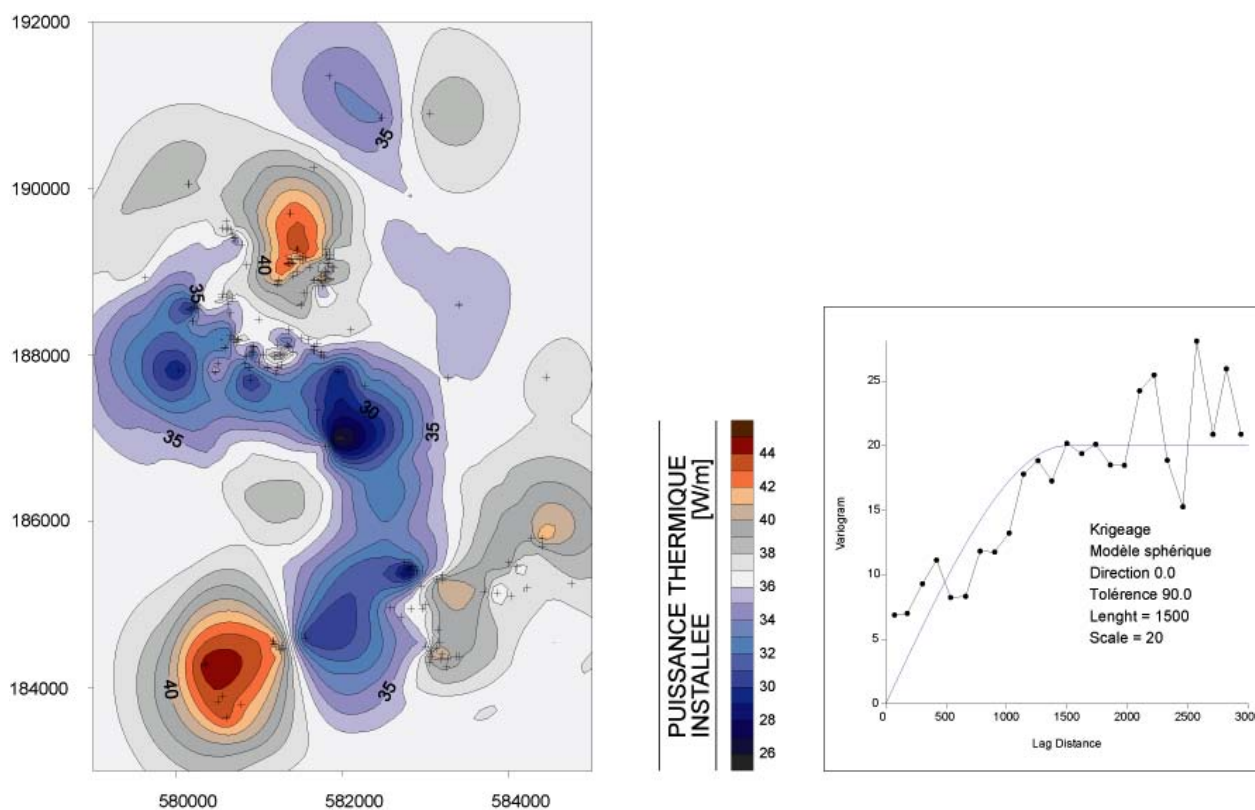


Figure 6.12 : Carte de la puissance thermique spécifique installée en $[W/m]$

La carte de la puissance thermique montre la présence d'une zone de teinte bleue apparemment moins intéressante thermiquement (figure 6.12). La carte des épaisseurs de Quaternaire (figure 6.10) se corrèle bien avec cette dernière et indique une épaisseur importante (> 45 m). Ceci est en accord avec la description géologique que l'on dispose sur cette région. En effet, au cours de l'interglaciaire Riss-Würm, la Sarine et la Singine ont coulé dans des lits larges déposant plusieurs mètres d'alluvions préwürmiens. Malgré le manque d'informations hydrogéologiques, il est raisonnable d'évoquer la présence d'horizons saturés en profondeur qui redonne de l'intérêt au potentiel géothermique de cette zone.

6.2.2 Cartes des contraintes liées aux eaux souterraines et à l'affectation des terrains

Les cartes des zones de protection des eaux souterraines et d'affectation du sol sont utilisées dans le but de délimiter les zones (zones résidentielles ou industrielles) susceptibles d'être intéressantes pour le développement des sondes géothermiques verticales.

Sur la carte des zones de protection, on distingue la présence d'une sonde en zone de protection « S3 » (coordonnées 581900/186950) qui a été autorisée après examen complémentaire (figure 6.13).

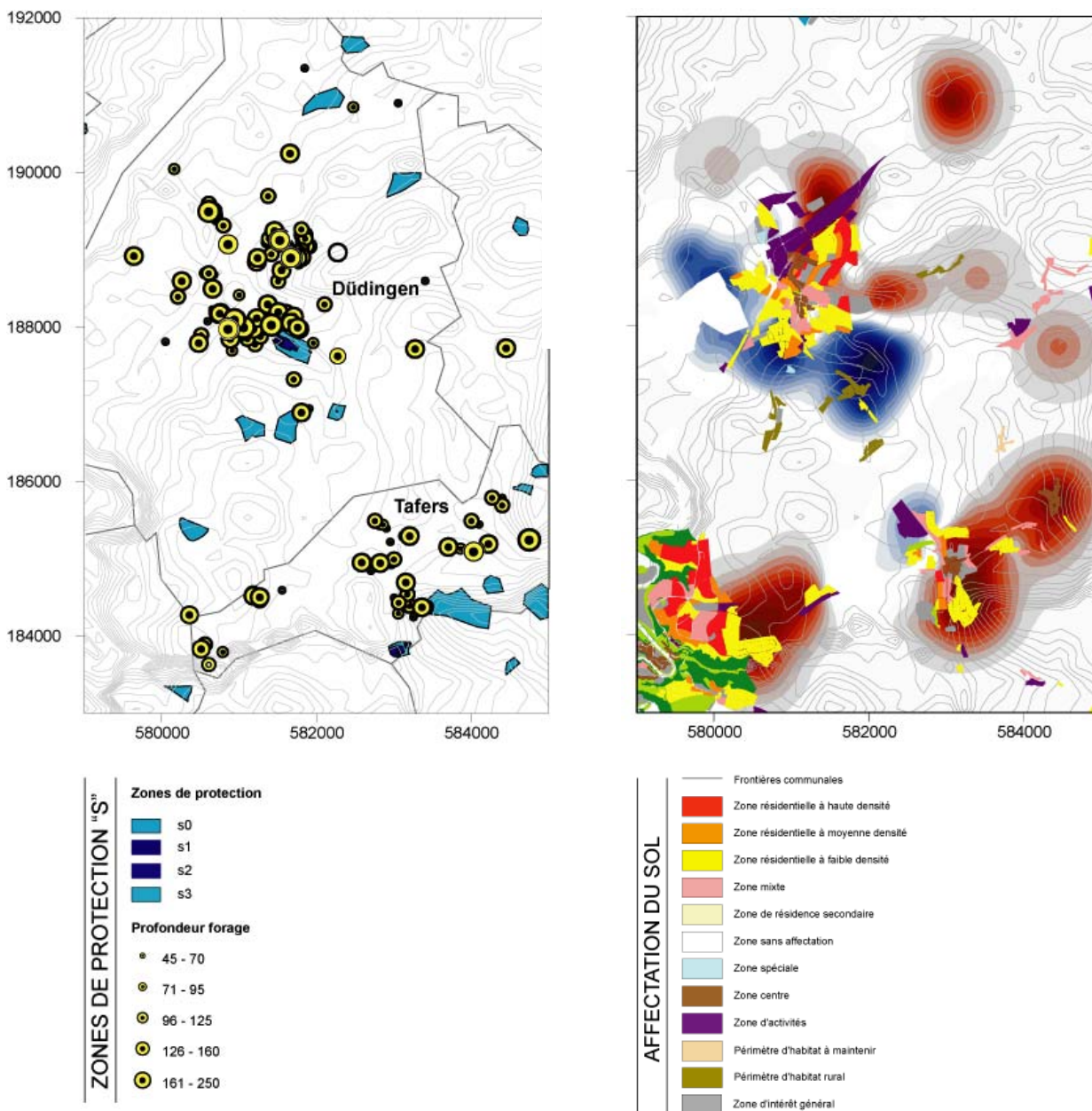


Figure 6.13 : Cartes des zones de protection et d'affectation du sol

6.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La première étape de recherche des zones thermiquement favorables pour l'implantation de sondes géothermiques verticales est la construction de cartes représentant l'épaisseur du Quaternaire. En effet, les valeurs de puissance thermique spécifique sont plus faibles que dans la Molasse, en faisant l'hypothèse simplificatrice que toutes les formations sont dépourvues d'eau. Un variogramme a préalablement été réalisé pour chaque carte afin de déterminer le ou les modèles à appliquer à la méthode d'extrapolation utilisée, en principe le krigeage.

Les cartes représentant la puissance thermique spécifique installée [W/m] ont été réalisées en prenant comme hypothèse simplificatrice que toutes les formations sont dépourvues d'eau. En effet, nous ne disposons pas suffisamment de données hydrogéologiques. Celles-ci sont non seulement éparées mais de qualité très discutable et l'erreur ainsi engendrée a été minimisée en choisissant de les écarter du calcul. De ce fait, les valeurs de puissance thermique spécifique correspondent à des grandeurs minimum que l'on peut qualifier de valeurs conservatrices. Une étude plus approfondie sur le plan hydrogéologique permettrait de préciser ces puissances. Le tableau 6.1 présente la puissance thermique obtenue par le programme de calcul pour chaque unité géologique (Quaternaire, Molasse et Ultrahelvétique) et pour chaque commune.

Tableau 6.1: Comparaison pour chaque commune des puissances thermiques spécifiques extractibles [W/m]

	QUATERNAIRE		MOLASSE		ULTRAHELNETIQUE	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Bulle	20.0	21.7	42.2	45.6	41.5	45.4
Tour-de-Trême	20.3	22.0	40.4	43.9	41.8	45.2
Guin (Düdingen)	20.2	21.6	42.3	46.3	-	-
Tavel (Tafers)	19.7	21.0	41.0	44.9	-	-

Les valeurs de puissance thermique spécifique ne présentent pas de différence significative entre les deux zones étudiées. Les résultats obtenus sur la base des données disponibles montrent de bonnes corrélations entre l'épaisseur du Quaternaire et le potentiel thermique. L'utilisation d'un outil géostatistique (krigeage) pour construire les différentes cartes permet, dans une certaine mesure, de réduire l'effet des variations spatiales des données. Néanmoins, pour l'interpolation de la puissance thermique spécifique installée, le modèle ne semble pas tenir compte de la répartition spatiale de cette propriété. Cette remarque concerne principalement la région d'étude de Bulle-La Tour-de-Trême. En effet, l'interpolation des épaisseurs de Quaternaire reproduit bien les variations proches des données, mais au fur et à mesure que l'on s'éloigne des forages, on tend vers une valeur moyenne extrapolée (pic prononcé au lag = 1100). Ces zones sont mentionnées sur les différentes cartes par un « ? » et ne doivent en aucun cas prises en considération.

6.3.1 Région Bulle-La Tour-de-Trême

De manière générale, les données sont bien corrélées hormis pour la carte de « puissance thermique spécifique » qui montre une forte variabilité aux environs du $Lag=1000$. Ceci correspond à la demi-distance qui sépare les deux communes, par conséquent la localisation des forages. En effet, on distingue une zone sans forage, pour la zone de latitude 163000.

Deux zones se distinguent par une épaisseur de Quaternaire relativement faible (inférieure à 30m). La première se situe à la latitude 163400 environ et couvre la partie sud de la commune de Bulle et la deuxième se situe au sud-ouest de la commune de la Tour-de-Trême.

Le fait que la carte du toit de la Molasse est très similaire à la carte d'épaisseur du Quaternaire, peut signifier que le remplissage quaternaire est plus important dans les vallées creusées au sein de la Molasse et vice-versa.

Les périmètres des zones de protection des eaux souterraines sont relativement restreints dans cette région et n'entravent que très légèrement l'implantation des SGV.

En disposant des informations précédentes et de la carte d'affectation du sol, cela permet de cibler les zones où la promotion des sondes géothermiques verticales serait la plus prometteuse. Une zone résidentielle à faible densité située à l'extrême est de Bulle est notamment très propice pour leur implantation.

6.3.2 Région Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)

De la même manière, on a cherché à mettre en évidence l'épaisseur du Quaternaire afin de décrire le potentiel géothermique de cette région. Une zone relativement bien définie apparaît au sud de Guin, qui se corrèle bien avec la géologie actuelle ainsi que l'histoire quaternaire de cette région. La densité de forages est plus importante pour cette région et le variogramme utilisé permet d'affirmer que la corrélation des données est de bonne qualité.

Les zones de protection sont, pour cette région, beaucoup plus importantes et nécessitent une attention particulière lors des demandes d'autorisation pour l'implantation de nouvelles SGV. On remarquera qu'un forage (coordonnées 581900/186800) est situé en zone S3, ce qui peut être autorisé sous certaines conditions.

Les zones résidentielles situées au sud de la commune de Tavel sont des zones où l'épaisseur du Quaternaire est faible (de 0 à 20 m) et donc potentiellement plus intéressantes thermiquement. La même remarque peut être faite pour les quartiers situés au NE de Guin.

7. DISCUSSION ET CONCLUSION

7.1 AUTRES DÉMARCHES

Les données disponibles et intégrées dans ce travail montrent une corrélation intéressante entre l'épaisseur du Quaternaire et la puissance thermique spécifique. Une modélisation basée sur un modèle lithologique permettrait de préciser cette corrélation.

Dans cette optique, un programme de recherche géothermique, mandaté par l'Office fédéral de l'énergie est actuellement mené dans le nord de la Suisse (Andermatten & Kohl, 2003). Ce projet vise à développer des instruments pour évaluer le potentiel géothermique en recensant toutes les données disponibles comme les forages existants (avec tests, mesures et analyses effectuées), les données sismiques et les campagnes de géophysique.

Le but de ce projet est notamment de construire un modèle 3D de la conductivité thermique à faible profondeur (300 m) dérivé d'un modèle lithologique.

MODÈLE LITHOLOGIQUE

Une première phase de recherche, a permis la construction d'un modèle lithologique 3D définissant les différentes unités géologiques. Les profils de forage fournissent les données lithologiques qui sont regroupées en faciès (catégories). Ces derniers sont inspirés des travaux de Leu & al. (1999) utilisés dans la base de données géothermiques SwEWS pour la Molasse suisse.

La construction d'un tel modèle implique la création d'une maille ou grille stratigraphique, dépendante de la densité des données ainsi que de la variabilité des propriétés au sein du périmètre d'étude. Des cartes de conductivité thermique 2D dérivées de ce modèle 3D peuvent être réalisées pour différentes profondeurs.

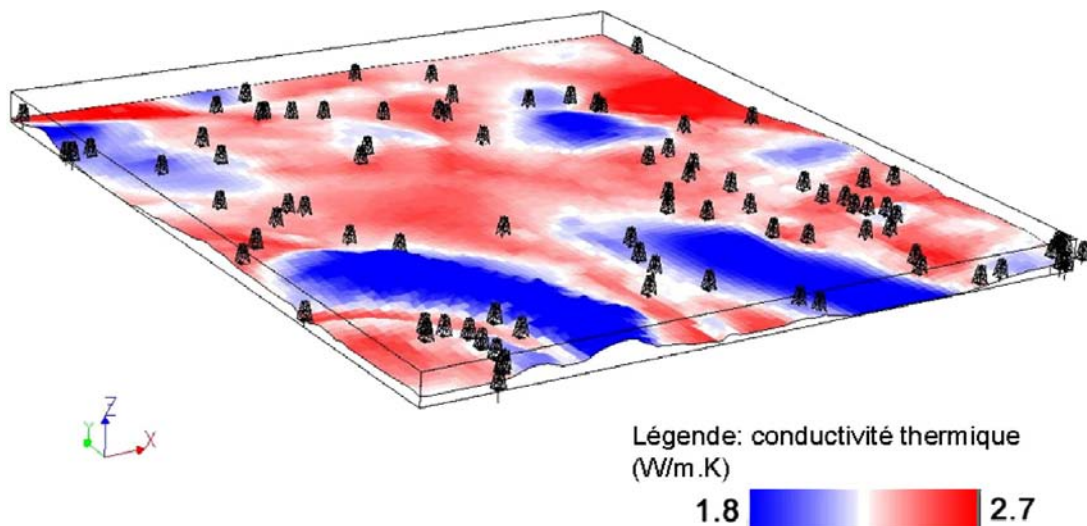


Figure 7.1 : Conductivité thermique moyenne à 150 m projetée sur la surface topographique (Andermatten & Kohl, 2003)

Modélisation

La construction d'un modèle simple incluant une valeur moyenne de conductivité thermique par faciès (Quaternaire, Molasse et éventuellement Ultrahelvétique) à faible profondeur (<300 m), dérivé d'un modèle lithologique permettrait d'estimer une valeur moyenne de conductivité thermique pour une profondeur donnée. Ceci nécessiterait bien entendu, une étude de la variabilité spatiale des données, ce qui n'a pas pu être approfondi dans ce travail.

La figure 7.2 décrit bien l'écart de conductivité thermique entre les zones ayant une grande épaisseur de Quaternaire et celles où elle est plus faible.

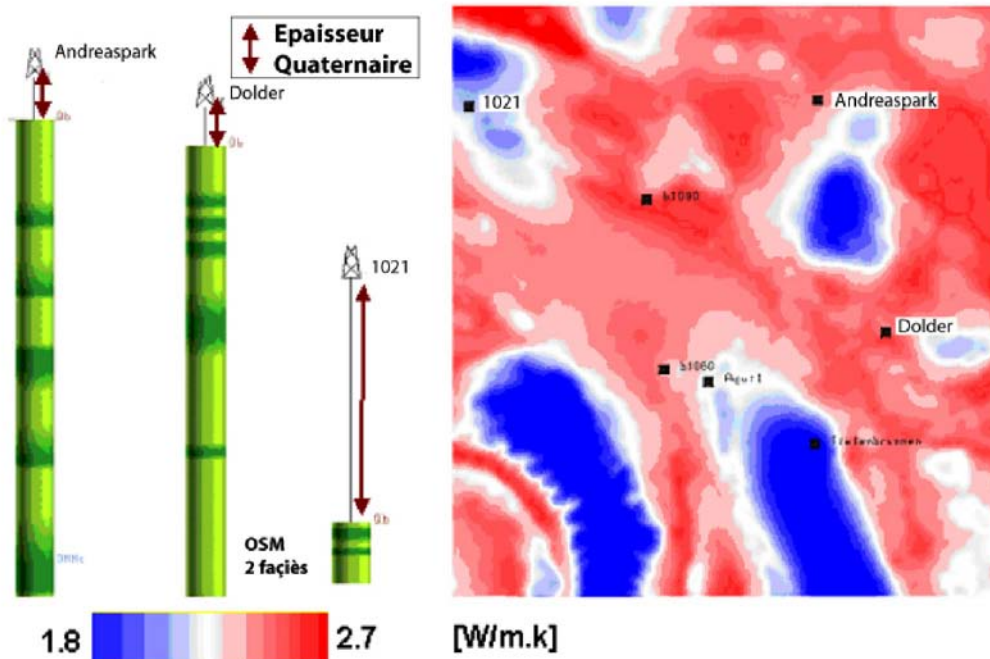


Figure 7.2 : Correspondance entre l'épaisseur de Quaternaire visible sur les logs de forage et la valeur de conductivité thermique moyenne à 150m de profondeur (Signorelli, 2004)

7.2 CONCLUSION DE L'ÉTUDE

Le but initial du travail à savoir, la mise au point d'un système d'informations géographiques a été réalisé et permet à l'utilisateur de disposer d'un outil d'aide à la décision pour l'implantation des sondes géothermiques verticales (SGV). Néanmoins, son utilisation reste limitée concernant le domaine des requêtes spatiales, car les cartes utilisées ne sont à l'heure actuelle pas encore numérisées. La carte géologique au 1:25000, en préparation à l'OFEG, devrait être sous format SIG au le début de l'année 2005.

La création du programme de calcul permettant d'évaluer la puissance thermique spécifique soutirable en W/m comme outil de quantification du potentiel géothermique et de dimensionnement des SGV offre des perspectives intéressantes. Son développement, en collaboration avec les principaux intéressés, permettrait une optimisation du coût d'une SGV en fonction du rendement et de son fonctionnement.

Les recommandations données au chapitre 7.3 font état du manque flagrant de données hydrogéologiques. En effet, seuls 30% des forages réalisés dans la région de Bulle-La Tour-de-Trême possèdent une information hydrogéologique et seulement 4% pour ceux réalisés dans la région de Guin-Tavel. Il est donc souhaitable de combler cette lacune afin d'améliorer la valeur des décisions en matière d'implantation, mais aussi de dimensionnement des SGV pour garantir leur développement harmonieux.

7.3 RECOMMANDATIONS

7.3.1 Demande d'autorisation

La première recommandation est la création et l'utilisation d'un formulaire de demande d'autorisation pour l'implantation de sondes géothermiques verticales. Son but est d'améliorer la qualité des données et de pouvoir les utiliser comme outil d'aide à la décision en se basant sur l'expérience des installations existantes et de pouvoir ainsi disposer des informations nécessaires pour évaluer, de façon plus précise, le dimensionnement des installations futures en tenant compte des besoins recherchés. Ce formulaire pourrait être mis en liaison avec la fiche d'information du forage (cf. chapitre 5.3.4) via la base de données générales, afin que l'utilisateur puisse accéder directement à la totalité des informations concernant le forage de la SGV installée.

Cette proposition de formulaire devrait être discutée avec l'ensemble des personnes et des services concernés afin de disposer des informations nécessaires et utiles. Un exemple de formulaire de demande d'autorisation pour l'implantation d'une SGV est proposé dans la figure 7.3. Les informations jugées importantes y figurent :

- Informations générales (requérant, lieu de l'installation, installateur chauffage, bureau géologue) ;
- Données générales sur le bâtiment et les besoins en chaleur ;
- Données sur le lieu d'implantation de la sonde géothermique verticale (entreprise de forage, fournisseur de la sonde, longueur et diamètre de la sonde,...) ;
- Informations sur la sécurité et l'installation de la pompe à chaleur ;
- Pièces justificatives jointes à la demande d'autorisation ;
- Préavis et décision de l'autorité cantonale.

7.3.2 Protocole de forage

La seconde recommandation est la création et l'utilisation généralisée d'un protocole de forage basé sur l'automatisation du codage de la lithologie. Ce fichier a spécialement été conçu sur *Excel* afin de lier ces informations à la base de données lithologiques. Il pourrait être mis à disposition du foreur, respectivement du géologue et complété par ses propres soins (figure 7.4).

La classification étant basée principalement sur la granulométrie, on distingue immédiatement le profil granulométrique. Un accent pourrait être mis sur la nécessité de mentionner le maximum d'informations hydrogéologiques lors de la phase de forage.

On peut envisager que le protocole de forage (chapitre 7.3.2) ainsi que le formulaire de demande d'autorisation (chapitre 7.3.1) soient disponibles sur les pages internet du Service de l'environnement du canton de Fribourg pour être téléchargés, voire pour être complétés en ligne.

FORMULAIRE DE DEMANDE D'AUTORISATION POUR L'IMPLANTATION DE SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES


SERVICE RESPONSABLE
SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT DU CANTON DE FRIBOURG

> **REQUERANT**
 NOM COMMUNE
 ADRESSE TELEPHONE

> **LIEU D'INSTALLATION**
 PROPRIETAIRE TELEPHONE
 COMMUNE PARCELLE
 COORDONNEES X Y Z

> **INSTALLATEUR CHAUFFAGE**
 NOM
 ADRESSE TELEPHONE

> **BUREAU GEOLOGUE**
 NOM MUELLER & PERROTTET
 ADRESSE TELEPHONE



> **FOURNISSEUR SONDE**
 NOM TELEPHONE
 ADRESSE

> **RENDMENT PREVU (COP)**

> **PUISSANCEMETRE COURANT** [W/m]

> **TYPE LIQUIDE CALOPORTEUR** PROPYLENE GLYCOL

> **TYPE DE SONDE**

> **NOMBRE DE SONDES**

> **LONGUEUR SONDE** [m]

> **DIAMETRE SONDE** [mm]

SECURITE ET INSTALLATION DE LA POMPE A CHALEUR

> **FOURNISSEUR PAC**

> **TYPE DE PAC**

> **PUISSANCE POUR CHAUFFAGE** [kW]

> **PRODUCTION EAU CHAUDE** OUI

> **PUISSANCE POUR EAU CHAUDE** [kW]

> **CONSUMMATION ANNUELLE** [MWh]

> **RENDMENT ANNUEL** [%]

> **COMBUSTIBLE POUR LA PAC**

> **QUANTITE DE LIQUIDE REFRIGERANT** [l]

PIECES JUSTIFICATIVES JOINTES A LA DEMANDE

> **PLAN DE SITUATION AU 1:25000 (EXTRAIT DE PLAN CADASTRAL) AVEC LOCALISATION DE L'INSTALLATION PREVUE**

PREAVIS DE L'AUTORITE CANTONALE

> **NO REQUETE**

> **DECISION**

> **JUSTIFICATION**

SERVICE RESPONSABLE
SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT DU CANTON DE FRIBOURG

> **REQUERANT**
 NOM COMMUNE
 ADRESSE TELEPHONE

> **LIEU D'INSTALLATION**
 PROPRIETAIRE TELEPHONE
 COMMUNE PARCELLE
 COORDONNEES X Y Z

> **INSTALLATEUR CHAUFFAGE**
 NOM
 ADRESSE TELEPHONE

> **BUREAU GEOLOGUE**
 NOM MUELLER & PERROTTET
 ADRESSE TELEPHONE

DONNEES GENERALES

> **ETAT DU BATIMENT** ANCIEN

> **TYPE DE BATIMENT** PUBLIC

> **VOLUME CONSTRUIT (SIA)** [m³]

> **ANNEE DE CONSTRUCTION**

CHAUFFAGE

> **BESOIN EN CHALEUR** [kW] SELON NORMES SIA

> **% PREVU DES BESOINS** [%]

> **CHAUFFAGE APOINT**

EAU CHAUDE SANITAIRE

> **% PREVU DES BESOINS** [%]

DONNEES SUR LE LIEU D'IMPLANTATION DE LA SONDE

> **ENTREPRISE FORAGE**

NOM

ADRESSE TELEPHONE

Figure 7.3 : Présentation de la feuille « Excel » du formulaire de demande d'autorisation

7.4 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Le développement des différents outils mentionnés dans ce travail ainsi que les recommandations citées précédemment permettent d'atteindre les buts visés par ce travail. Néanmoins, la détermination des zones favorables à l'implantation de SGV s'avère plus complexe que prévue, notamment en ce qui concerne la validation des données. Cette étude réalisée dans le domaine de l'utilisation de la géothermie de basse énergie et plus précisément de l'implantation de sondes géothermiques verticales en est encore à un stade préliminaire. Les différentes étapes suivies lors de ce travail sont résumées dans un organigramme (figure 7.5). Les liaisons des différentes étapes réalisées dans ce travail sont symbolisées sur la figure 7.5 par des flèches pleines alors que les liaisons projetées ou recommandées sont en traits interrompus.

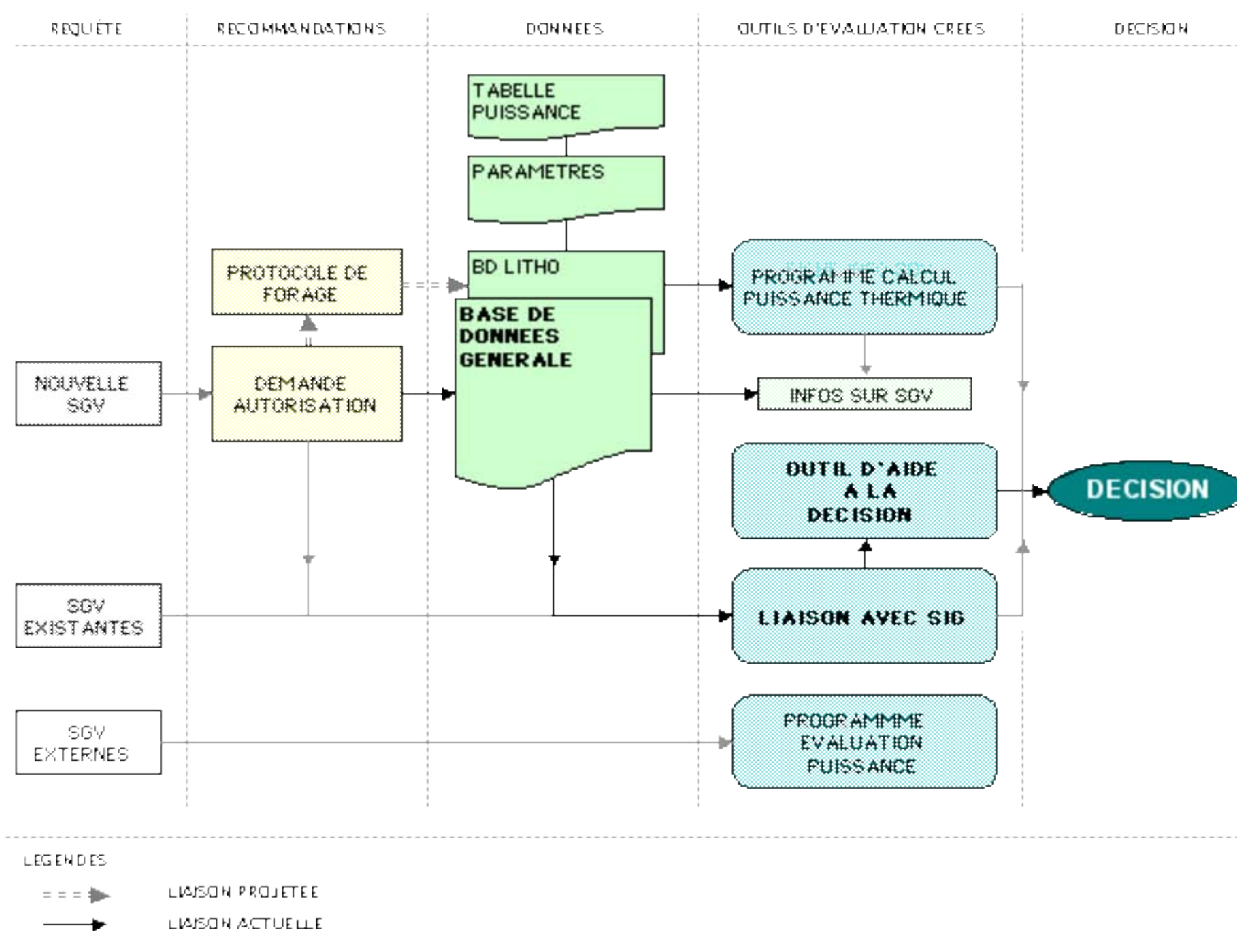


Figure 7.5 : Organigramme de synthèse des liaisons entre les différentes étapes traitées dans ce travail (SGV = sonde géothermique verticale ; BD = base de données ; SIG = Système d'informations géographiques)

L'élaboration d'une carte de potentiel thermique et plus précisément d'une carte de puissance spécifique nécessite de disposer de plusieurs paramètres indispensables, aussi bien lithologiques qu'hydrogéologiques.

La problématique concernant la répartition ainsi que la corrélation spatiale des données existantes pourrait être en grande partie résolue par la création d'un modèle lithologique (cf chapitre 6.2.2), affiné ensuite par modélisation.

Perspectives à l'échelle du canton

Le fort développement des installations de sondes géothermiques destinées à chauffer des habitations démontre l'intérêt grandissant porté à cette technologie. Or, cette forme de ressource géothermique n'est pas dépourvue de tout risque pour l'environnement. De plus, un certain nombre d'interrogations quant à la durée de vie de ce type d'installation ne sont, à l'heure actuelle, que partiellement élucidées. Néanmoins, des simulations sur la base de données réelles mesurées ont été entreprises, notamment concernant le risque de refroidissement du sous-sol après une certaine durée d'exploitation et sont disponibles dans la littérature. Conjointement, l'impact d'une densité trop importante d'installations par unité de surface met en évidence la problématique de la régénération du flux de chaleur en profondeur.

L'assurance d'un développement harmonieux des sondes géothermiques verticales nécessite l'application de certains outils, notamment un protocole de forage visant à homogénéiser la description lithologique pour assurer la qualité des données géologiques et hydrogéologiques. L'accent devrait être également mis sur l'utilisation d'un formulaire de demande d'autorisation précis, comprenant toutes les informations nécessaires concernant l'implantation de l'installation projetée. Finalement, l'assurance de ce développement n'est possible que par la mise à jour régulière des données lithologiques et hydrogéologiques acquises lors des forages, soit lors d'études diverses (travaux de diplôme, thèses, cartographie). Cette base de données est une source d'informations nécessaires qui constitue, non seulement un outil de décision mais également de quantification pour l'implantation optimale des sondes géothermiques verticales et le développement durable des futures installations géothermiques de basse température dans le canton de Fribourg.

8. BIBLIOGRAPHIE

Références sur les sondes géothermiques verticales

- Andenmatten N. & Kohl T., 2003. Assessment and evaluation of geothermal potential in Switzerland – Rapport annuel, Commission Suisse de Géophysique, 70 pp.
- Burger A. & al., 1984. Thermique des nappes souterraines. Presses polytechniques romandes, Lausanne, 255 pp.
- Caspar R. & Santiago S., 1988. Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température. Office fédéral de l'énergie. Document SIA D025, 110 pp.
- Eugster W.J. & Rybach L., 2000. Sustainable production from borehole heat exchanger systems. Inc: Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, p.825-830.
- Eugster W.J., 2002. Angewandte Forschung: Workshop zur Qualitätssicherung von geothermischen Response Tests. DIS-Projekt Nr. 46395, 12 pp.
- Hadorn J.-C., 1998. Guide du stockage saisonnier de chaleur. SIA/OFEN. Document D028, Zurich.
- Hopkirk R.J. & Kälin B., 1991. Auslegungskriterien für Erdwärmesondenheizungen – Symp. Edgekoppelte Wärmepumpen Rauschholzhausen. IZW – Berichte 3/91, S. 87-100, Karlsruhe.
- Huber A. & Schuler O., 1997. Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Office fédéral de l'énergie.
- OFEFP, 1994. Directives pour l'exploitation de la chaleur au moyen de sondes géothermiques fermées. Service de la documentation, Berne.
- Parriaux A., 1998. Encore plus de sondes géothermiques. Oui mais... Bull. Géothermie-CH, Société Suisse pour la Géothermie, No 20 :
- Pahud D., 2002. Geothermal energy and heat storage, 133 pp.
- Reuss M. & Sanner B. 1990. Design of closed loop heat exchangers. International Summer School on direct application of geothermal energy, September 1990.
- Rohner E., 2001. Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung.
- Rybach L., Hopkirk R., Eugster W. & Burkart R., 1990. Design and long-term performance characteristics of vertical earth heat exchangers. Geothermal Resources Council Transactions, vol. 14, Part I. pp 343-350.
- Rybach L., 1990. Status and prospection of geothermal heat pump (ghp) in Europe and worldwide; sustainability aspects of GHPs. International Course on geothermal heat pumps, September 1990, 16 pp.
- Rybach L., 2001. Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and worldwide; sustainability aspects of GHPs. Chapter 2.1 International Summer School on direct application of geothermal energy. Int. Geothermal Days Germany 2001: 85-100.
- Rybach L. & Sanner B., 2000. Ground-source heat pump systems, the European experience. GHC Bulletin, March 2000, 11 pp.
- Sanner B., 1999. Kann man Erdwärmesonden mit Hilfe von spezifischen Entzugsleistungen auslegen? Geothermische Energie, 26/27, 1-4.
- Stadler T., Hopkirk R.J. & Hess, K., 1995. Auswirkungen von Klima, Bodentyp, Standorthöhe auf die Dimensionierung von Erdwärmesonden in der Schweiz. – Schlussbericht ET-FOER(93)033, BEW, Bern.
- Signorelli S., 2004. Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems. PhD thesis, ETH – Zurich, No. 15519.

- SSG, 2004. Certificats de qualité pour les sondes géothermiques - Fiche technique 5.
- VDI, 1998. Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelte Wärmepumpen. – VDI 4640, Richtlinien Blatt 2, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf; Beuth Verlag, Berlin.
- Vuataz F-D., 2002. La géothermie et les sondes géothermiques, cours EIVD, 29 pp., non publié.

Références géologiques et hydrogéologiques

- Bertrand J., Hydrap, 1992. Sondage géothermique à Bulle, résultats et enseignements. 16 pp.
- Bouzelboudjen M., Kiraly L., Kimmeier F. & Zwahlen F., 1997. Coupes géologiques et hydrogéologiques, 2^{ème} partie : hydrogéologie. Atlas hydrogéologique de la Suisse, livraison de 1997, planche 8.3. SHGN.
- Corminboeuf P., 1949. Sur les couches de Cucloz-Villarvolard en Suisse occidentale. *Eclogae geol. Helv.* 52/1, 271-294.
- Fischer H. & Luterbacher H., 1963. Mesozoikum der Bohrungen Courtion und Altishofen. *Beitr. zur Geol. Karte der Schweiz, N.F. Nr. 115.*, Schweiz. Geol. Komm.
- Frei E., Meia J., Becker F., Büchi O., Buxtore R., Ryniker K. & Suter H., 1974. Atlas géol. de la Suisse au 1 :25000, feuille 1164 Neuchâtel. Notice explicative par J. Meia & F. Becker (1986).
- Gabus J.-H., 1999. Atlas géol. de la Suisse au 1 :25000 n°103, feuille 1224 Moudon, avec notice explicative.
- Labhart T. & Decrouez D., 1997. Géologie de la Suisse. Ed. Delachaux et Niestlé. 211 pp.
- Gwinner M.P., 1971. Geologie der Alpen; Stratigraphie, Paléogeographie, Tektonik. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchh. Stuttgart.
- Hantke R., 1980. Eiszeitalter. Band 2: Letzte Warmzeiten, Würm-Eiszeit, Eisabbau und Nacheizeit des Alpen-Nordseite vom Rhein – zum Rhône-System. Ott Verlag, Thun.
- Jäckli H., 1962. Die Vergletscherung der Schweiz im Würmmaximum. *Eclogae geol. Helv.* 55/2, 285-294.
- Kiraly L., 1973. Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. Supplément du Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat., 96, 1 carte en couleur au 1:50000. Dép. des travaux publics du canton de Neuchâtel.
- Lateltin O., 1988. Les dépôts turbiditiques oligocènes d'avant-pays entre Annecy (Haute-Savoie) et le Sanetsch (Suisse). Thèse Univ. Fribourg.
- Leu W., Keller B., Matter A., Schärli U. & Rybach L., 1999. Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500 m) – Datenbank Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität. – Bericht Bundesamt für Energie, 79 pp. (ENET-Nr. 9723719).
- Matthey B., 1986. Gisement géothermique du littoral neuchâtelais, possibilités d'exploitation à des fins thermales ou géothermiques ; Recherche d'un site favorable. Office fédéral de l'énergie, Berne, et Département de travaux publics. (Neuchâtel).
- Medici F. & Rybach L., 1995. Geothermal map of Switzerland 1995 (Heat flow Density), Matériaux pour la Géologie de la Suisse: Géophysique No. 30, publiés par la Commission suisse de Géophysique, Studentendruckerei, Zürich.
- Mornod L., 1946. Une nappe d'eau souterraine à Vuadens (Gruyères). *Bull. Soc. fribourg. Sci. Nat.* 38, 1-17.
- Mornod L., 1949. Géologie de la région de Bulle (Basse-Gruyère). Molasse et bord alpin – Matériaux pour la carte géologique de la Suisse.
- OFEG, 2004. Extrait carte géologique, feuille Gruyère 1 :25000 et notice explicative, en préparation.

- Pugin A., 1989. Déglaciation dans la vallée préalpine de la Sarine en Gruyère : une analyse sédimentologique. *Eclogae geol. Helv.* 82/1, 285-324.
- Pasquier F., Bouzelboudjen M. & Zwahlen F., 1999. Notice explicative de la carte hydrogéologique de la Suisse - feuille Sarine au 1 :100'000.
- Python Ch., 1996. Atlas géologique de la Suisse au 1 :25000, No 98, feuille 1185 Fribourg ; notice explicative (1998) de Python Ch., Berger J.-P. & Plancherel R.
- Rieben Ch. & Adatte P., 1996. Prospection et catalogue des sites pour sondes géothermiques dans le canton du Jura. Mandat de l'Office fédéral de l'énergie, Rapport final, MFR SA, 41 pp.
- Schlunegger F., Matter A. & Mange M.A., 1993. Alluvial fan sedimentation and structure of the southern Molasse Basin margin, Lake Thun area, Switzerland. *Eclogae geol. Helv.* 86/3, 717-750.
- Thierrin J., 1990. Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.
- Thüring M., 2003. Wärme aus Boden und Wasser – Kanton Tessin. Istituto Scienze della Terra. Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.

Références sur Internet

- <http://www.augsburgerforages.ch>
- <http://www.buildingphysics.com/manuals/eed.pdf>
- <http://www.caddet-re.org/>
- http://www.dgg.tu-berlin.de/tagungen/dgg2002/abstracts/GR/Eberle_V.htm
- <http://www.dhm.ch>
- <http://www.ecube.ch/Publications/COURS%20POMPE%20A%20CHALEUR.pdf>
- <http://www.energie-schweiz.ch/imperia/md/content/forschung/strategie/6.pdf>
- <http://www.energieforschung.ch/ENET>
- <http://www.erdwaerme-systeme.de/Broschure.PDF>
- http://www.fr.ch/ste/plan_sectoriel.pdf
- <http://www.geoheat.oit.edu/>
- <http://www.geothermal.org/>
- <http://www.geothermie.de>
- http://www.geothermie.de/egec-geothernet/ci_prof/europe/germany/germany.pdf
- http://www.geothermie.de/egec-geothernet/ci_prof/europe/germany/Sanner2.doc.PDF
- <http://www.geothermie.de/egec-geothernet/igd2k1/Design%20of%20closed%20loop%20heat%20exchangers.pdf>
- <http://www.geothermie.de/egec-geothernet/igd2k1/Drilling%20methods%20for%20shallow%20geothermal%20installations.pdf>
- http://www.geothermie.de/geothermie_ch/nr25/geothermie_ch_geothermische_eigenschaften_von_.htm
- http://www.geothermie.de/geothermie_ch/nr32/entwicklung_und_stand_des_mobile.htm
- http://www.geothermie.de/gte/gte32-33/erfahrungen_mit_kommerziell_durc.htm
- <http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/waren-gshp.pdf>
- <http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/waren-btes.pdf>
- http://www.geothermie.de/ueb_seiten/ub_sanner.htm
- http://www.geoportal.cherdw_dir/2_erdw_tech.htm
- <http://www.grundag.ch>

<http://www.iga.igg.cnr.it/index.php>
<http://www.ist.supsi.ch>
http://www.megatel.de/htm/e_61312.htm
<http://www.os.is/unugtp/>
<http://www.pac.ch>
<http://www.suisse-energie.ch/>
<http://www.ubeg.de/Downloads/Auslegung.pdf>
<http://www.uvek.admin.ch/dokumentation/medienmitteilungen/artikel/20041018/02049/index.html>
<http://www.wasserwirtschaft.zh.ch/>

Cartes et plans utilisés dans 'ArcView'

Extrait carte topographique au 1:25000, feuille Gruyères (n°1225)

Extrait carte topographique au 1:25000, feuille Fribourg (n°1185)

Extrait carte géologique au 1:25000, feuille Gruyères (avec l'autorisation de l'OFEG)

Extrait carte géologique au 1:25000, feuille Fribourg

Extrait carte hydrogéologique (région Bulle-La Tour-de-Trême) au 1:100000, feuille Sarine

Extrait carte hydrogéologique (région Guin-Tavel) au 1:100000, feuille Sarine

SIG des zones de protection des eaux au 1:25000 (région Bulle-La Tour-de-Trême).

SIG des zones de protection des eaux au 1:25000 (région Guin-Tavel).

SIG de l'aménagement du territoire au 1:25000 (région Bulle-La Tour-de-Trême).

SIG de l'aménagement du territoire au 1:25000 (région Guin-Tavel).

Bases légales consultées

Loi fédérale sur la protection de l'environnement

Loi fédérale sur la protection des eaux (Leaux, RS 814.20 du 24 janvier 1991)

Ordonnance fédérale sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les altérer, n° 814.2 (15.12.98)

Liste des agents réfrigérants et des liquides caloporteurs selon l'art. 8 (OPEL) – Etat au 1^{er} juillet 1999

Directives sur l'utilisation de la chaleur des eaux et du sol. Office fédéral de la protection d'environnement (avril 1982)

Formulaire de demande d'autorisation d'implantation de pompes à chaleur du canton de Fribourg

Documentation SIA 59, 1982. Géothermie

Documentation SIA D 025, mai 1988. Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température.

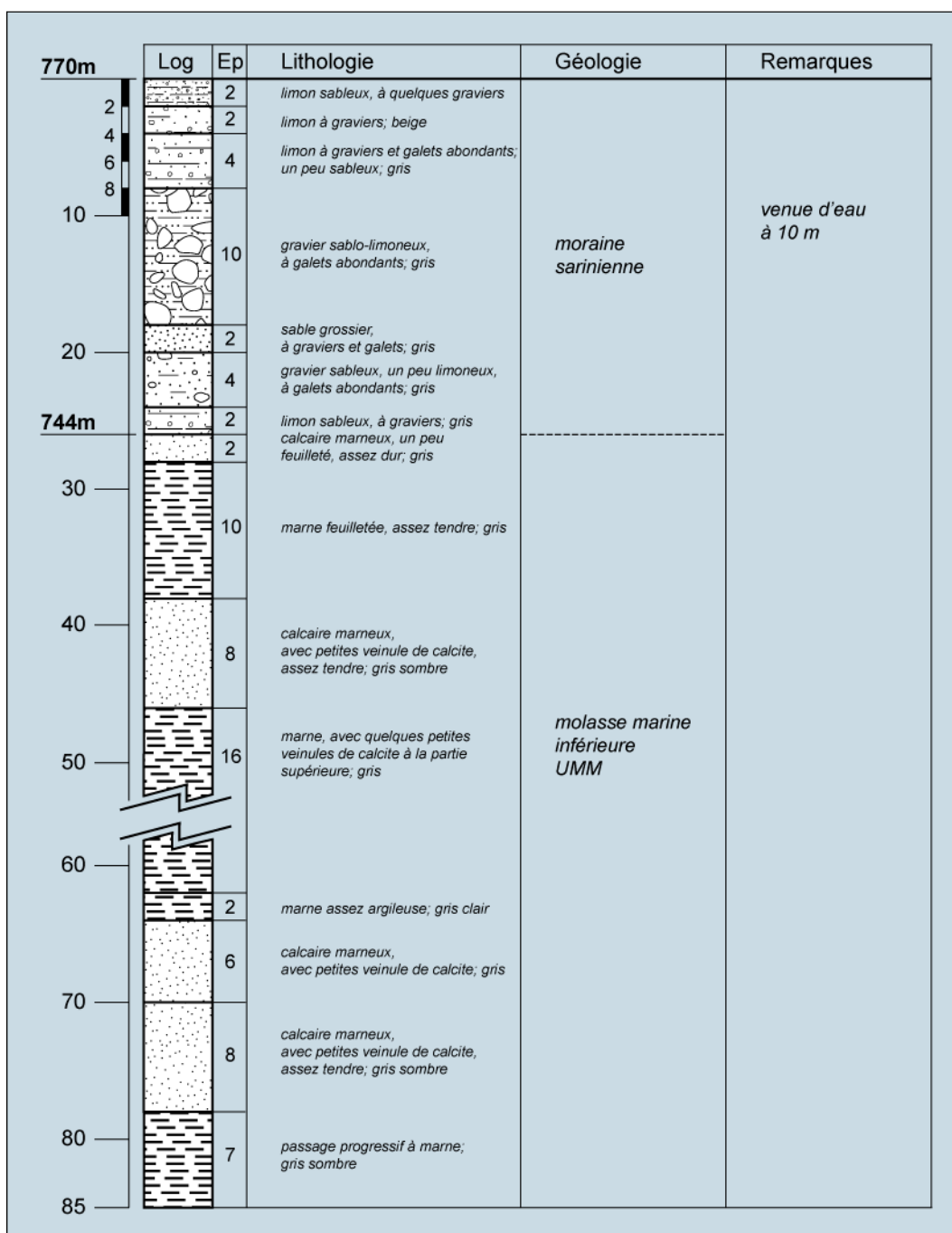
LISTE DES ANNEXES

- Annexe IA : Levés lithologiques (échelle 1:500) – Bulle
- Annexe IB : Levés lithologiques (échelle 1:500) – La Tour-de-Trême
- Annexe IC : Levés lithologiques (échelle 1:500) – Guin (Düdingen)
- Annexe ID : Levés lithologiques (échelle 1:500) – Tavel (Tafers)
- Annexe II : Symboles et Unités
- Annexe III : Liste des agents réfrigérants et des liquides caloporteurs, selon l'article 8 de l'Ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les polluer, OPEL (Etat au 1er janvier 1999)
- Annexe IV : Conductivité thermique des sols argileux et limoneux en fonction de la teneur en eau et du poids spécifique apparent sec.
- Annexe V : Détermination de la chaleur spécifique et capacité calorifique volumique d'un terrain meuble par une méthode simple
- Annexe VI : Outil d'aide au dimensionnement – Nomogramme
- Annexe VII : Légende carte hydrogéologique - Perméabilités, feuille Sarine
- Annexe VIII: Légende carte hydrogéologique - Symboles, feuille Sarine
- Annexe IX : Extrait de la base de données générales
- Annexe X : Extrait de la base de données lithologiques
- Annexe XI : Table de conversion : Conductivité thermique - Puissance de soutirage
- Annexe XII : CD-ROM

Annexe IA : Levés lithologiques (échelle 1:500)

Exemple d'un levé lithologique sur la commune de **Bulle** (Source : Hydrap Sàrl, Broc)

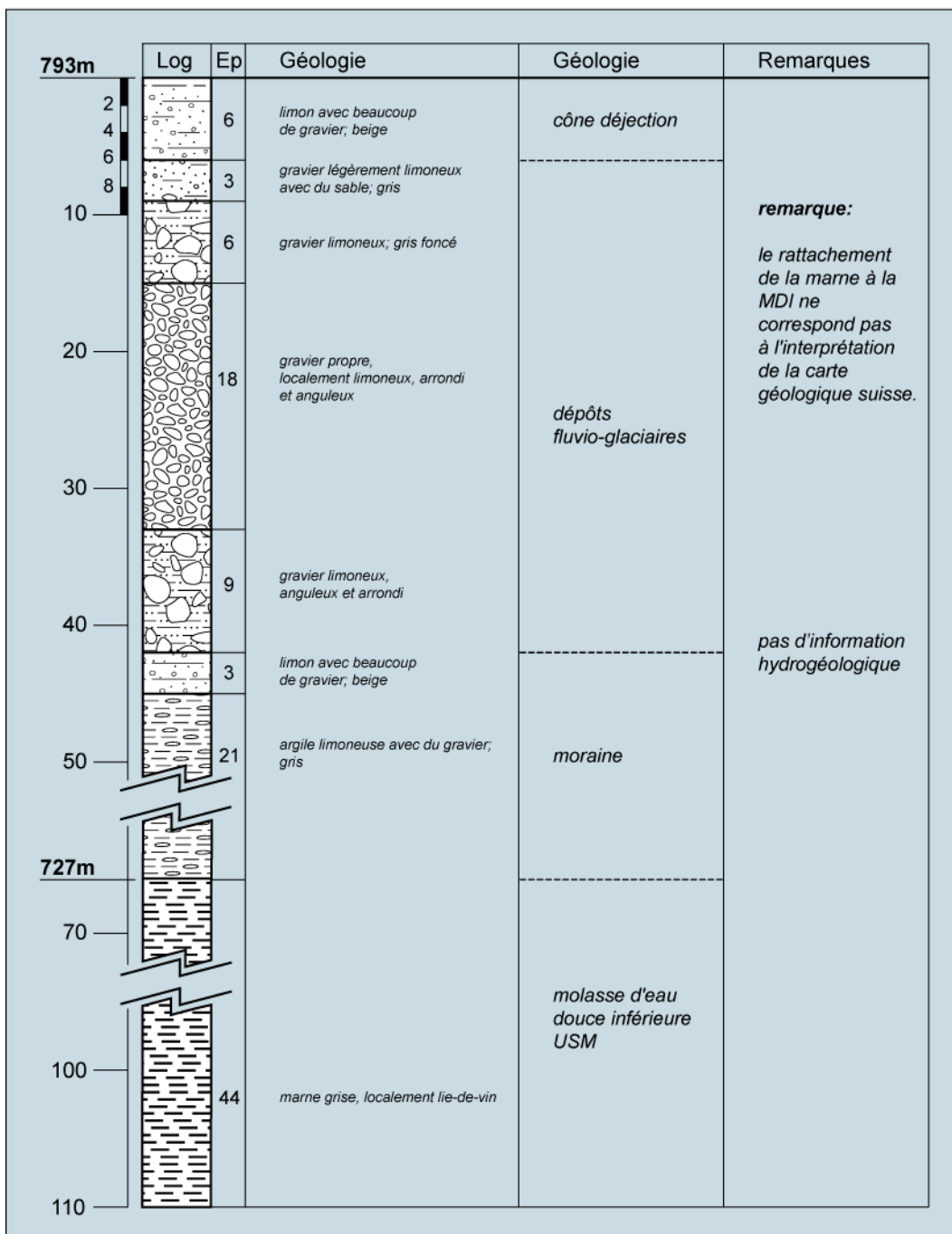
Commune: Bulle	N°: Bu_35
Coordonnées: 570'390/163'510/770	
Caractéristiques de la sonde : 2 x 85 m	
Année du relevé géologique : 2003	



Annexe IB : Levés lithologiques (échelle 1:500)

Exemple d'un levé lithologique à Tour-de-Trême la commune d
 (Source : Mueller & Perrottet, Marly)

Commune: Tour-de-Trême N°: TT_10
 Coordonnées: 570'010/162'220/793
 Caractéristiques de la sonde : 1 x 110 m
 Année du relevé géologique : 2003

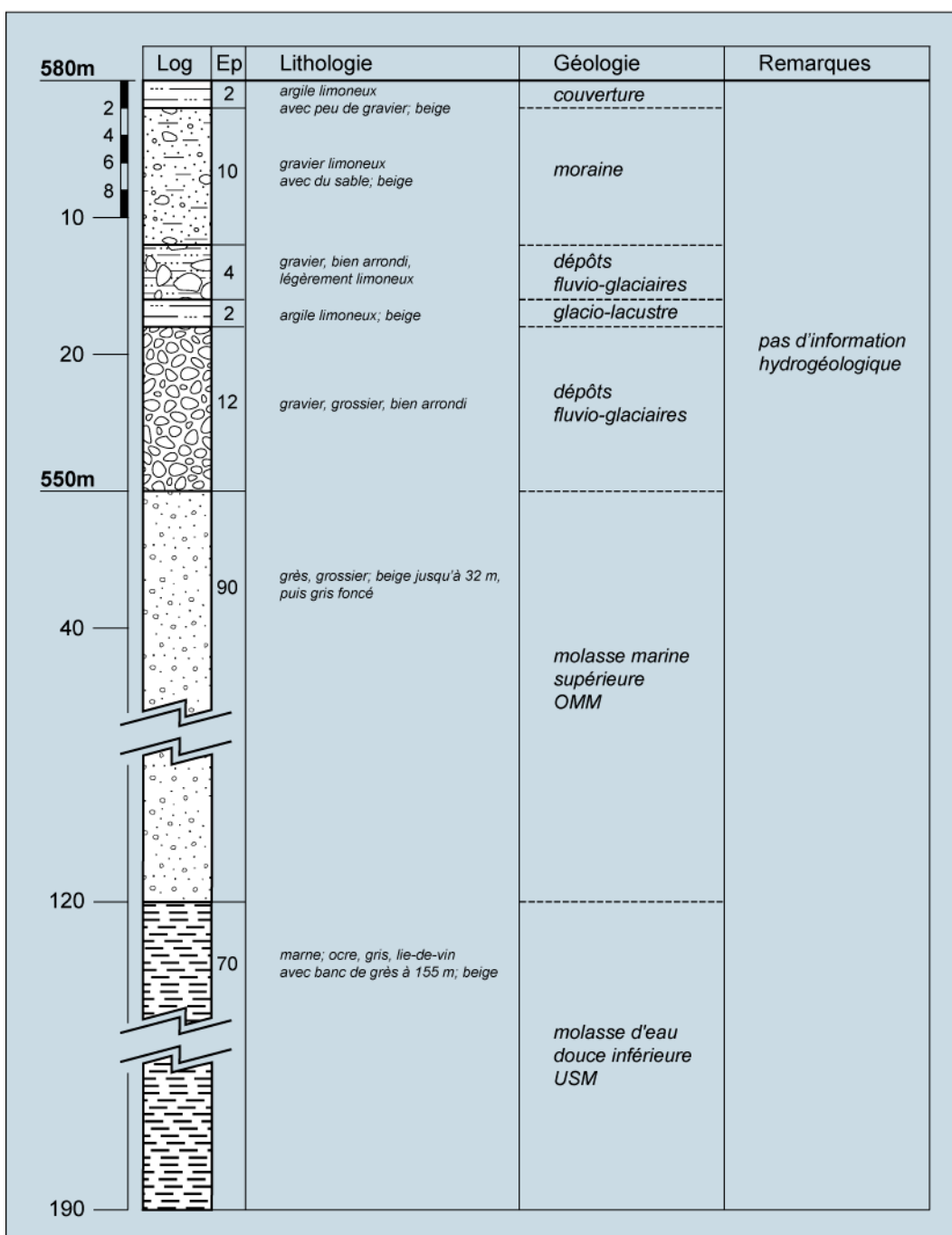


Annexe IC : Levés lithologiques (échelle 1:500)

Exemple d'un levé lithologique sur la commune de **Guin (Düdingen)**

(Source : Mueller & Perrottet, Marly)

Commune: Düdingen	N°: Du_106
Coordonnées: 580'600/189'500/580	
Caractéristiques de la sonde : 1 x 190 m / diamètre 40 mm	
Année du relevé géologique : 2003	



Annexe ID : Levés lithologiques (échelle 1:500)

Exemple d'un levé lithologique sur la commune de **Tavel (Tafers)** (Source : Geolina, Fribourg)

Commune: Tafers	N°: Ta_05
Coordonnées: 583'070/184'380/670	
Caractéristiques de la sonde : 2 x 60 m ?	
Année du relevé géologique : 1993	

670m	Log	Ep	Lithologie	Géologie	Remarques
2		2	limon sableux, un peu limoneux; beige	colluvions ?	pas d'information hydrogéologique
668m		2	marne finement gréseuse; grise, beige		
6		2	grès très fin; gris, beige		
8		4	marne finement gréseuse; grise, beige		
10		2	grès fin; gris		
		2	grès et marne; gris, beige		
		4	grès grossier à très fin; gris, beige		
20		2	grès moyen à très fin; gris, beige		
		2	grès très fin et marneux; gris, beige		
		2	grès moyen à très fin; gris, beige		
		2	marne finement gréseuse; grise, bleue		
		2	grès moyen à très fin; gris, beige		
30		2	marne finement gréseuse; grise, bleue	molasse d'eau douce inférieure USM (Aquitanien)	
		4	grès moyen à très fin; gris, beige		
		2	grès fin, un peu marneux; gris, beige		
		2	grès et marne; gris, beige		
40		2	marne finement gréseuse; grise, bleue		
		2	grès moyen à très fin; gris		
		2	marne finement gréseuse; grise, bleue		
		4	grès fin; gris, beige		
50		2	marne finement gréseuse; grise, bleue		
60		10	grès fin; gris, beige		

Remarques

L'hétérogénéité du levé lithologique est bien représentée sur ce forage-ci. Avec une précision relative de 2m et une description lithologique très détaillée, ce type de relevé fournit d'excellentes informations granulométriques. Malheureusement, le manque d'information hydrogéologiques fait trop souvent défaut.

Annexe II : Symboles et Unités

Symbole	Signification	Unités
A	Amplitude de la température à la surface du sol	[°C]
C	Chaleur spécifique (ou capacité calorifique massique)	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
C _A	Chaleur spécifique de l'aquifère	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
C _S	Chaleur spécifique du sol sec	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
COP	Coefficient de performance d'une pompe à chaleur	[-]
DJ	Degrés jours	[°C.jour]
Ech	Energie thermique pour une période de chauffage	[kg mazout.an ⁻¹]
H _f	Facteur de l'humidité d'un sol	[-]
i	Gradient hydraulique	[-]
K _D	Coefficient de perméabilité de Darcy	[m.s ⁻¹]
p	Porosité	[%]
Pbrut	Poids de l'échantillon + boîte métallique	[kg]
Pnat	Poids d'un échantillon brut	[kg]
Psec	Poids d'un échantillon desséché	[kg]
Q	Flux de chaleur	[J.m ⁻² .s ⁻¹]/[W.m ⁻²]
Qel	Energie électrique consommée annuellement par une PAC	[kWh.an ⁻¹]
Qh	Puissance thermique selon la norme SIA 384/2	[kW]
Qsol	Energie à soutirer du sol annuellement	[kWh.an ⁻¹]
Qtot	Besoin annuel en énergie thermique du bâtiment	[kWh.an ⁻¹]
T	Température	[°C]
Te	Température extérieure de dimensionnement	[°C]
v	Volume	[m ³]
v _{nat}	Volume connu de sol	[m ³]
V	Vitesse des particules d'eau	[m.s ⁻¹]
V _D	Vitesse de Darcy	[m.s ⁻¹]
w	Teneur en eau	[% du poids]
ξ	Diffusivité thermique	[m ² .s ⁻¹]
η	Rendement annuel d'une installation de chauffage	[%]
λ	Conductibilité thermique	[W.m ⁻¹ .K]
ρ	Poids spécifique	[kg.m ⁻³]
ρ _d	Poids spécifique apparent sec	[kg.m ⁻³]
τ	Période (24 heures, 1 année) exprimée en secondes	[s]

Annexe III : Liste des agents réfrigérants et des liquides caloporteurs

selon l'article 8 de l'Ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les polluer, OPEL

(Etat au 1er janvier 1999)

1. Agents réfrigérants

R717	<i>Ammoniac, NH₃</i>
R290	<i>Propane</i>
R600a	<i>Isobutane</i>
R134a	<i>Fluorocarbones partiellement fluorés (HFC)</i>
R404A	
R407A	
R407B	
R407C	
R507	

2.2 Additifs

Il est strictement interdit d'utiliser comme additifs (par exemple comme inhibiteur de corrosion) des substances difficilement biodégradables, telles que des composés chlorés et des sels de métaux lourds.

2. Liquides caloporteurs

2.1 Substances de base

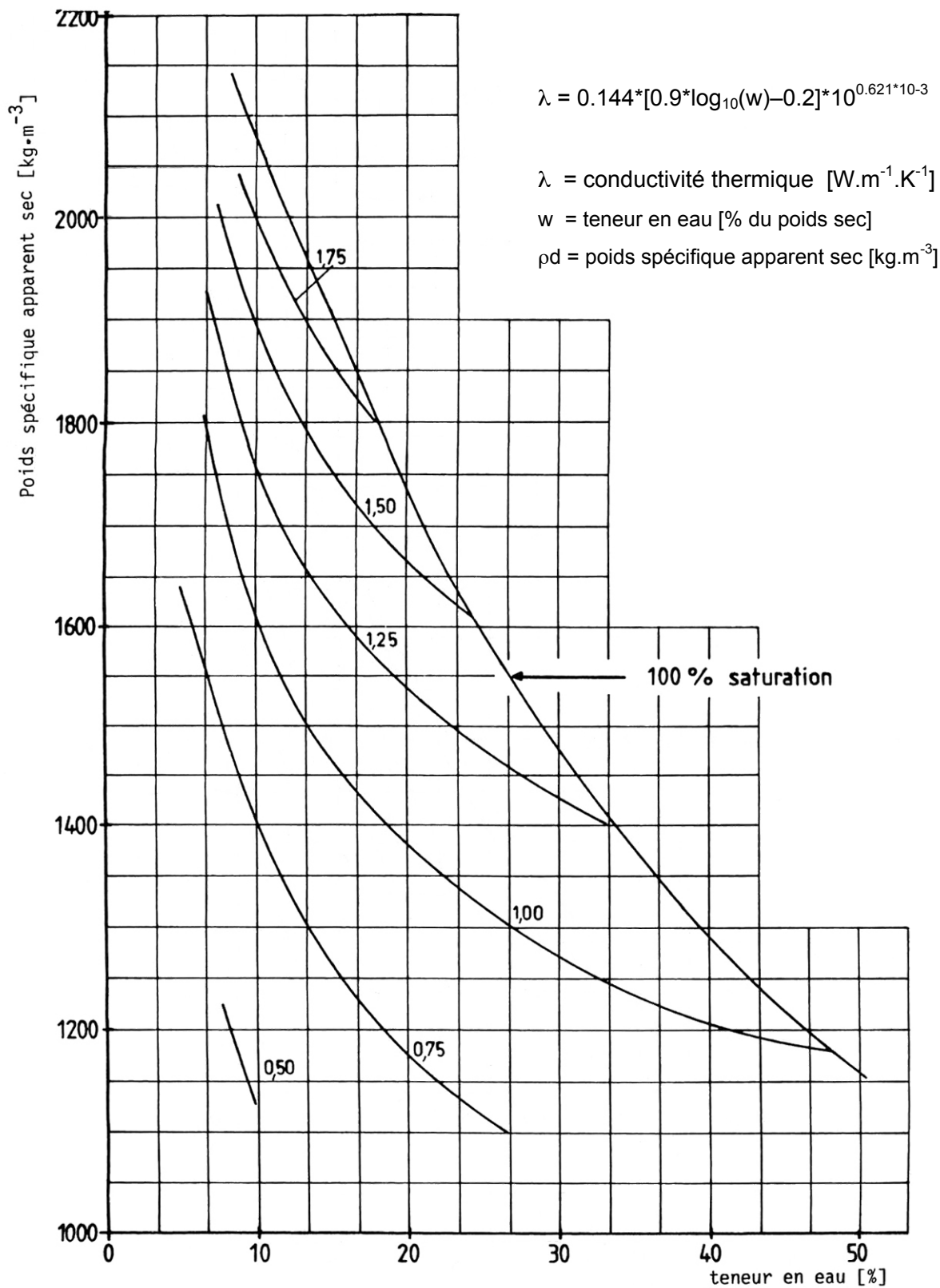
Ethylène glycol
Propylène glycol
Polyéthylène glycol
Alcool éthylique (éthanol)
Alcool méthylique (méthanol)
Chlorure de calcium
Chlorure de magnésium
Chlorure de sodium
Chlorure de potassium
Carbonate de potassium
Carbonate de sodium
Acétate de potassium
Formiate de potassium

Remarque :

Les HFC appartiennent aux substances persistantes ; en tant que gaz à effet de serre, ils sont soumis depuis 1997 au protocole de Kyoto sur le climat. Pour les substances et les mélanges techniquement appropriés, les demi-vies moyennes dans l'atmosphère sont supérieures à 14 ans.

C'est pourquoi, il convient, dans la mesure du possible, de renoncer à leur emploi. Voir Informations No2 (1994) concernant l'Ordonnance sur les substances et l'Ordonnance sur la protection de l'air.

Annexe IV : Conductivité thermique des sols argileux et limoneux
 en fonction de la teneur en eau et du poids spécifique apparent sec
 (Kersten, 1949)



Annexe V : Détermination de la chaleur spécifique et capacité calorifique volumique d'un terrain meuble par une méthode simple

Détermination de la chaleur spécifique

Afin de déterminer la chaleur spécifique d'un terrain meuble, il faut préalablement déterminer les deux paramètres suivants :

- La température du terrain
- La teneur en eau du terrain (méthode décrite dans l'annexe VI)

Après avoir déterminé ces deux paramètres, on lit sur la figure VIII.1, la valeur de la chaleur spécifique du terrain en fonction de la température, sur la courbe moyenne. La valeur obtenue correspond à la chaleur spécifique (C_s) du terrain desséché (0% d'eau).

On obtient la chaleur spécifique du terrain (C_p), compte tenu de la teneur en eau (w), en introduisant la valeur C_s dans l'équation ci-dessous :

$$C_p = ((100 \cdot C_s) + 4190 \cdot w) \cdot (100 + w)^{-1}$$

où C_p = chaleur spécifique du terrain [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

w = teneur en eau [en % du poids]

C_s = chaleur spécifique du terrain desséché à 105°C [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

Exemple

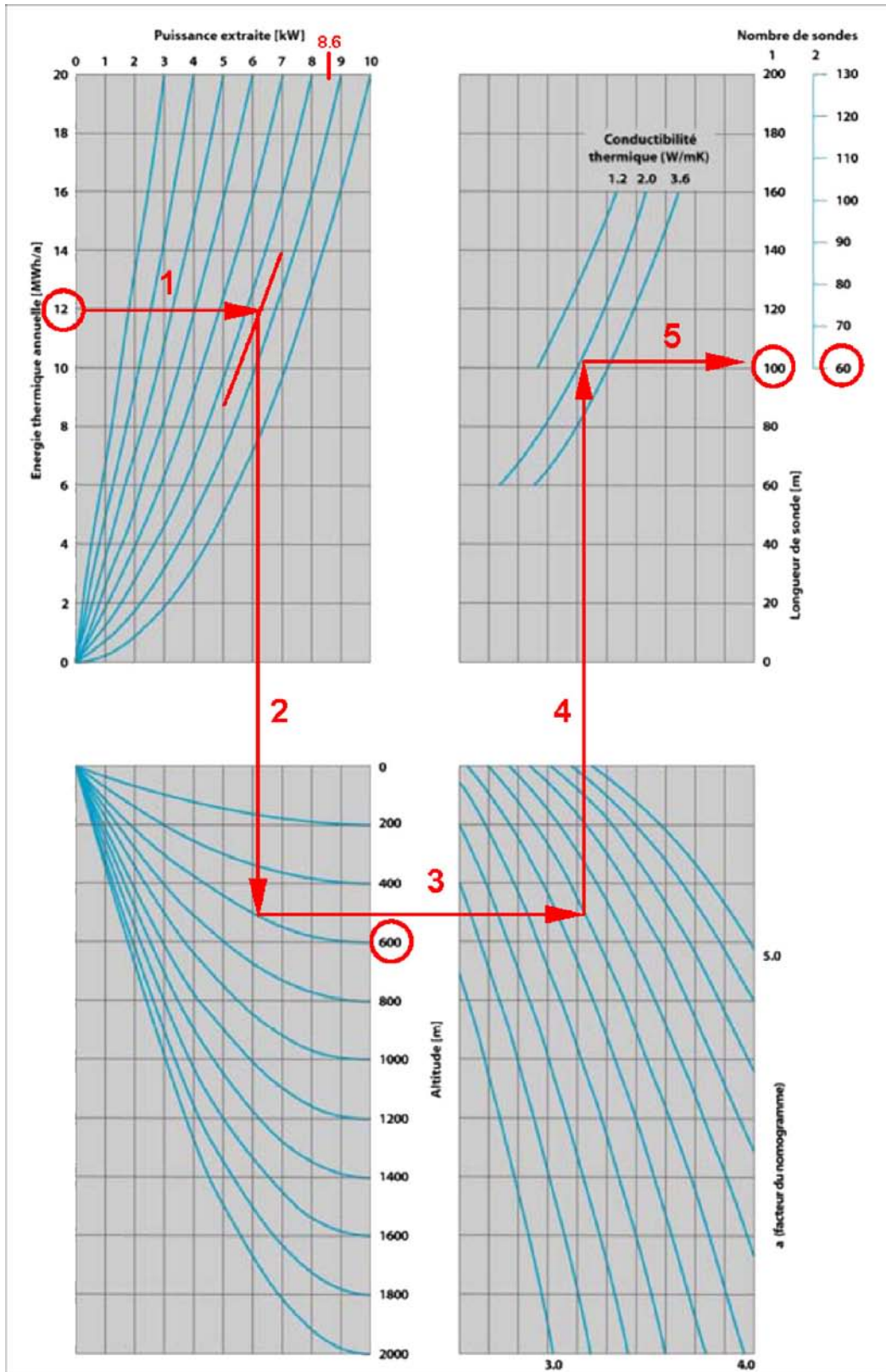
Données : température du terrain 10°C
 Teneur en eau 14%
 Poids spécifique 1800 kg.m⁻³

D'après la formule, on obtient : $C_s = 0.171 \text{ Kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ ou $720 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$

$$C_p = 1146 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$$

$$C_v = 1800 \cdot 1146 = 2.06 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$$

Annexe VI : Outil d'aide au dimensionnement – Nomogramme



Nomogramme utilisé pour le dimensionner une sonde géothermique (d'après Stadler & al., 1995 et VDI 4640)

Légendes

- a = facteur du nommogramme
- Q_{Ha} = énergie thermique annuelle [kWh/a]
- β_a = facteur de performance annuel
- Q_{pa} = énergie annuelle demandée par les installations périphériques [kWh/a]
- t_a = temps total annuel [h/a]

Principales formules

$$P_e = (Q_H * (\beta_a - 1)) / \beta_a$$

$$a = \frac{Q_{Ha}}{((Q_{ha} / \beta_a) - Q_{pa})}$$

$$Q_{Ha} = Q_{Ha} * t$$

Exemple :

a) énergie thermique annuelle: 12 [kh/a]

b) puissance extraite nécessaire:

$$P_e = (Q_H * (\beta_a - 1)) / \beta_a = 8.6 \text{ [kW]}$$

c) altitude topographique: 600 [m]

d) facteur "a" du nomogramme:

$$a = Q_{ha} / ((Q_{ha} / \beta_a) - Q_{pa}) = 3.96 \text{ [-]}$$

e) conductibilité thermique λ moy.: 2.3 [W/mK]

⇒ longueur évaluée

- pour 1 sonde:

env 100 [m]

- pour 2 sondes:

env 65 [m]

Annexe VII : Légende carte hydrogéologique-Perméabilités, feuille Sarine



Annexe VIII : Légende carte hydrogéologique-Symboles, feuille Sarine

Structures jouant un rôle hydrogéologique Hydrogeologisch wirksame Strukturen		Arbeitsversion	Druckversion	Sources importantes - Wichtige Quellen
	Direction et pendage des couches, Streichen und Fallen der Schichten	•		Inconnu Unbekannt
	Anticlinaux avec direction du pendage axial Antiklinalen mit Richtung des Axialgefälles	○		Débit entre 0 et 6 l/min 0 - 6 l/min geringe Schüttung
	Synclinaux avec direction du pendage axial Synklinalen mit Richtung des Axialgefälles	+	•	Débit entre 6 et 60 l/min 6 - 60 l/min mittlere Schüttung
	Faillles, décrochements Verwerfung, Transversalverschiebung	⊗	•	Débit moyen compris entre 60 et 600 l/min 60 - 600 l/min mittlere Schüttung
	Chevauchements et charriages Aufschiebungen, Überschiebungen	⊗	•	Débit moyen supérieur à 600 l/min Mehr als 600 l/min mittlere Schüttung
Données hydrologiques - Hydrologische Angaben				Emergence diffuse d'eau souterraine Diffuser Grundwasseraufstoss
	Ligne de partage des eaux de surface Oberirdische Wasserscheiden	• ⊕ ⊗ ⊗		Source karstique Karstquelle
	Station limnigraphique fédérale, cantonale Eidgenössische, kantonale Abflussmessstation		•	Source d'eau minérale et/ou thermale Mineralquellen oder Thermen
Eaux souterraines - Grundwasser				Ouvrages - Technische Bauten
	Limite latérale de nappe alluviale Seitliche Begrenzung des Grundwasserstromes	○		Captages d'eau souterraine - Grundwasserfassungen
	Equipotentielles en nappe libre Isohypsen der freien Grundwasseroberfläche	•	•	Inconnu / Unbekannt
	Idem en nappe captive Dito für gespanntes Grundwasser	⊗	•	0 - 1000 l/min
	Equipotentielle en aquifère libre (roches cohérentes) Isohypsen des Grundwassers in Festgesteinen, ungespanntes Grundwasser	⊗	⊗	1000 - 5000 l/min
	Idem pour nappe captive Dito für gespanntes Grundwasser	⊗	⊗	5000 - 10000 l/min
	Sens d'écoulement des eaux souterraines dans les terrains meubles Fließrichtung des Grundwassers im Schotter	⊗	⊗	Supérieur à 10000 l/min - Mehr als 10000 l/min
	Idem dans les roches cohérentes Dito im Festgestein	□-60	□-60	Autres ouvrages - Andere technische Bauten
	Infiltration de cours d'eau dans les eaux souterraines Flussinfiltration in das Grundwasser	□-60	□-60	Forage de prospection (avec profondeur en mètres) Sondierbohrung (mit Tiefenangabe)
	Exfiltration de l'eau souterraine dans les cours d'eau Fluss wirkt als Vorfluter für das Grundwasser	▼	▼	Idem avec informations hydrogéologiques Dito mit hydrogeologischen Angaben
	Section d'infiltration de cours d'eau avec lit temporairement asséché: en roches cohérentes, en terrains meubles Flussversickerungsstrecke mit zeitweise trockenem Flussbett: im Festgestein, im Schotter	■	■	Alimentaire artificielle Künstliche Versickerung
Phénomènes karstiques et structures souterraines Karsterscheinungen und unterirdische Strukturen				Station de régulation des eaux de drainage (pompage ou injection) Entwässerungs- oder Regulierungspumpwerk
	Axe de paléovallée Alte Flusstäler		730	Barrage pour centrale hydroélectrique importante, avec cote de la retenue Stauwehr eines grösseren Flusskraftwerks mit Staukote
	Doline Doline			Canal de drainage important Wichtiger Entwässerungskanal
	Liaison hydraulique reconnue par essai de traçage Hydraulische Verbindung durch Markierungsversuch			Galerie de captage, captage par forage horizontal, drain de captage Fassungsstollen, Fassung durch Horizontalbohrung, Sickerleitung
	Bassin fermé Becken ohne oberirdischen Abfluss			Captage d'eau en lac ou rivière Oberflächenwasserfassung

Annexe IX : Extrait de la base de données générales

BASE DE DONNEES FORAGES

COMMUNE	NOUVEAU NO	ANCIEN NO	ANNEE REALISATION	X [m]	Y [m]	Z [m]	PARCELLE NO	FORAGE		SONDE		DOSSIER NO	REQUERANT
								PROFONDEUR [m]	CARACTERISTIQUE	PROFONDEUR	CARACTERISTIQUE		
Bulle	Bu_01	1	1990	570560	164160	765	1384	60	3 x 80 m / d=120 mm		90.0.1645	Mauroux-René	
Bulle	Bu_02	3	1991	570720	164410	752		65			91.0.2505	Granger-Leonard	
Bulle	Bu_03	4	1991	571660	163410	745		50	4 x 60 + 24 x 40 + 24 x 50			EEF	
Bulle	Bu_04	5	1992	571710	163520	760		50				EEF	
Bulle	Bu_05	6	1992	570740	164620	750		75			91.0.1855	Sté. Constuc. En Dardens	
Bulle	Bu_06	7	1993	570675	164150	754		50			93.0.0315	Bader J. & Ch.	
Bulle	Bu_07	8	1993	570660	164415	765		95			93.0.1015	Burgener-L.	
Bulle	Bu_08	9	1993	570175	163920	775		80			93.0.1062	Magre J. Pierre	
Bulle	Bu_09	10	1993	570200	163930	775		50			93.0.1607	Droux J. Bernard	
Bulle	Bu_10	11	1993	570190	163920	775		65			93.0.1548	Beaud J. Francois	
Bulle	Bu_11	12	1993	571640	163490	745		80			93.0.2043	Chappuis Yvan	
Bulle	Bu_12	13	1993	570230	163920	770		50			93.0.2065	Savin Gaston	
Bulle	Bu_13	15	1993	570220	163900	776	3010	70	2 x 70 m / d=160 mm		93.0.1252	Favre Roland	
Bulle	Bu_14	16	1995	570230	163780	770	3184	117	2 x 75 m		95.3.0106	Bays & Schafer	
Bulle	Bu_15	17	1995	570180	163950	778	3019	65	2 x 65 m / d=120 mm		95.3.0104	Allemann Yves	
Bulle	Bu_16	18	1995	570250	163900	770		60			95.3.0361	Grandjean Michel	
Bulle	Bu_17	19	1995	570100	163365	780		65			95.3.0331	Menoud Philippi	
Bulle	Bu_18	20	1995	570270	163930	770		65			95.3.0399	Gantini Papaux-Aléc	
Bulle	Bu_19	21	1995	570350	163600	767		70	2 x 70 m		95.3.0247	Repond Yves Alain	
Bulle	Bu_20	22	1995	570350	163700	775		50			95.3.0362	Buschi Gérald	
Bulle	Bu_21	23	1997	570339	163638	768	3608	60	1 x 60m et 1 x 50m		97.3.0160	Pasquier Roger	
Bulle	Bu_22	24	1997	570275	163547	770	3608	60	1 x 60m et 1 x 50m			Pasquier Roger	
Bulle	Bu_23	24	1997	570500	164200	768		55			97.3.0162	Frossard Pierre	
Bulle	Bu_24	42	1998	570270	163610	768	3596	140	1 x 140 m		99.3.0360	Hori Kochiro	
Bulle	Bu_25	38	2000	570390	163570	767	3952	140	1 x 140 m ?		00.3.0208	Irnhof Florence	
Bulle	Bu_26	28	2000	570320	163620	768		130			00.3.0092	Garcia José Manuel	
Bulle	Bu_27	28	2000	570646	164469	767	2211	100	1 x 100 + 1x80		00.3.0165	Schaller P. Eggenchwiler A.	
Bulle	Bu_28	30	2001	570264	163589	768	3595	60	2 x 60 m		01.3.0331	Busch Jacques et Micheline	
Bulle	Bu_29	36	2002	570467	163665	768	4541	75	2 x 75 m		01.3.0426	Charrière Nicolas	
Bulle	Bu_30	37	2002	570685	164430	767	1793	85	3 x 85 m / d=32 mm		96.3.0166	Probst George	
Bulle	Bu_31	40	2002	570475	163675	768	3952	75	2 x 75 m			Suchet M-J et C.	
Bulle	Bu_32	31	2002	572412	163945	795	1500	210	1 x 210 m		02.3.0123	Trezza Catherine	

Annexe X : Extrait de la base de données lithologiques

CODAGE LITHOLOGIQUE														
FORGE NO	HORIZON 1 CODE	EP [m]	HORIZON 2 CODE	EP [m]	HORIZON 3 CODE	EP [m]	HORIZON 4 CODE	EP [m]	HORIZON 5 CODE	EP [m]	HORIZON 6 CODE	EP [m]	HORIZON 7 CODE	EP [m]
Bh_01	C5	2	C2	42	C5	2	C2	4	C5	10				
Bh_02	C5	20	C2	34	C5	11								
Bh_03	C5	2	C2	8	O1	2	OMM1	8	OMM2	6	OMM1	10	OMM1	2
Bh_04	O0	2	C2	2	O1	6	O5	6	OMM1	6	OMM1	19	OMM1	4
Bh_05	C5	2	C2	18	C5	4	C2	20	O1	12	C5	6	OMM1	8
Bh_06	C5	24	O1	4	C2	2	C5	20						
Bh_07	C5	6	O1	8	C2	80	HEV1	21						
Bh_08	C5	2	C2	8	O1	4	C2	8	C5	12	HEV3	31		
Bh_09	C5	4	C2	14	O1	4	C2	8	HEV1	20				
Bh_10	C5	65												
Bh_11	C5	24	HEV2	58										
Bh_12	C5	50												
Bh_13	C2	2	O1	58	C2	6	O1	4	UMM1	32				
Bh_14	C2	20	C4	27	C4	23	C4	7	C5	32				
Bh_15	C2	8	C4	30	C5	3	C5	23						
Bh_16	C5	2	O1	10	C2	8	C5	4	O4	12	C5	4		20
Bh_17	C5	2	C2	17	HEV3	17	HEV1	2	HEV3	27				
Bh_18	C2	4	O1	12	C2	8	C5	41						
Bh_19	C4	3	C3	10	C2	31	UMM3	26						
Bh_20	O0	2	C2	4	O1	14	C2	16	C5	14				
Bh_21	C2	4	UMM2	29	UMM1	4								
Bh_22	C5	32	UMM1	29										
Bh_23	C5	2	C2	8	O1	6	C2	20	O1	19				
Bh_24	C5	2	C2	34	UMM2	104								
Bh_25	C5	6	C2	12	O1	4	C2	18	UMM2	8	UMM1	16	UMM1	38
Bh_26	C5	6	C2	15	O1	15	UMM1	95	C5	6	UMM1	24	UMM2	30
Bh_27	C5	8	C2	8	O1	8	C5	6	C2	12	C5	24	UMM2	
Bh_28	C5	2	C2	6	O4	4	C2	20	UMM1	28				
Bh_29	C5	4	C5	18	O2	8	C5	3	UMM1	42				
Bh_30	O3	8	C5	38	O	15	O4	25						
Bh_31	C5	18	C2	13	UMM1	44								
Bh_32	O8	6	C2	4	C5	6	C2	16	O3	4	O1	2	C5	4
Bh_33	C5	2	C2	2	O1	6	C2	28	UMM1	92				
Bh_34	C5	4	O1	14	C2	6	O1	6	C5	4	C2	6	O1	6
Bh_35	C5	8	C2	10	C3	2	C2	4	C5	2	UMM1	12	UMM2	8
Bh_36	C2	8	O1	6	C2	6	C2	6	O2	24	C5	20	HEV1	48
Bh_37	C5	24	C2	4	C5	18	HEV1	76						
Bh_40	C5	25	C2	8	C5	30	UMM1	125						

Annexe XI : Table de conversion : Conductivité thermique- Puissance de soutirage

TABELLE DES PUISSANCES DE SOUTIRAGE THERMIQUE
MAXIMUM EN FONCTION DE LA QUALITE DU TERRRAIN

CONDUCTIBILITE D TERRAIN λ [W/m K]	PUISSANCE DE SOUTIRAGE [W/m]			
	avec ECS - 2100h/a		sans ECS - 1800h/a	
	sans migration d'eau souterraine	avec migration d'eau souterraine	sans migration d'eau souterraine	avec migration d'eau souterraine
0.1	19.4		20.7	
0.2	20.6		22.0	
0.3	21.8		23.2	
0.4	22.9		24.4	
0.5	24.1		25.7	
0.6	25.3		26.9	
0.7	26.4		28.1	
0.8	27.6		29.3	
0.9	28.7		30.5	
1.0	29.8	35.0	31.6	36.6
1.1	30.9	36.2	32.8	37.8
1.2	32.1	37.3	34.0	39.0
1.3	33.2	38.5	35.1	40.2
1.4	34.2	39.6	36.2	41.3
1.5	35.3	40.6	37.3	42.4
1.6	36.3	41.7	38.4	43.4
1.7	37.3	42.7	39.4	44.5
1.8	38.3	43.8	40.5	45.6
1.9	39.4	44.8	41.6	46.7
2.0	40.4	45.8	42.6	47.7
2.1	41.4	46.8	43.7	48.7
2.2	42.4	47.8	44.7	49.7
2.3	43.4	48.8	45.6	50.7
2.4	44.3	49.7	46.6	51.6
2.5	45.3	50.6	47.6	52.5
2.6	46.2	51.5	48.5	53.4
2.7	47.1	52.4	49.4	54.3
2.8	47.9	53.2	50.3	55.1
2.9	48.8	54.0	51.2	55.9
3.0	49.7	54.8	52.0	56.7
3.1	50.5	55.6	52.9	57.5
3.2	51.3	56.4	53.7	58.3
3.3	52.1	57.2	54.7	59.1
3.4	52.9	57.8	55.3	59.8
3.5	53.7	58.6	56.3	60.5
3.6	54.4	59.3	56.8	61.1
3.7	55.2	60.0	57.5	61.8 64.7
3.8	55.9	60.6	58.3	62.5 65.5
3.9	56.6	61.2 64.4	59.0 63.1	63.1 66.1
4.0	57.3	61.7 65.0	59.7 63.8	63.7 66.8

 VALEURS EXTRAPOLEES SELON EQUATIONS

DIMENSIONNEMENT DES LONGUEURS DES SONDÉS GEOTHERMIQUES
DOUBLE U, RECOMMANDÉES EN FONCTION DE LA PUISSANCE FRIGORIFIQUE DE LA PAC INSTALLÉE.

Source: Revue Allemande "Geothermische Energie", pages 26-27, No 3-4, octobre-novembre 1999

Remarques : ECS=Eau chaude sanitaire

Annexe XII : CD-ROM

Un CD-ROM est joint avec ce travail, Il contient :

MANUSCRIT

- Manuscrit du travail de diplôme en format *pdf*
- Manuscrit du travail de diplôme en format *Word*

FIGURES

- Figures présentes dans le manuscrit en format *png*

BASES DE DONNEES

- Informations générales sur la sonde
- Lithologique
- Table de conversion : Conductivité thermique-Puissance thermique de soutirage
- Base de données « PARAM » - Données thermiques selon la lithologie

OUTILS

- Programme de calcul
- Système d'informations géographiques (SIG), fichiers *shp* et *dbf*
 - de la région de Bulle-La Tour-de-Trême
 - de la région de Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)

RECOMMANDATIONS

- Protocole de forage en format *Excel*
- Demande d'autorisation pour l'implantation de SGV en format *Excel*

LEVES LITHOLOGIQUES INFORMATISES

- De la commune de Bulle (abréviation Bu) en format *Illustrator*.
- De la commune de la Tour-de-Trême (abréviation TT) en format *Illustrator*
- De la commune de Guin (Düdingen, abréviation Du) en format *Illustrator*
- De la commune de Tavel (Tafers, abréviation Ta) en format *Illustrator*

LEXIQUE

TERMES	DEFINITIONS
Aquifère	Volume de roche meuble ou indurée perméable, contenant une nappe d'eau souterraine. Les aquifères d'eau thermique présentent un intérêt particulier pour l'exploitation géothermique.
Centrale de cogénération chaleur-force	Installation à couplage chaleur-force; construction compacte, à faible encombrement (cf. également "Couplage chaleur-force").
Chaleur spécifique volumique	Caractéristique d'un matériau ou d'un stock d'absorber de la chaleur ou de la restituer. Pour les matériaux, la chaleur spécifique volumique est indiquée en kWh/m ³ K.
Coefficient de performance annuel (COP)	Production d'énergie thermique de la pompe à chaleur par année, divisée par la consommation d'électricité du compresseur et de la pompe de circulation. La consommation d'électricité est inversement proportionnelle au COP mesuré. Un bon COP possède une valeur supérieure à 4.
Colonne de production	Conduite verticale disposée dans un forage, servant à pomper le fluide caloporteur en surface.
Conductibilité thermique	Propriété physique d'un matériau (roche, acier, matière synthétique, etc.) de transporter l'énergie thermique (chaleur).
Couplage chaleur-force	Production combinée de chaleur (chaleur de chauffage ou de processus) et de force (pour la production d'électricité). Une installation à couplage chaleur-force peut fournir prioritairement de la chaleur ou de l'électricité.
Coûts externes	Ils regroupent les préjudices causés à la santé, au matériel, à la forêt, au paysage et par le transport, ainsi que d'éventuels frais de prévention et inhérents à l'effet de serre. Des écobilans permettent de les recenser (cf. également "Ecobilans").
Doublet	Forage de production et forage d'injection d'une installation géothermique.
Echangeur de chaleur	Il sert au transfert de chaleur d'un agent caloporteur à un autre.
Ecobilans	Ils ont pour objet le relevé de la charge écologique imputable à un produit, un processus ou une exploitation. Selon les recommandations de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) pour des calculs de rentabilité énergétique prenant en considération les coûts externes, un supplément de 4,5 centimes par kWh pour le mazout et de 3 centimes par kWh pour le gaz doit être ajouté aux prix actuels de l'énergie.
Efficacité d'un stock souterrain	Rapport entre la quantité de chaleur extraite et celle qui est injectée par année, en pour cent.

TERMES	DEFINITIONS
Fluide caloporteur	Il s'agit d'un liquide ou d'un mélange liquide (saumure, antigel) servant au transfert de la chaleur dans une sonde ou une nappe de tubes. Pour les pieux énergétiques, qui ne devraient pas être exploités en dessous de la limite de risque de gel afin d'éviter des dommages, on utilise de l'eau pure comme fluide caloporteur.
Molasse	L'ensemble des sédiments qui se déposent au front et à l'arrière d'une chaîne de montagne en formation. L'essentiel de ces dépôts sont dus à l'érosion des montagnes naissantes par les rivières. Dans ce cas, le terme de molasse ne se limite pas au grès (sables lithifiés) mais à tout un cortège de roches comme des argiles (dépôts de plaine d'alluvion), des conglomérats (dépôts de galets dans des lits de rivière), des charbons (dépôts d'origine organique comme la tourbe des marais), des calcaires lacustres ou marins (dus en partie au dépôt de coquillages), des marnes (calcaires mélangés avec des argiles), des cendres volcaniques (dus à l'activité volcanique), etc.
Pompe à chaleur	Une source d'énergie de haute valeur, par exemple l'électricité, permet de porter une basse température, par exemple la chaleur du sous-sol, à un niveau plus élevé, pour l'utiliser aux fins de chauffage et de préparation d'eau sanitaire. Une pompe à chaleur est en principe composée d'un évaporateur, d'un compresseur, d'un condenseur et d'un dispositif de détente.
Recharge thermique	Apport de chaleur supplémentaire dans le sous-sol, par exemple de l'énergie solaire ou des rejets de chaleur, pour en éviter le refroidissement excessif.
Sonde double en U	Deux tubes en U implantés dans un forage, à l'intérieur desquels circule un fluide caloporteur.
Supplément sur le prix de l'énergie	Supplément comptable sur le prix marchand du mazout et du gaz, pour tenir compte des coûts externes. De nombreux cantons et communes exigent la prise en considération des coûts externes dans les calculs de rentabilité pour les adjudications publiques.
Température de livraison	Dans le circuit de chauffage, température mesurée à la sortie de la pompe à chaleur. Des températures de livraison basses (35 à 40° C) constituent une condition pour réaliser de bons coefficients de performance annuels (COP).