

Exploration - Évaluation géologique - Puits Ittigen-01

Maître d'ouvrage: Nom

12-03-2018

Géologue: Nom

Chef de projet: Nom

Ce document est un exemple, qui est destiné à servir comme modèle d' "Évaluation géologique" pour les projets et les opérations de forage/puits de géothermie profonde en phase d'exploration.

- Le but de ce document est d'informer les Canton Suisses dans leur travail d'autorisation, sur ce qui pourrait être présenté par un maître d'ouvrage/ d'œuvre comme analyse géologique de forage/puits d'un projet de géothermie profonde. Durant les opérations de forage/puits, ce document peut servir de support pour la surveillance des activités. Ce document réunit aussi les informations géologiques nécessaires à la préparation du programme de forage.
- Le niveau de détails présenté dans un tel document doit être ajusté en fonction des dangers et des risques associés à la construction et l'exploitation des puits. (par exemple un puits avec une probabilité significative de rencontrer du gaz naturel aura un profil de risque et une gestion du risque différente d'un puits d'eau non-artésien)
- Le contenu de ce document est fictif et doit être remplacé avec des informations actuelles.
- Ce document constitue un socle pour la préparation du programme de forage.

Abréviation / Terminologie	3
1. Information générale	4
1.1. Information clés	4
1.2. Stratégie	5
1.3. Objectifs	6
2. Description de la zone d'intérêt et des objectifs	6
2.1. Géologie régionale.....	6
2.2. Description de la zone d'intérêt géologique.....	7
3. Évaluation géologique / Géophysique / réservoir.....	11
3.1. Modèle géologique et géophysique	11
3.2. Incertitudes géologique et géophysiques	12
3.3. Etudes de terrain	12
3.4. Modèle de réservoir et incertitudes (si existant)	13
3.5. Pronostic géologique	14
3.6. Pression de pore.....	14
3.7. Objectif géologique et critère d'arrêt de forage (TD).....	15
3.8. Puits de références et qualité des données	15
4. Stratégie d'acquisition de données.....	16
4.1. Objectifs	16
4.2. Obligations.....	17
4.3. Evaluation du réservoir	17
5. Evaluation économique	18

Abréviation / Terminologie

MD = measured depth = profondeur mesurée

TVD = True vertical depth = profondeur verticale réelle

RKB = rotary kelly bushing = référence à la fourrure de transmission

GL = ground level = référence au niveau du sol

TD = total depth = profondeur finale

BOP = Blow out preventer = bloc d'obturation du puits

s.g. = standard gravity = gravité standard (pour un fluide: ratio entre la densité du fluide et la densité de l'eau)

Logging = mesure de paramètres du sous-sol ; aussi appelé diaggraphie

Wireline = câble de descente d'équipement dans le puits

Liner = tubage ancré dans le tubage supérieur (et non pas jusqu'à la tête de puits)

Liner hanger = Equipement permettant l'ancrage du liner

Packer = Equipement fait d'élastomère permettant d'assurer l'isolation entre deux tubages

Kick = venue de fluide dans le puits (eau, gaz...)

Mudlogging = mesure des paramètres de boue

1. Information générale

1.1. Information clés

Numéro de permis de recherche/exploration: [4738901872-MN-GEO-2017](#)

Zone du permis: [50 km²](#)

Date de fin du permis: [01.01.2023](#)

Maître d'ouvrage: [Ittigen Géothermie AG](#)

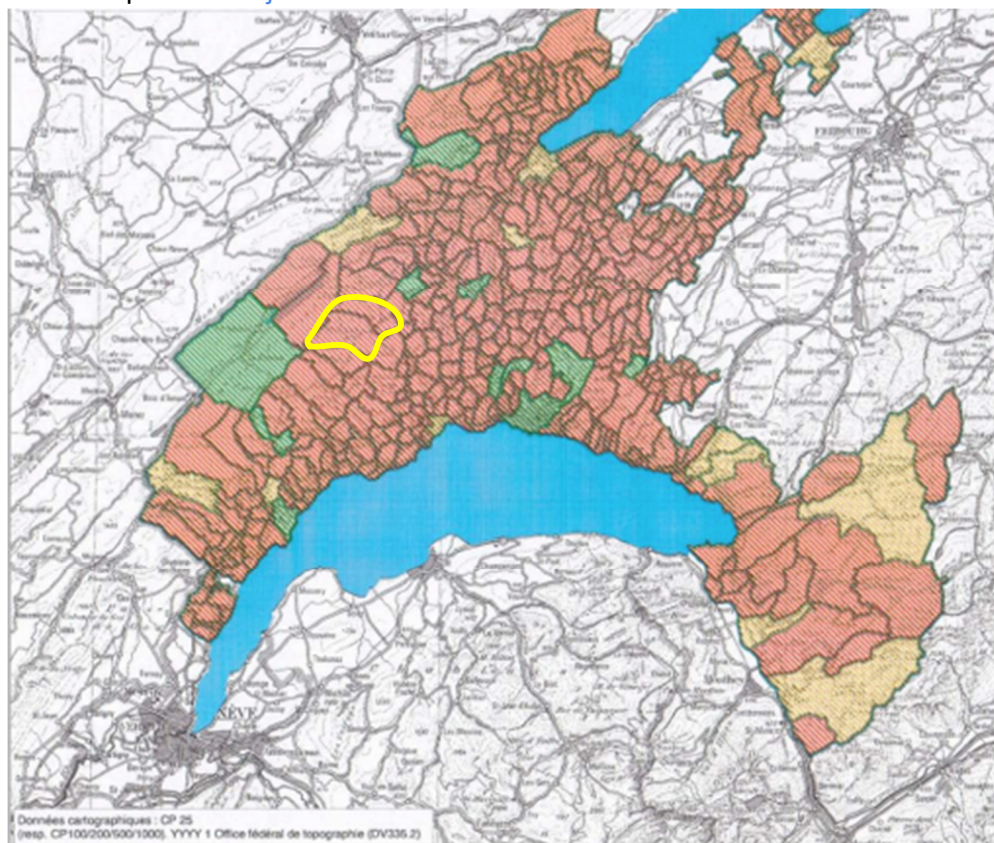
Structure géologique: [Massif d'Ittigen – Bassin Molassique / Préalpes](#)

Nom des puits: [Ittigen-01 / Ittigen-02](#)

Type de puits: [exploration](#)

Altitude à la vertical de l'objectif: [948 m au dessus du niveau de la mer](#)

Carte du permis: [en jaune sur la carte ci-dessous.](#)



Source: [Canton de Vaud](#)

1.2. Stratégie

La stratégie globale pour le permis BE-99877-ITTG-2019 est de prouver l'existence d'une anomalie géothermique significative générée par une circulation profonde dans le bassin molassique et au travers d'un réseau secondaire de fractures. Deuxièmement, la stratégie consiste à prouver la faisabilité d'une installation géothermique de 12 MW avec production d'électricité et chauffage urbain pour la ville de Ittigen.

Dans le Massif de Ittigen, sont connus des sources d'eau chaude (25 degrés) qui sont déjà exploitées pour du chauffage urbain dans le cadre du projet de développement de la ville. Sur la base de ce modèle de circulation d'eau, le Massif de Ittigen constitue un candidat à la réalisation d'un puits d'exploration. Le forage du puits est prévu pour Mai 2020.

Les résultats des forages géothermiques du Canton voisin de Thurgovie de 2019 constitueront une réduction du risque économique associé à l'exploration du Massif de Ittigen, en apportant des informations géologiques supplémentaires. Cette analyse sera alors mise à jours avec ces informations.

Le Massif de Ittigen se situe dans le Canton de Bern, dans les Préalpes. L'objectif géologique se situe à environ 4km au Nord du centre de la zone du permis.

Le Massif d'Ittigen et le puits Ittigen-01 sont considérés de risque "intermédiaire", grâce à l'existence de circulation d'eau dans la région. Cependant, les incertitudes associées au réservoir en profondeur ne permettent pas de réduire ce risque à un niveau inférieur. Les données sismiques montrent que la structure géologique, où cette circulation a lieu, s'étend jusqu'à l'objectif du puits Ittigen-01, et à une profondeur où la température devrait atteindre les 152 degrés. Cependant ces données sismiques n'ont pas permis d'évaluer l'impact des fractures naturelles dans cette zone.

L'exploration du Massif de Ittigen avec le puits Ittigen-01 constitue un compromis entre "profondeur du réservoir", "température" et "risques de forage". Plus à l'Est, la structure est plus profonde et pourrait contenir de l'eau plus chaude. Cependant, cet objectif demanderait de forer des formations connues pour être très résistantes, et donc de rencontrer des difficultés de forage importantes.

Les considérations suivantes pourront aussi être incluses:

- Carte détaillée de la zone de permis, avec emplacement des objectifs des puits.*
- Différentes coupes géologiques de l'objectif*

1.3. Objectifs

Les objectifs pour l'exploration du Massif de Ittigen sont:

- *Vérifier la circulation profonde de l'eau géothermique*
- *Prouver la faisabilité de production et injection jusqu'à un débit de 6.000m³/jour, et d'une température d'eau en surface au dessus de 150 degrés.*
- *Tester le potentiel du Massif avant la fin du permis de recherche*
- *Collecter des informations géologiques pour les futurs projets d'exploration dans les Préalpes.*

Commentaire: la définition de ces objectifs est clé, car elle dirige la stratégie d'exploration globale, ainsi que tous les ajustements futurs qui y seront portés.

2. Description de la zone d'intérêt et des objectifs

Ce chapitre vise à prouver une connaissance géologique et géophysique robuste, présenter le travail réalisé, et documenter les conditions du sous-sol et leurs incertitudes.

2.1. Géologie régionale

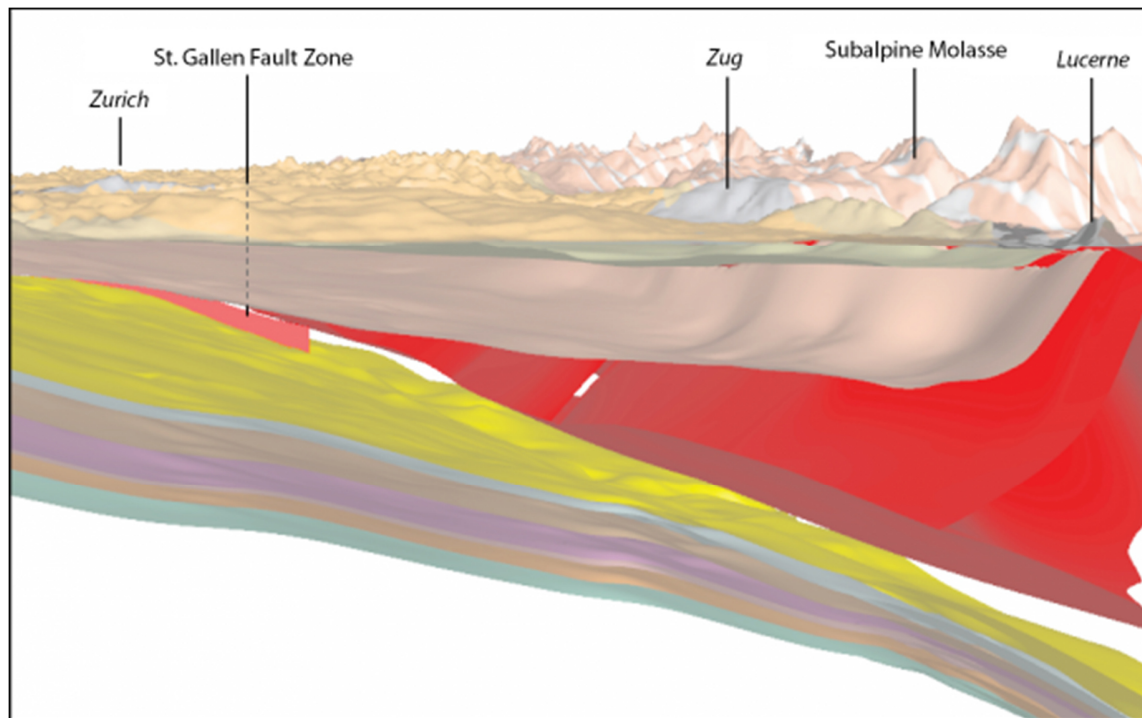
La géologie régionale du Canton de Bern et de Fribourg consiste en...

...

Dans cette région, la zone d'intérêt se situe...

...

Celle-ci est présenté dans les coupes suivantes de...



Source: swisstopo

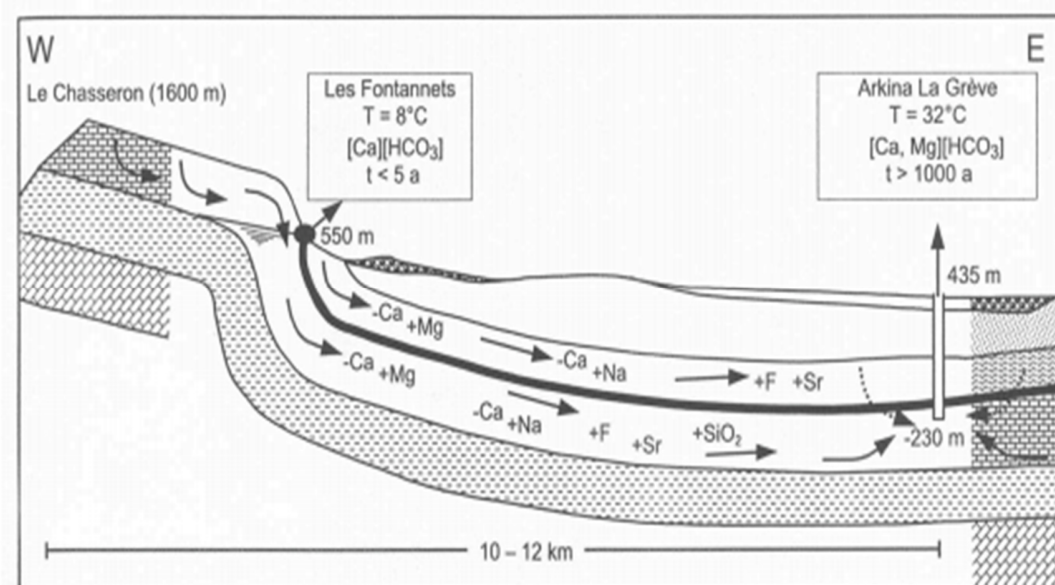
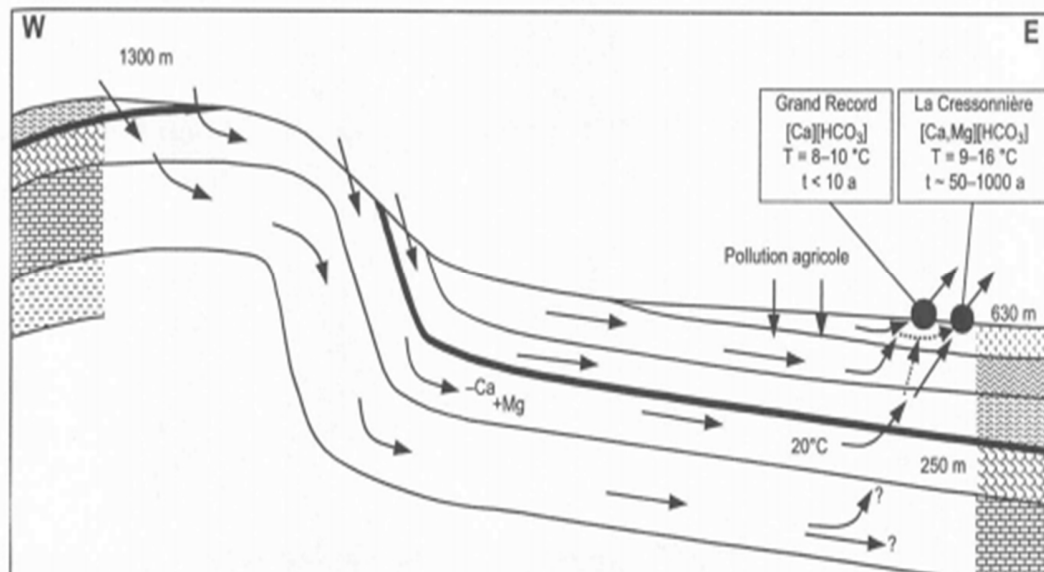
Etc...

2.2. Description de la zone d'intérêt géologique

Le massif de Ittigen est représenté par une large structure plongeante dans une direction Nord, à environ 50 km des Préalpes. La structure est fortement plissée dans la partie Sud et Est, qui en marque la limite.

Pour les deux modèles conceptuels principaux, le chargement en eau de la structure a lieu dans les Alpes et les Préalpes dans la région de Napf.

Les deux "modèles conceptuels" principaux sont représentés par les schémas ci-dessous:



Source: Potentiel géothermique du Canton de Vaud; Muralt 1999

D'autres modèles conceptuels ont aussi été étudiés. Ceux-ci s'étendent vers d'autres zones géologiques avec les zones de recharge d'eau suivantes:

- Zone du Stockhorn
- Zone du Eiger
- Zone de Schrattenflu

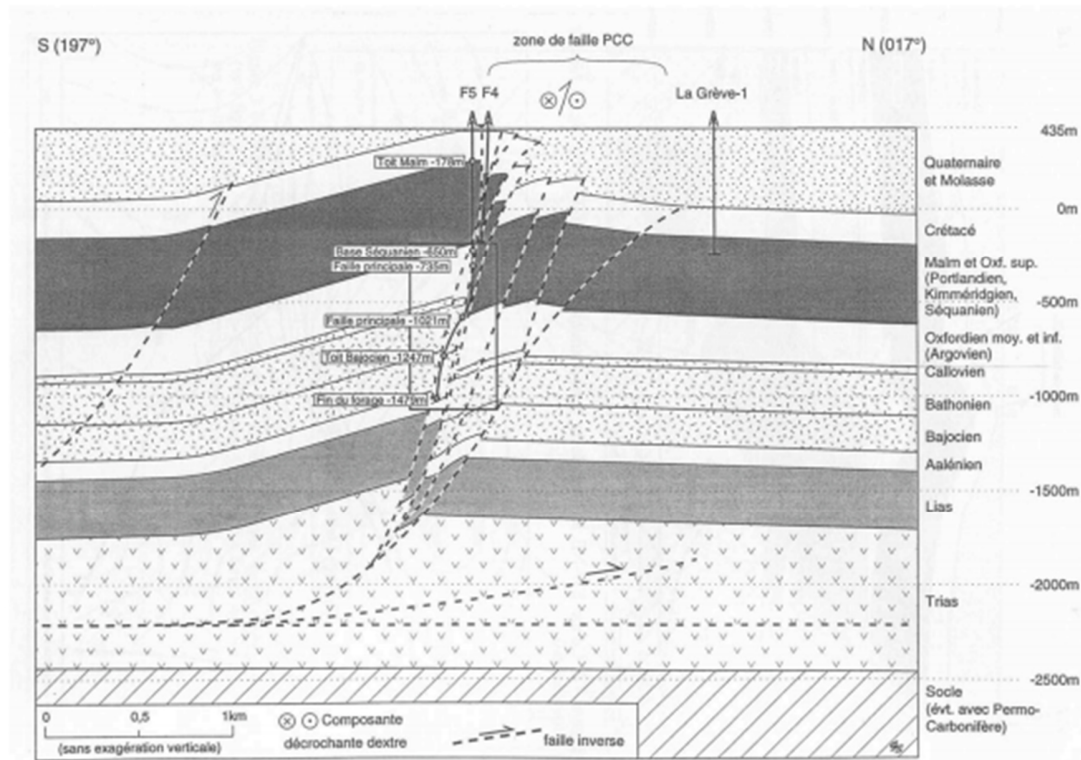
(Autre exemple de modèle conceptuel disponible à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003578>)

...

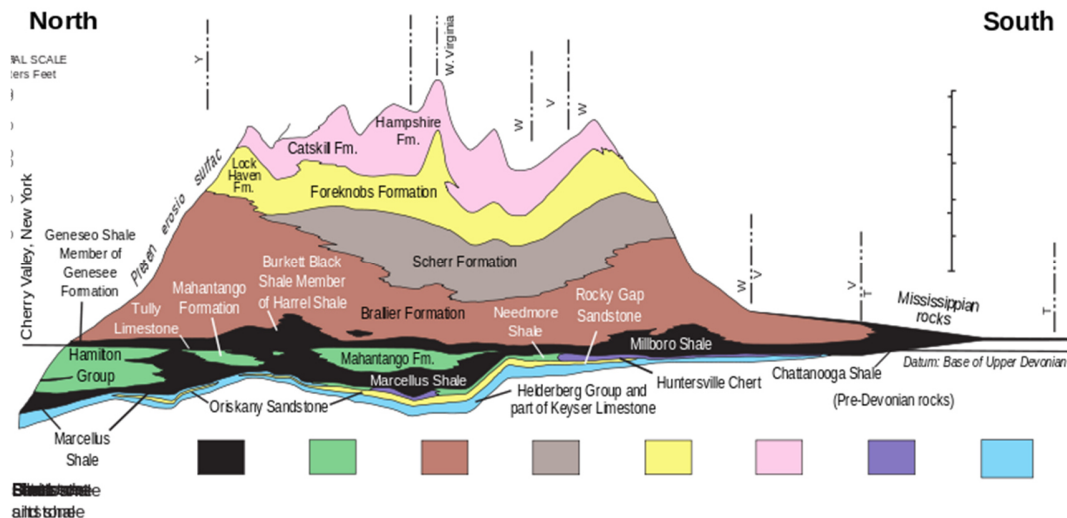
...

Dans le cas du modèle conceptuel de Napf, il a été évalué que les roches exposées ont une vitesse de chargement rapide, estimée à 2.000.000m³ par an. Pour le cas du Stockhorn, la vitesse de rechargement a été évaluée à...
etc...

Ci-dessous, sont présentées les coupes géologiques pour les 3 scénarios alternatifs de circulation d'eau:



Source: Potentiel géothermique du Canton de Vaud; Vuataz et al. 1999



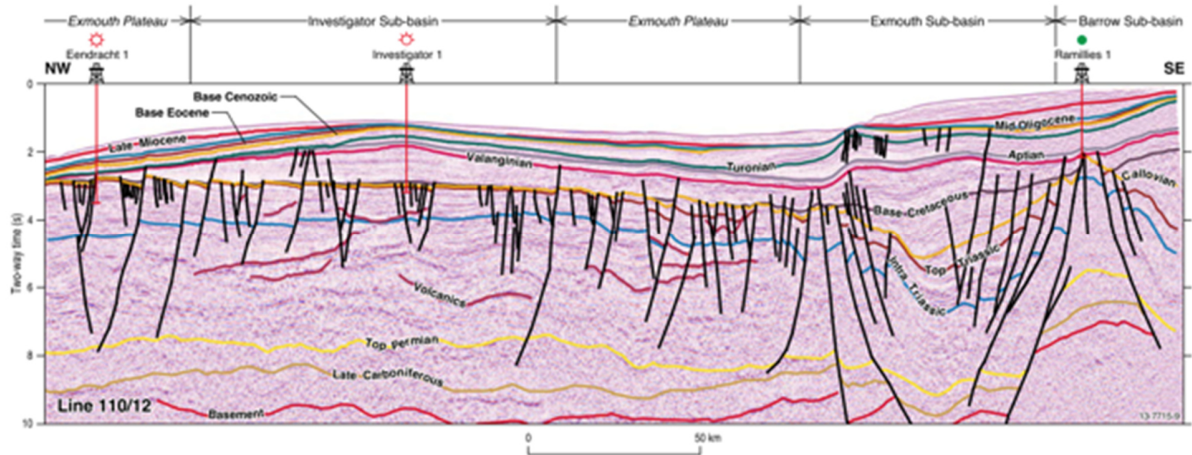
Source: wikipedia

Ces alternatives sont considérées comme ayant une connectivité réduite de l'aquifère profond, et ainsi moins probable de générer une circulation profonde suffisante pour une exploitation. De plus, une isolation géologique plus forte est attendue pour les formations exposées dans la zone du Eiger...

Données sismiques:

Les données sismiques interprétées sont présentées ci-dessous. Celles-ci montrent une faille majeure à l'endroit même où une forte conductivité est attendue...

Une trajectoire de puits est présentée sur cette coupe.



Source: wikipedia

Le choix de l'objectif du puits permettra de tester les circulations d'eau provenant des zones de Napf, Stockhorn et Eider. Il n'a pas été possible de trouver un objectif permettant de tester les 4 scénarios de circulation avec un même puits.

Le scénario de circulation de la zone de Schrattenfluh a été évalué avec une probabilité moyenne/faible de fournir une conductivité suffisante pour l'exploitation géothermique. Ainsi le test des trois autres scénarios est l'option qui présente la plus grande chance de succès d'exploration.

etc....

3. Évaluation géologique / Géophysique / réservoir

3.1. Modèle géologique et géophysique

Avant la réalisation du forage du puits Ittigen-01 ou Ittigen-02, et que les propriétés du réservoir soient prouvées, le modèle décrit ici se base principalement sur les analyses géologiques, les données sismiques, et sur des systèmes de circulation similaires au sein des Alpes.

L'origine de la circulation d'eau du massif de Ittigen a été principalement dé-risquée avec l'analyse de recharge sur les sites de ... et...

Les trajets de circulation ont été partiellement confirmés avec les données sismiques, cependant l'impact des failles majeures sur ces trajets est inconnu et pourrait affecter considérablement les circulations et le transfert de chaleur...

...
...
...
...

Les considérations suivantes pourront aussi être incluses:

- Les données géologiques et géophysiques réunies, et leurs interprétations*
- Etudes de terrain*
- Photos aériennes et satellite*
- L'analyse de sources d'eau locales*
- Analyses de minéraux*
- etc...*

3.2. Incertitudes géologique et géophysiques

Le risque principal du massif de Ittigen réside dans la présence de fractures verticales significatives, à la fois conductrice et isolante (dépendant de la profondeur), qui pourraient être la raison de transfert d'eau rapide entre réservoirs très profonds et peu profonds.

Ces failles pourraient en fait imposer des trajets de circulation complexes, qui pourraient fortement impacter la compositions des eaux et la conductivité d'unités géologiques.

Celles-ci pourraient générer des fronts d'eau froide une fois la production du réservoir initiée.

Etc...

...

...

Probabilité de succès:

La probabilité de rencontrer les paramètres du réservoir nécessaires pour parvenir à des débits de production/injection de 6.000m³ / jour, et une température en tête de puits de 133 degrés a été calculé à 19%. Les détails de cette probabilité sont présentés ci-dessous:

- Présence de l'aquifère à 2800m TVD - probabilité: 0,75*
- Température du réservoir de 142 degrés - probabilité: 0,7*
- Perméabilité permettant une production de 6.000m³/jour - probabilité: 0,4*
 - Perméabilité permettant une injection sûre au même débit - probabilité: 0,9*

etc...

3.3. Etudes de terrain

Une étude de terrain a été conduite et a identifié des failles majeures sur un axe NE-SW, avec des inclinaisons entre 20 et 45 degrés. Ces fractures devraient être rencontrées à 500 m TVD, 1.250 m TVD et 1.750m TVD, à la verticale de l'axe géologique.

Ainsi à 500 m TVD, des pertes sévères de fluide pourraient affecter le forage...

...

...

Les failles plus profondes pourraient générer des connections avec des aquifères moins et plus profonds. Ainsi, celles-ci pourraient être l'origine de surpressions ou sous-pressions localisées. L'impact sur le forage devrait être tel que...

...

...

La stabilité du sol en surface a été évaluée comme étant suffisante pour pouvoir mener les opérations de forage de façon sûre (installation de l'unité de forage).

3.4. Modèle de réservoir et incertitudes (si existant)

Le modèle de réservoir considère un volume de 20 millions de m³, s'étendant sur 140 km dans l'axe Nord-Sud et sur 7 km dans l'axe Est-Ouest.

L'épaisseur du modèle varie de 20 m à 550 m au niveau de l'objectif géologique.

Les formations géologiques représentées sont:

- *Le dogger supérieur*
- *Le dogger inférieur*
- *....*

La perméabilité attendue varie entre:

- *12mD - scénario pessimiste*
- *120mD - scénario optimiste*

Cet intervalle de perméabilité est basé sur...

Les conditions limites du modèle choisies sont:

- *Faïlle isolante au Sud...*
- *Connexion au support d'un aquifère profond au Nord, à pression quasi-constante.*

La résolution du modèle est de 10x10x1 mètre, avec une résolution affinée dans un rayon de 100m autour du puits de production et du puits d'injection...

Les simulations réalisées ont permis d'identifier que:

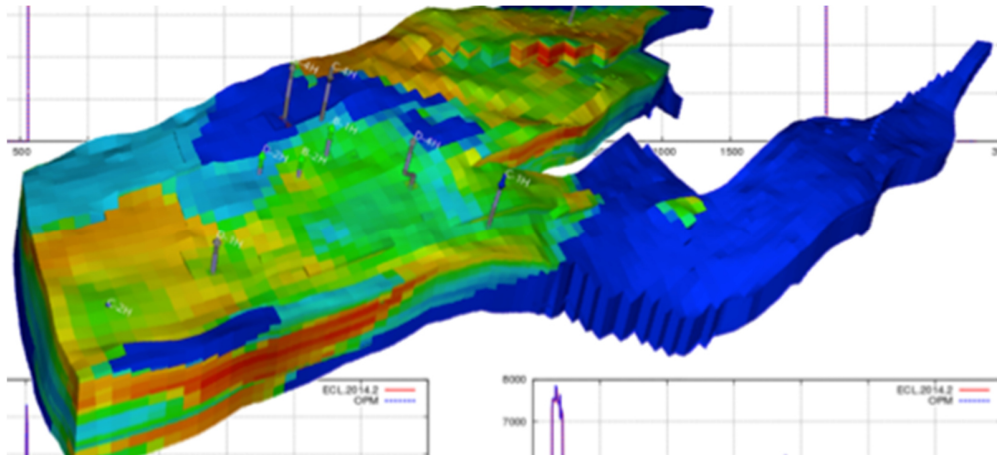
- *Un volume de réservoir de 23 millions de m³ serait le volume minimal nécessaire à une exploitation durable sur 30 ans.*
- *Une conductivité minimum de xxx est nécessaire pour limiter le rabattement du puits de production à 250 m.*
-

Les incertitudes du modèle de réservoir sont:

- *Perméabilité verticale...*

...

Ci dessous est représenté une capture d'écran du modèle de réservoir.



Source: opm-project.org (free licence)

3.5. Pronostic géologique

Le pronostic géologique a été évalué ci-dessous:

Toits des formations géologiques	profondeur (m TVD)	incertitude (m)
Sol	0	0
Formation xx	100	+/- 2
Formation yy	430	+/- 10
Molasse	1330	+/- 20
Faille de Thun	1800	+/- 100
Formation zz	2650	+/- 50
Massif de Ittigen	3320	+/- 60

La référence de ces profondeurs est l'altitude à la verticale de l'objectif géologique

3.6. Pression de pore

La éléments préliminaires d'évaluation de la pression de pores montrent une pression hydrostatique, avec un potentiel de variation de + 0,3 s.g. (densité) lors de forage au travers de failles, qui pourrait mettre le puits en communication avec des formations sur-pressurisées distantes.

Les considérations suivantes pourront aussi être incluses:

- *Un graphique d'estimation de la pression de pores peut être inclus.*

3.7. Objectif géologique et critère d'arrêt de forage (TD)

Emplacement de l'objectif géologique:

Coordonnées géographiques: Latitude: 42 degré 12' 02" N (+ référence, ex WGS84)

Longitude: 7 degré 01' 31" E

Coordonnées UTM: Nord: 5 118 227 m (Zone/Secteur: 32T)

Est: 347 647 m

Profondeur: 3380m TVD GL

Élévation à la surface de cet emplacement: 660 m au dessus du niveau de la mer.

Les critères d'arrêts de forage sont:

- Profondeur de 3.500 m TVD GL atteinte.
- Identification de paramètres du réservoir suffisant pour l'exploitation du réservoir (débit et température)

Les considérations initiales pour le choix d'un emplacement de forage en surface ont montré un certain niveau de complexité. Un travail plus approfondi est nécessaire et sera présenté dans le programme de forage.

Les considérations suivantes pourront aussi être incluses:

- Plusieurs objectifs géologiques peuvent être présenté (générant différentes options de forage)

3.8. Puits de références et qualité des données

Les puits de références présentés ci-dessous ont été utilisés pour cette évaluation géologique:

- Puits d'exploration pétrolier situé à 4km au Sud Est (1960) - puits VD-4243534-DERT-3
- 6 puits d'exploration situés dans les Alpes et les Préalpes (Autriche et Suisse)
 - Puits AF-334235-GH (1992)
 - Puits 4526334-GH Autriche (1984)
 - Etc.

Un puits VS-23262493-DHS a été foré à plus de 3.000 m TVD GL en 2003, situé à 13 km au Nord-Ouest. Cependant l'accès au données de ce puits n'a pas été autorisé.

Qualité des données:

La qualité des données sismiques est bonne jusqu'à 2.000 m TVD. Cependant, au dessous de 3.000 m TVD, la qualité est considérés comme limité, et l'interprétation est jugée difficile. De ce

fait, pour les formations géologiques à la base du réservoir, leurs profondeurs et leur extension horizontales sont incertaines. Etc...

Il y a un control limité sur la stratigraphie exacte dans les Préalpes à l'emplacement de l'objectif géologique. Ceci est dû à l'absence de continuité sismique avec les puits de référence. De plus, les observations et les analyses de terrain ont montré une stratigraphie complexe changeant rapidement sur une échelle de 100 m. etc.

Les considérations suivantes pourront aussi être incluses:

- *Qualité des données des puits de référence*
- *Qualité des données des études de surface*
- *Qualité des données photos satellites*

...

4. Stratégie d'acquisition de données

4.1. Objectifs

La stratégie consiste à collecter autant de données que possibles durant le forage (LWD, logging while drilling) pour réduire le coût d'acquisition de ces données en évitant des opérations de "wireline".

Durant le forage de la section de 12 ¼" et de 8 ½", l'évaluation des données de LWD sera faite en temps réel pour décider de réaliser un test de production. Il n'est donc pas possible de présenter une profondeur-objectif pour la réalisation des tests de production.

Les critères pour cette décision seront présentés dans le programme de forage.

Dans le cas ou un test de production montrera un résultat positif, des opérations de diagrapie (sur câble) seront réalisées pour obtenir des données de haute résolution.

1) Durant le forage, les équipements de MWD (measurement while drilling) et LWD (logging while drilling) seront, au minimum:

- *GR (gamma ray) - DENS/NEUT (density/neutron) - RES (resistivity) - Borehole Image*
- *Pression et température: PWD & TWD (Pressure and temperature while drilling)*

Ces données sont nécessaires pour pouvoir identifier les formations durant le forage, et pour mesurer leur paramètres (porosité, fluides présents...)

Les équipements suivant pourront être potentiellement utilisés:

- *FPWD (Formation pressure while drilling)*

2) Dans les cas où les équipements de LWD et MWD montreront des indications positives:

- Un test de production du 12h sera réalisé

3) Dans le cas où le test de production montrera un résultat positif:

- Les diagraphies de haute résolution suivantes seront réalisées:
 - GR (gamma ray) - DENS/NEUT (density/neutron) - SONIC - RES (resistivity)
 - Magnetic resonance - Sonic scanner - Ultrasonic borehole image - multifinger caliper
 - Carottes latérales dans le réservoir
- Un test de production long sera réalisé.
 - Un test de production de 36h
 - Un arrêt et observation de 36h
 - Un test de production de 36h à différents débits
 - Un test d'injection de 36h

Etc...

4.2. Obligations

La prise de carotte dans le réservoir est une obligation associée au permis de recherche du Canton de Ittigen, dans le cas de puits d'exploration ayant atteint leurs objectifs. C'est pourquoi, des carottes latérales seront collectées dans le réservoir en cas de succès.

L'acquisition de diagraphie de base sur l'ensemble du puits, autant de possible (GR, DENS/NEUT, caliper) est une obligation associée au permis de recherche du Canton de Ittigen. Ainsi, ces données seront collectées en LWD (logging while drilling) à partir de la section de 17 ½". Les équipements permettant de collecter ces données sur les sections moins profondes n'ont pas été trouvés sur le marché.

4.3. Evaluation du réservoir

Les propriétés du réservoir seront évaluées de façon préliminaire (avant le test de production) grâce aux informations de:

- LWD et MWD - interprétation directe des paramètres du réservoir (porosité, perméabilité, fluide...)
- Surveillance des pertes de boue de forage (indication potentielle de conductivité du réservoir)
- Surpression du réservoir (indication potentielle de connectivité du réservoir)
- Paramètres de forage et stabilité du trou nu (indication potentielle du champ des contraintes et du potentiel de débits proche du puits)

Le test de production préliminaire de 12h permettra d'évaluer:

- *Les propriétés du réservoir (perméabilité / porosité)*
- *L'étendue du réservoir*
- *Le volume du réservoir*
- *Les limites du réservoir*
- *Le débit de production attendue*
- *Le support en pression*
- *...*

Les tests de production supplémentaires permettront de:

- *Évaluer en détails l'étendue et les limites du réservoir*
- *Évaluer la capacité de recharge du réservoir*
- *Évaluer en détails les débits de production de d'injection*
- *...*

Les options de stimulation du réservoir seront présentées plus en détails dans le programme de forage.

5. Evaluation économique

Un exercice économique a été réalisé pour le projet:

Paramètres	unité	P10	P50	P90
Etendue du réservoir	Km ²	11	22	46
Volume du réservoir	10 ⁶ m ³	110	440	1.610
Perméabilité du réservoir	md	9	14	23
Débit de production rate	m ³ /jour	5.500	8.200	13.1000
Limite d'injection (sismicité induite)	coefficient (0-1)	0,7	0,82	0,95
Température de l'eau en surface	degrés	98	124	131
etc...
Puissance de l'installation	MW	4,9	6,4	9,1

- Les valeurs estimées sont présentées avec une évaluation probabiliste (P10, P50, P90), pour capturer un niveau d'incertitude.
 - P10 signifie que 10% des cas sont sous cette valeur (ceci ne signifie pas que cette valeur a 10% de chance de se réaliser)
 - P50 signifie que 50% des cas sont sous cette valeur (ceci ne signifie pas que cette valeur a 50% de chance de se réaliser)
 - P90 signifie que 90% des cas sont sous cette valeur (ceci ne signifie pas que cette valeur a 90% de chance de se réaliser)

Bien que les incertitudes du sous-sol soient toujours forte, cet exercice vise à démontrer que le risque économique pris par le projet est acceptable, et que le projet d'exploitation géothermique est raisonnable.

Les considérations suivantes pourront aussi être incluses:

- L'utilisation d'un autre modèle de calcul d'incertitudes (autre que probabiliste de type Monte Carlo)