Le forage géothermique de Thônex (Canton de Genève) : aspects stratigraphiques, tectoniques, diagénétiques, géophysiques et hydrogéologiques

Autor(en): **Jenny, Jacques / Burri, Jean-Paul / Muralt, Reto**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **88 (1995)**

Heft 2

PDF erstellt am: **03.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-167679

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv. 88/2: 365–396 (1995)

0012-9402/95/020365-32 $1.50 + 0.20/0
Birkhäuser Verlag, Basel

Le forage géothermique de Thônex (Canton de Genève): Aspects stratigraphiques, tectoniques, diagénétiques, géophysiques et hydrogéologiques

JACQUES JENNY[1], JEAN-PAUL BURRI[1], RETO MURALT[2], ANDRÉ PUGIN[3], ROLAND SCHEGG[3], PIERRE UNGEMACH[4], FRANÇOIS-D. VUATAZ[2] & ROLAND WERNLI[3]

Key words: Geothermal well, Switzerland, mesozoic stratigraphy, seismic reflection, vitrinite reflectance, production test, hydrochemistry

RESUME

Le forage de prospection géothermique dévié de Thônex (Genève), d'une profondeur de 2530 m (longueur forée de 2690 m) a été réalisé par l'Office cantonal de l'énergie (OCEN) en 1993 avec l'aide financière de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Il a traversé la molasse tertiaire, les unités du Crétacé et les calcaires du Jurassique supérieur, pour s'arrêter dans les marno-calcaires de l'oxfordien. Le forage a rencontré de l'eau dans les calcaires récifaux du Jurassique supérieur, mais le débit était insuffisant pour justifier la réalisation d'un deuxième puits de réinjection de l'eau. Lors d'un test de production, le puits a donné un débit stabilisé de 11 m^3/h et l'eau des calcaires du Jurassique supérieur provenait de la profondeur −1900 m/sol, alors qu'une température de 70°C était indiquée par les diagraphies de production. Bien qu'aucun échantillon d'eau non-contaminée et donc représentatif du fluide de l'aquifère du Jurassique supérieur n'a pu être obtenu, les analyses chimiques laissent supposer que l'eau de la formation est peu chargée en matières dissoutes (1 à 2 g/l) et de type NaCl ou $NaHCO_3$. Le gradient géothermique est de 3.12°C/100 m et donc parfaitement normal. L'évolution verticale du pouvoir réflecteur de la vitrinite (PRV) montre une croissance normale, indiquant un paléogradient géothermique d'environ 3.0 à 3.5°C/100 m.

ABSTRACT

The present paper addresses the major results and findings of a geothermal exploration well, drilled directionally at a depth of 2530 m (2690 m drilled length) at Thônex (Geneva) by the Geneva Canton Department of Energy (OCEN) with the financial support of the Swiss Federal Department of Energy (OFEN). The drilling first intersected the Tertiary Molassic cover, then the Cretaceous formations followed by the target Upper Jurassic limestones and finally ended in marly limestones of Jurassic age. Ground water was hit in the Upper Jurassic reef limestones, but at rates below expectations as a result of poor reservoir performance and low well productivity. For this reason, the drilling and completion of a reinjection-well had to be cancelled. Well testing via air lift indicated a stabilized flowrate of 11 m^3/h, originating from Upper Jurassic limestones at a depth of about 1900 m and a fluid temperature of 70°C as evidenced by production logging. Although no uncontami-

[1] Géologie-Géophysique, 25, route des Acacias, CH–1227 Carouge

[2] Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, 11, rue Emile Argand, CH–2007 Neuchâtel

[3] Département de Géologie et Paléontologie de l'Université de Genève, 13, rue des Maraîchers, CH–1211 Genève

[4] Géoproduction Consultants, Aulnay-sous-Bois, France

nated water sample representative of the Upper Jurassic aquifer could be sampled, hydrochemical monitoring suggests a rather weakly mineralised formation fluid (1 to 2g/l TDS) of either the NaCl or $NaHCO_3$ type. The geothermal gradient, measured at 3.12°C/100 m, is close to normal values. Vitrinite reflectance measurements show a normal increase indicative of a paleogradient in the 3.0 to 3.5°C/100 m range.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Geothermiebohrung Thônex wurde 1993 mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) durch die Energiefachstelle des Kantons Genf realisiert. Die Bohrung durchteufte die tertiäre Molasse, Einheiten der Unterkreide und Kalke des Malms. Die Bohrarbeiten wurden in einer Tiefe von 2530 m (effektive Bohrlänge 2690 m) in den Mergelkalken des Oxfordien eingestellt. In den Riffkalken des Malms konnte in einer Tiefe von ca. 1900 m ein Wasserzufluss festgestellt werden. Die stabilisierte Zuflussrate von 11 m^3/h war aber zu schwach, um das Abteufen einer zweiten Bohrung zur Rückführung des abgekühlten Wassers in den Aquifer zu rechtfertigen. Mittels bohrloch-geophysikalischer Messungen wurde eine Wassertemperatur von 70°C ermittelt. Obwohl keine für den Aquifer repräsentative Wasserproben zur Verfügung standen, lassen die chemischen Analysen vermuten, dass es sich um ein NaCl- oder $NaHCO_3$-Wasser mit relativ schwacher Mineralisierung von ca. 1–2 g/l handelt. Der geothermische Gradient kann mit 3.12°C/100 m als normal eingestuft werden. Die thermische Modellierung anhand der Vitrinitreflexion ergab einen normalen paläogeothermischen Gradienten von 3.0–3.5°C/100 m.

1 Introduction

Concluant 10 ans d'études préliminaires, le forage géothermique de Thônex a débuté en avril 1993. C'est le crédit voté par le Conseil d'Etat de Genève en mai 1989 qui a permis cette réalisation avec la subvention et la garantie du risque de la Confédération dans le cadre de la recherche de nouvelles sources d'énergie.

Le forage géothermique de Thônex a été réalisé sur la parcelle n° 4538 appartenant à l'Etat de Genève, sur le territoire de la commune de Thônex.

Coordonnées:	X = 505.270	Longitude:	E6° 17' 01''
	Y = 117.450	Latitude:	N46° 12' 41''
		Altitude:	428.35 m/mer

Le projet géothermique de Genève prévoyait de réaliser un doublet, c'est-à-dire deux puit divergents, avec un angle de 25° depuis la cote –700 m/sol pour le premier forage destiné à la production de l'eau, le deuxième aurait servi à la réinjecter après le passage par un échangeur de chaleur. Toutes les profondeurs mentionnées dans ce travail correspondent à des **cotes par rapport au terrain naturel**. Le forage étant incliné, il faut distinguer entre les profondeurs (m/sol) et les longueurs forées (lf).

2 Contexte géologique

2.1 Etudes préliminaires

Sur le terrain, les études ont débuté en 1987 par une prospection géophysique. Sept lignes de sismique réflexion totalisant 38.67 km (fig. 1, 4, profil CGG 1987) avaient été réalisées (Negron 1987, Gorin 1989).

Cette étude sismique a, pour la première fois, permis de déterminer la profondeur des couches mésozoïques sous la molasse de la cuvette genevoise qui s'est révélée plus importante que prévue sur la frange sud-est de la cuvette, donc on pouvait s'attendre à une plus haute température. Quelques accidents tectoniques ont été positionnés grâce à cette

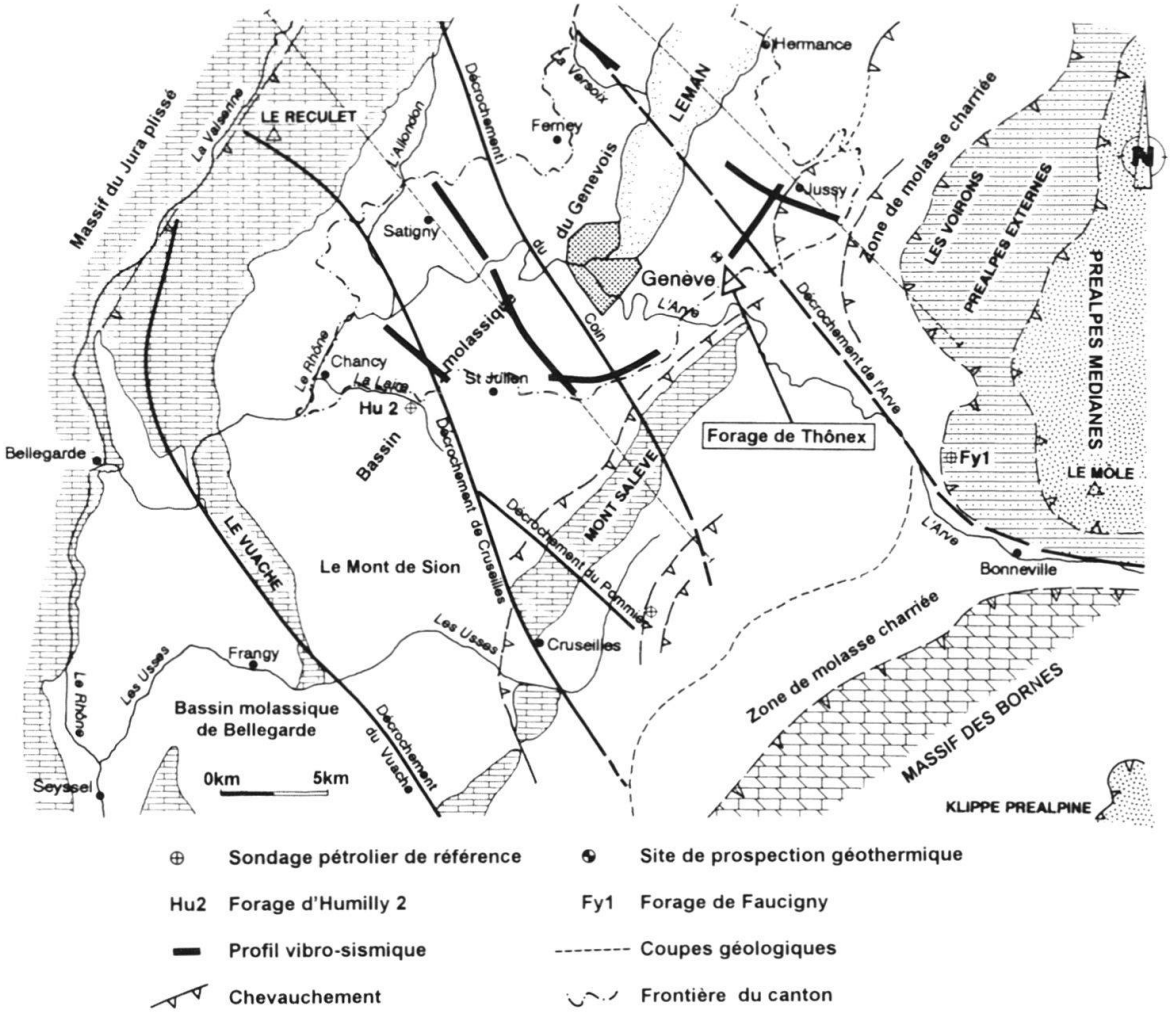


Fig. 1. Schéma structural et position du forage et des études sismiques

étude sismique. Des coupes géologiques de la cuvette genevoise ont été dessinées d'après les données de cette étude (fig. 3).

En décembre 1991 et janvier 1992, le bureau Géologie-Géophysique, en collaboration avec des chercheurs l'Université de Genève, a réalisé une étude par sismique réflexion à haute résolution sur le site du forage géothermique de Genève aux Communaux d'Ambilly, sur la commune de Thônex (fig. 4, profils GG 1992). Deux profils totalisant 1965 m furent tirés à l'explosif lors de cette campagne pour disposer d'informations précises sur les structures profondes dans le périmètre du forage que la vibrosismique n'avait pas pu traverser. Les réflecteurs des profils de la Compagnie générale de géophysique (CGG) ont parfaitement été retrouvés, avec des temps de trajets très semblables. La campagne de sismique haute résolution a apporté un élément très important pour décider de l'orientation du forage, en détectant trois zones de failles d'environ N23°E à proximité du site (fig. 2, 4). La profondeur des calcaires comme la présence des zones de failles et leur orientation ont parfaitement pu être vérifiées lors des travaux de forage. Le décalage

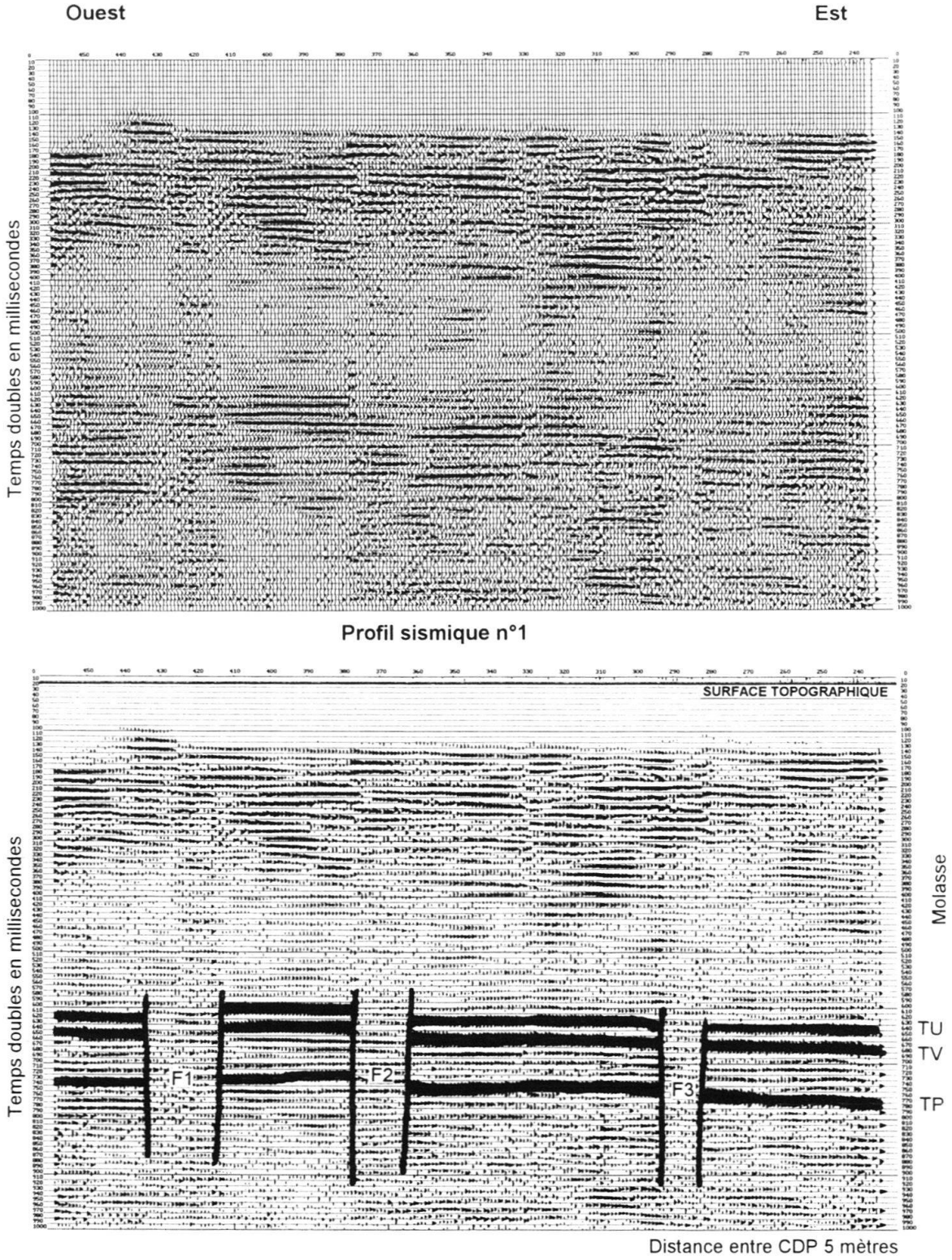


Fig. 2a. Profil sismique n° 1 interprété

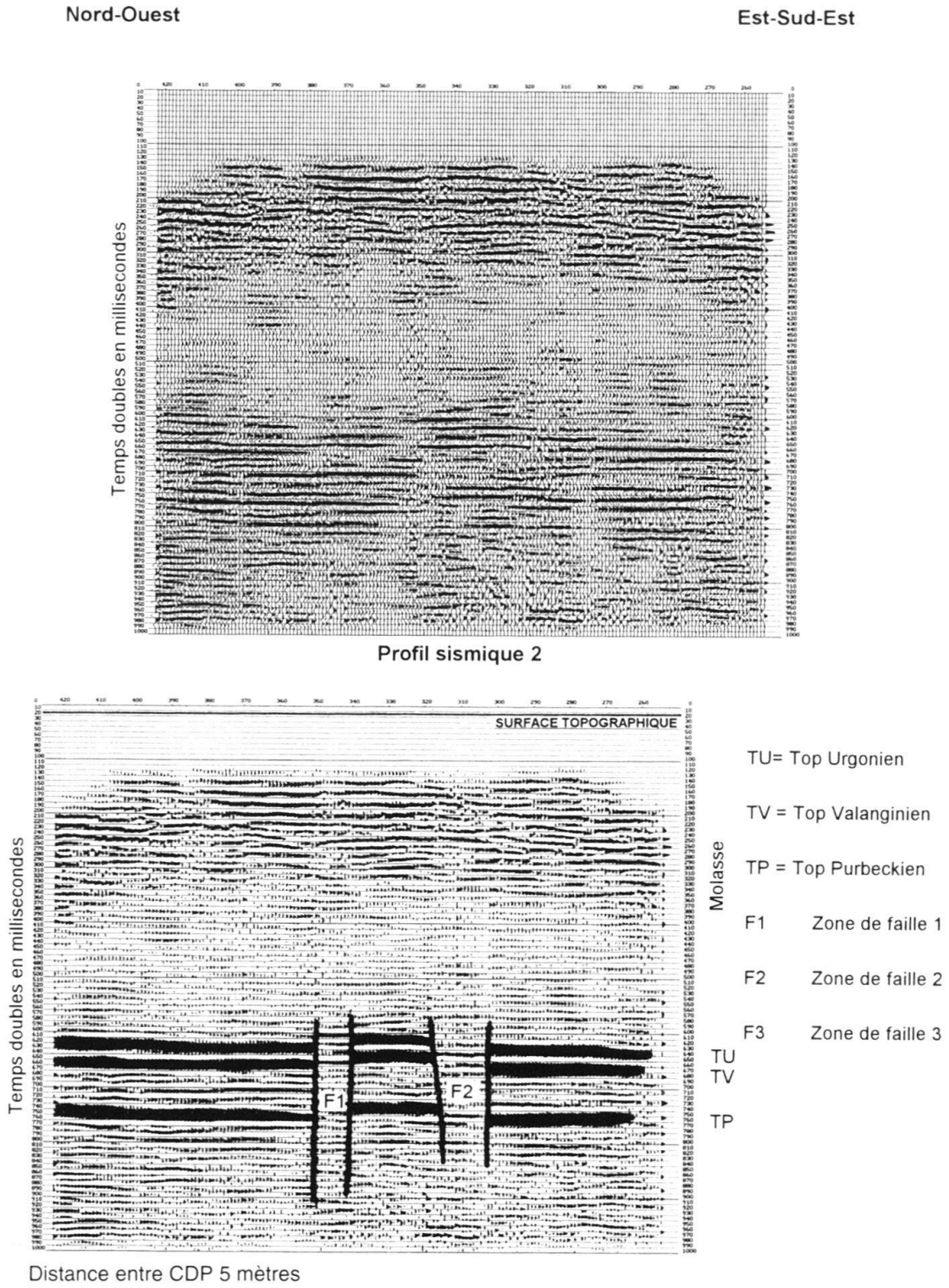
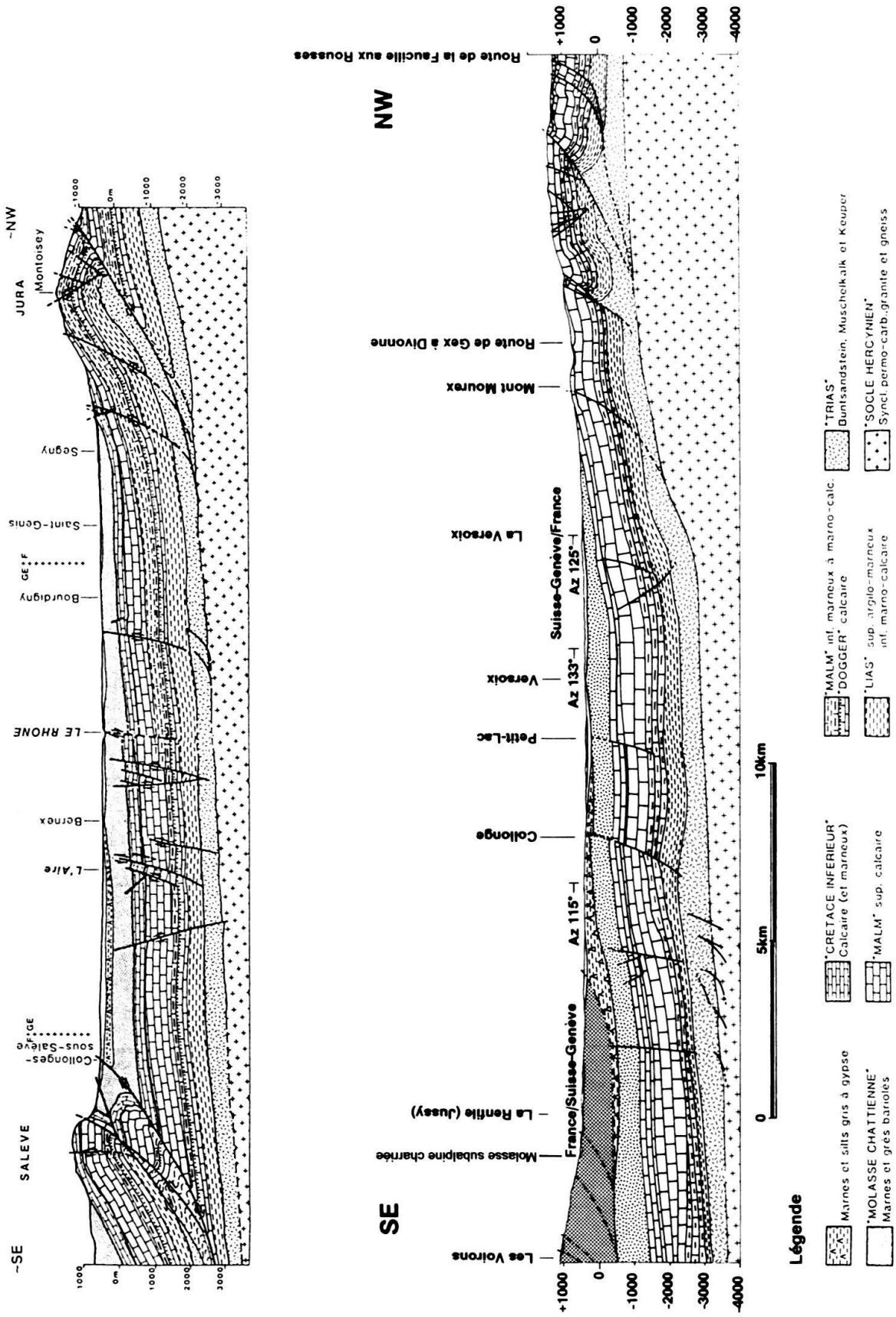


Fig. 2b. Profil sismique n° 2 interprété


~SE
SALEVE
~NW
JURA
Montoisey
Collonges-sous-Salève
GE F
L'Aire
Bernex
LE RHONE
Bourdigny
GE F
Saint-Genis
Segny
SE
NW
Route de la Faucille aux Rousses
Route de Gex à Divonne
Mont Mourex
La Versoix
Suisse-Genève/France
Az 125°
Az 133°
Versoix
Petit-Lac
Collonge
Az 115°
France/Suisse-Genève
La Renille (Jussy)
Molasse subalpine chartée
Les Voirons
+1000
0
-1000
-2000
-3000
-4000
0
5km
10km
Légende
Marnes et silts gris à gypse
"MOLASSE CHATTIENNE"
Marnes et grès barolés
"CRETACE INFERIEUR"
Calcaire (et marneux)
"MALM" sup. calcaire
"MALM" inf. marneux à marno-calc.
"DOGGER" calcaire
"LIAS" sup. argilo-marneux
inf. marno-calcaire
"TRIAS"
Buntsandstein, Muschelkalk et Keuper
"SOCLE HERCYNIEN"
Syncl. permo-carb.,granite et gneiss

des réflecteurs atteint 20 ms (temps doubles), correspondant à des rejets verticaux de 35–40 mètres.

Une étude de télédétection a permis de dégager les structures linéamentaires du bassin genevois (Arnaud 1989). Dans le cadre de ce projet, une étude microtectonique préliminaire a reconnu les directions de fracturation dans les affleurements mésozoïques du Salève.

2.2 Objectifs visés

Pour obtenir un débit d'eau intéressant, le forage géothermique devait recouper des fractures ou des zones de karst. En effet, selon la réinterprétation des données du forage d'Humilly pour le Kimméridgien par M. Lador (Géologie-Géophysique 1979), les niveaux aquifères sont des calcaires massifs dont la porosité matricielle est faible, de l'ordre de 8%, mais celle-ci peut être considérablement augmentée jusqu'à 25% à la faveur de failles ou de diaclases. La transmissivité des calcaires était alors estimée à 10^{-7} m^2/s. Des niveaux karstifiés étaient attendus au sommet des calcaires urgoniens, alors que les calcaires récifaux du Jurassique supérieur constituaient le deuxième objectif.

3 Forage

3.1 Généralités

L'appareil de forage utilisé à Genève était un NATIONAL 110M. Le forage a été exécuté en rotary selon le programme établi (fig. 5), le diamètre débutant en 27'' pour se réduire à 8''$^1/_2$ en fond de trou. Une technique de forage avec une turbine a servi à amorcer la déviation et à la corriger ultérieurement. Le contrôle de la direction et de l'inclinaison du puits s'est fait en partie au «single-shot», en partie avec un *Monitoring While Drilling* (MWD), appareil électronique placé à proximité du trépan et transmettant en continu les données sur l'inclinaison et la direction du forage.

Dans la molasse c'est une boue bentonitique qui a été utilisée alors que dans les terrains mésozoïques une boue biodégradable aux polymères a été employée, afin d'éviter de colmater les réservoirs potentiels.

3.2 Géométrie du forage

Un azimut de N35E avait été décidé pour le forage de reconnaissance Thônex 1. Cette direction présentait l'avantage de recouper la limite ouest de la zone de fracture F2 au niveau des calcaires urgoniens et la limite est dans les calcaires du Jurassique supérieur (fig. 4, 5). La direction N35E et l'inclinaison de 25° ont été prises entre –699 m et –1000 m/sol. Dès –1065 m/sol, à proximité de la faille F2, l'axe du forage a été dévié vers l'Est, en direction de la faille et l'orientation a été corrigée à la turbine après le tubage 13'' $^3/_8$ entre

---

Fig. 3. Coupes géologiques à travers la cuvette genevoise (d'après documents du Service cantonal de géologie et la sismique réflexion)

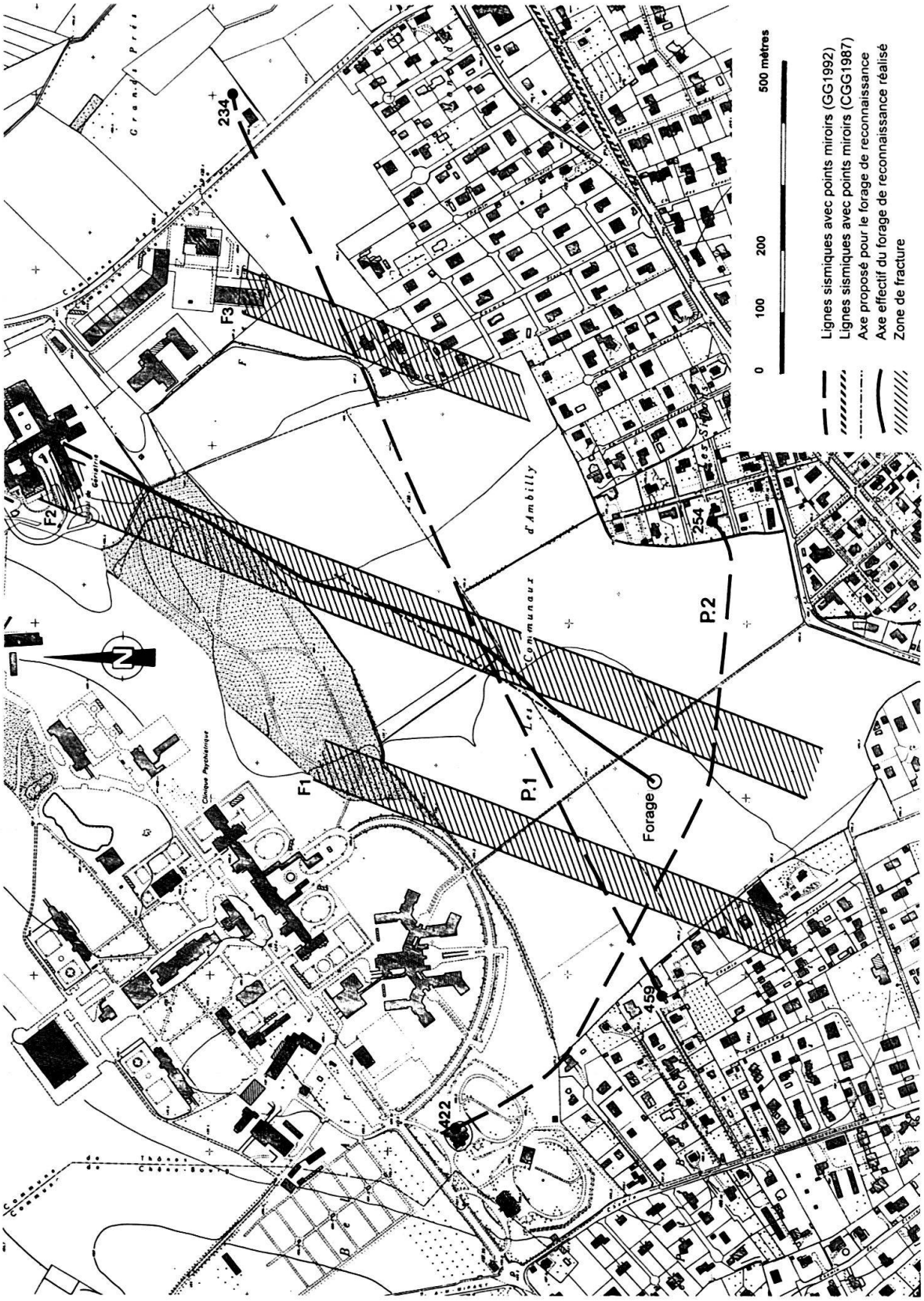


Fig. 4. Situation et trajectoire du forage, avec implantation des lignes sismiques

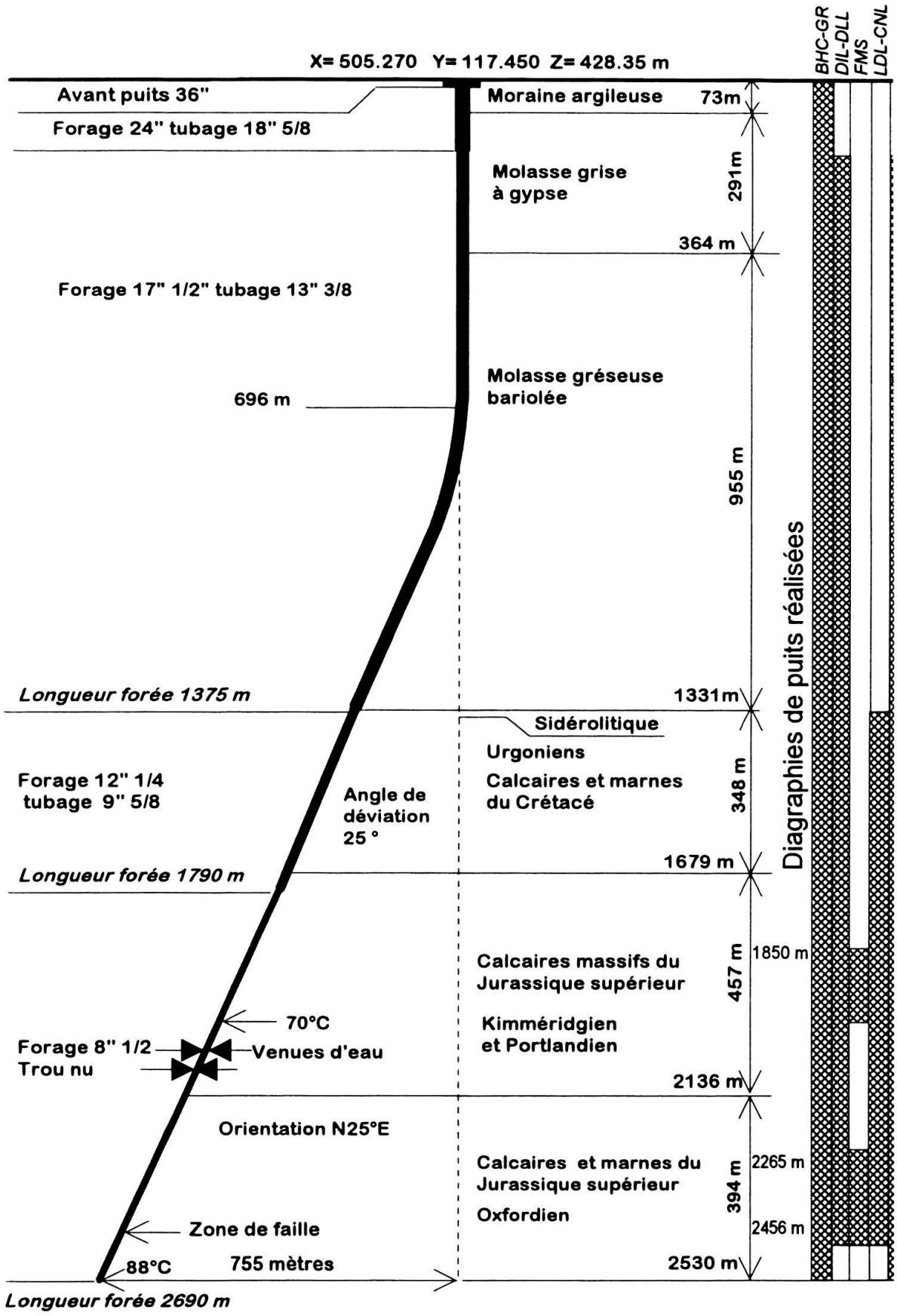


Fig. 5. Géométrie et caractéristiques du forage de Thônex

–1407 et –1534 m/sol. Deux corrections ont encore été nécessaires pour atteindre l'objectif fixé et recouper la bordure orientale de la faille dans les calcaires du Jurassique. Le forage s'est terminé à une profondeur de 2530 m/sol (2690 m lf).

4 **Stratigraphie** (R. Wernli & J. Jenny)

4.1 Généralités

La détermination des unités lithologiques est basée sur l'observation en continu des cuttings entiers à la loupe binoculaire sur le site du forage et sur une trentaine de lames minces de cuttings englobés dans une résine, ce qui représente une à deux prises par formation seulement. La lithostratigraphie présentée ici reste donc préliminaire et provisoire, et des études plus détaillées et systématiques sont en cours pour l'affiner (tab. 1).

Pour ce qui concerne le Quaternaire, la molasse tertiaire, le Crétacé inférieur et le Malm supérieur, les terrains traversés ont pu être assez facilement rattachés aux unités connues dans la région genevoise et en particulier celles du Salève (Charollais & Badoux 1990, Deville 1991). Pour les terrains plus anciens, antérieurs au Complexe récifal, les seules références restent le Jura et le Vuache, relativement éloignés dont les corrélations sont plus difficiles. Quant au forage d'Humilly 1 (fig. 1), dont l'étude est ancienne et qui n'a pas pu être réactualisée, il n'offre pas de référence précise à propos des microfaciès mais reste utile pour les corrélations de diagraphies.

Sur le site, une unité *mud logging on-line* enregistrait en continu les paramètres de forage, de la boue et géologiques, alors que ses opérateurs ont prélevé les cuttings[5] tous les 3 mètres. Ces cuttings sont la plus importante et la plus régulière source de renseignements. Toutefois la représentativité de ces échantillons est faussée par les phénomènes de lessivage des argiles par la boue de forage. Le temps de transit des échantillons du fond de trou vers la surface était calculé par l'ordinateur. De plus quelques gros blocs de molasse (1 à 2 kg) ont été retrouvés coincés sur les stabilisateurs lors de remontée des tiges de forage.

Les carottes sont une source majeure d'information, particulièrement pour la fracturation et la sédimentologie. Une première carotte a été prélevée au carottier double en diamètre 4'' dans les calcaires urgoniens entre 1377.7 et 1395 m en longueur forée, soit 1333.3 et 1349.4 m de profondeur. Microscopiquement il s'agit d'un calcaire compact, peu stratifié, blanc ou beige, grossièrement bioclastique à éléments roulés assez bien classés. La roche est peu recristallisée et peu fracturée. On note des bivalves à coquille épaisse dont quelques sections de rudistes *(Requienia?)*, des algues et de nombreux foraminifères qui sont signalés ci-après dans la description de la formation.

Un réseau de stylolites verticaux, horizontaux et courbes ainsi que quelques fractures fermées à joints d'argile verdâtre strient la carotte. On recoupe également de longues fentes subverticales et de 8 cm de large, remplies de Grès sidérolitiques blancs ou noirs pyriteux, témoins d'un paléokarst. L'examen en lumière ultra-violette des parties les plus sombres de ce remplissage, montre de nettes auréoles de matière organique.

---

[5] Les cuttings et les carottes du forage sont entreposés au Département de Géologie et Paléontologie de l'Université de Genève.

Une deuxième carotte de même diamètre provient des Tidalites de Vouglans (Portlandien) de 1718.8 et 1721.9 m/sol (1796 à 1799.4 m/lf). La carotte présente une première partie massive de calcaires clairs à stylolites, onchoïdes et laminites algaires. Puis les calcaires deviennent gris, fins et très brisés avec de nombreux miroirs de faille soulignés par de la calcite blanche.

4.2 Quaternaire

4.2.1 Formation: Moraine argileuse à blocs, Würm

Le Quaternaire est constitué par la moraine würmienne argileuse à blocs que le forage a recoupé sur 73 mètres. Aucune diagraphie n'a été effectuée dans cette formation qui a été tubée immédiatement. Les cuttings correspondent aux fragments de blocs contenus dans la moraine qui sont des calcaires variés et des débris de roches métamorphiques alpines.

4.3 Tertiaire

4.3.1 Formation: Molasse grise à gypse, Chattien supérieur

Cette formation est assez homogène. Il s'agit de marnes grises réagissant à l'acide chlorhydrique où les débris de gypse fibreux sont fréquents.

4.3.2 Formation: Molasse gréseuse bariolée, Chattien supérieur

Le constituant principal de cette unité est un grès fin (∅ moyen des éléments 0.1–0.2 mm) dont les éléments sont liés par un ciment calcaire. Les grains sont souvent arrondis, parfois anguleux. Le quartz prédomine, mais on trouve également des feldpaths et plus souvent des micas noirs. La couleur des éléments est variable. Vers la base de la formation, les fragments de charbon sont particulièrement abondants dans certains niveaux (cf. chap. 6). Quelques blocs de grès très fin verdâtre clair, micacé remontés par les stabilisateurs lors de manoeuvres montrent des miroirs de faille.

4.3.3 Formation: Grès sidérolitiques, Eocène

Le forage a traversé 12.1 mètres de grès très fins (∅ 0.1–0.2 mm), bien classés, mal cimentés, blancs puis rouges. Au cours du forage, le taux de pénétration de l'outil a augmenté de façon spectaculaire lorsqu'il a pénétré dans les grès tendres du Sidérolitique. Ces grès s'infiltrent dans les fissures du paléokarst ouvert dans les calcaires urgoniens sous-jacents et bien visible dans la carotte n° 1. Une lame-mince effectuée dans ce remplissage montre un grès pur, très fin à quartz anguleux bien classés dans une matrice microgranulaire noire pyriteuse. On trouve çà et là quelques lithoclastes détachés des épontes.

4.4 Mésozoïque

4.4.1 Formation: Calcaires urgoniens, Hauterivien sup. – Barrémien

Calcaire bioclastique grossier blanc ou beige peu ou pas recristallisé à éléments roulés. Des fissures d'origine karstique remplies de grès fins sidérolitiques ont été recoupées par la carotte N° 1. Microfaciès: Grainstone biodétritique à foraminifères (*Orbitolina*, miliolidés, *Dobrogellina*, *Baccinella*, *Trocholina*, *Cuneolina*, *Nautiloculina*, *Textularia*), algues dascycladacées, débris de mollusques et d'échinodermes. Présence d'amas de pyrite.

4.4.2 Formation: Pierre jaune de Neuchâtel, Hauterivien

Calcaire jaune roux, gréseux. Marnes gréseuses grises et calcaires roux. Calcaire gréseux roux à glauconie. Microfaciès: Grainstone échinodermique, mudstone bioclastique, calcaires oolitiques, zones de silicification. Foraminifères: *Nautiloculina, Lenticulina,* bryozoaires abondants. Marnes très gréseuses à quartz anguleux (20%, ∅ 0.1–0.2 mm). Grains de glauconie arrondis.

4.4.3 Formation: Marnes d'Hauterive, Hauterivien

Marnes très gréseuses grises ou noires à glauconie. Calcaire jaune oolithique ou grumeleux à glauconie. Calcaire roux oolithique à glauconie. Marnes calcaires très gréseuses grises à glauconie. Calcite de faille, pyrite. Microfaciès: Mudstone argileux. Calcaires échinodermiques spongolitiques à bryozoaires, et mollusques. *Lenticulina,* Textulariidae. Grains de glauconie et micrite argileuse grise. Passées gréseuses (∅ quartz 0.1 mm).

4.4.4 Formation: Calcaires roux, Valanginien

Calcaires gris fin ou grumeleux. Calcaires bruns. Marnes gréseuses grises à glauconie. Microfaciès: Packstone-wackstone échinodermique avec bryozoaires, assez grossier, quelques fois spongolitiques. Débris d'éponges. Grains de glauconie et épigénisation de débris d'échinodermes par la glauconie. Croûtes de pyrite et exodes de fer. *Textularia, Trocholina,* Placopsilinidae. Marnes très gréseuses (30% de quartz fin).

4.4.5 Formation: Membre du Guiers, Valanginien

Calcaires gréseux ou oolitiques gris. Microfaciès: Mudstones et grainstones bioclastiques, parfois oolitiques. Epigénisation de débris d'échinodermes par la glauconie. Foraminifères: *Trocholina, Lenticulina*, Placopsilinidae. Fragments d'échinodermes, bryozoaires, gastéropodes.

4.4.6 Formation: Chambotte, Berriasien sup./Valanginien inf.

Calcaires blancs et gris biodétritiques. Calcaires jaune clair biodétritiques. Microfaciès: Grainstone oolitique et pseudoolitique peu quartzeux (5–10%) à bioclastes roulés bien classés à foraminifères (*Textularia, Trocholina*), débris d'échinodermes, bryozoaires.

4.4.7 Formation: Vions, Berriasien

Calcaires gréseux gris brun ou roux biodétritiques, marnes gréseuses grises. Microfaciès: Mudstone bioclastique peu dolomitisé, gréseux (5–10%). Mudstone oolitique bioclastique à bryozoaires peu gréseux.

4.4.8 Formation: Pierre-Châtel, Berriasien moyen

Calcaires oolitiques jaunes beiges. Microfaciès: Mudstone à algues dascycladacées, veines de calcite, grands foraminifères complexes et grainstone biodétritique.

4.4.9 Formation: «Purbeckien», Berriasien inférieur

Marnes vertes et vertes claires, calcaire gris brun foncé, calcite de faille. Microfaciès: Mudstone à grands foraminifères complexes, pédogenisé, fentes de dessiccation, birds-eyes, algues characées, ostracodes, gastéropodes.

4.4.10 Formation: Tidalites de Vouglans, Portlandien

Calcaires oolithiques gris beige, contenant des microfossiles et des pellets. Calcaire gris brun fin parfois à cailloux noirs. Marnes verdâtres. Passée de calcaire biodétritiques blanc de –1773 à –1788 m. Calcaire rougeâtre à –1791 m. A la base, calcaires micritiques beiges avec quelques passées biodétritiques blanches. Microfaciès: Calcaires micritiques à algues et pellets, onchoïdes. Mudstone, tapis algaires, vacuoles remplies de sparite.

Grapestones et wackestones biodétritiques à algues. Mudstone à oogones de characées Algues: *Clypeina, Baccinella, Thaumatoporella, Petrascula, Cayeuxia, Campbelliella.* Foraminifères: *Trocholina, Nautiloculina, Anchispirocyclina lusitanica, Haurania, Valvulina lugeoni, Textularia,* milioles.

4.4.11 Formation de Landaize, Portlandien

Calcaires biodétritiques blancs à coraux et foraminifères. Microfaciès: Mudstone à fenestrae et débris d'organismes, structures spongiformes, biosparite à foraminifères. Fragments de coraux, foraminifères complexes, *Clypeina, Baccinella.*

4.4.12 Formation: Etiollets (= Complexe récifal), Kimméridgien sup. – Portlandien

Calcaires biodétritiques blancs crayeux, calcaires à coraux. Microfaciès: Calcaires bioclastiques grossiers (grainstone et wackestone) et biomicrite grise. Calcite sparitique de remplissage de fissures. Débris grossiers de gastéropodes et de lamellibranches, *Thaumatoporella, Baccinella,* dascycladacées, solénopores, *Troglotella,* milioles.

4.4.13 Formation: Calcaires de Tabalcon, Kimméridgien

Calcaire biodétritique fin blanc beige. A la base, intercalations de calcaires micritiques beiges foncés devenant de plus en plus fréquentes. Mircofaciès: Mudstone recristallisé finement biodétritique, parfois dolomitisé à la base de la formation. Petits débris d'échinodermes, de coraux et de spicules. *Tubiphytes,* nubéculaires. Calcite sparitique de remplissage de fissures abondante.

En dessous des Calcaires de Tabalcon la reconnaissance des formations connues ailleurs dans la région genevoise devient plus difficile. Ces terrains n'affleurent pas au Salève et les références les plus proches restent le Jura et le Vuache éloignés d'une vingtaine de kilomètres. Là, les séries de marnes et de calcaires fins monotones sont caractérisées surtout par leur stratonomie et également par les ammonites, deux critères qui nous manquent en sondage. Des études micropaléontologiques et de microfaciès plus détaillées sont en cours et permettront certainement une meilleure corrélation. Pour l'instant nous décrirons les séries les plus profondes du forage de manière informelle et provisoire.

4.4.14 Formation: «Calcaires micritiques beiges», Kimméridgien inf./Oxfordien sup.?

Calcaire micritique beige foncé avec des intercalations de calcaire biodétritique gris ou brunâtre. Microfaciès: Mudstone gris homogène et micrites à micropellets, traces de dolomitisation. Spicules de spongiaires triaxones. Dolomie sparitique de remplissage de fissures. Débris d'échinodermes, «filaments», Saccocomidae, *Spirillina,* milioles, *Tubiphytes?,* Globochaete.

4.4.15 Formation: «Alternances calcaires et marnes», Oxfordien sup.?

Il s'agit d'une épaisse série où alternent calcaires et marnes. Les calcaires sont très fins, de couleur gris-bruns, les marnes sont très foncées. Certains niveaux sont riches en matière organique. Microfaciès: Mudstone gris à brun à microbioclastes et micro-intraclastes, traces de dolomitisation, quelquefois spongolitique. *Calcisphaerula,* filaments, *Cadosina, Reophax, Globochaete,* petites milioles, *Spirillina, Dentalina, Saccocoma, Textularia,* spicules d'éponges.

4.4.16 Formation: «Calcaires micritiques bruns», Oxfordien sup.?

Calcaire micritique brun foncé. Microfaciès: Mudstone peu homogène bioclastique et wackestone brun argileux à petits foraminifères, pigment ferrugineux, micro-intraclastes, débris d'échinodermes, et spicules d'éponges, *Saccocoma,* Geodidae, *Spirillina, Textularia, Verneuilinoides, Paleomiliolina.*

4.4.17 Base du forage

Une faille recoupe la base des calcaires micritiques bruns. La base du forage traverse de nouveau la formation des Alternances de calcaires et marnes. Selon les corrélations faites avec le forage d'Humilly 2 au moyen du log gamma, le forage s'est arrêté à Thônex peu avant d'entrer dans les marnes de la base de l'Oxfordien (Marnes d'Effingen et de Geissberg?).

4.5 Comparaisons avec les coupes proches

4.5.1 Remarques générales

Les six colonnes stratigraphiques synthétiques illustrées sur la figure 6 schématisent les séries connues à l'affleurement dans le Jura, le Salève, les Bornes et dans deux forages pétroliers, Humilly 2 et Faucigny 1, et sont comparées au forage de Thônex. Elles sont basées sur les travaux de terrain les plus récents, publiés ou inédits, et sur la réinterprétation partielle des anciens forages. Parmi les inédits, il faut signaler un grand nombre de travaux de diplôme effectués au Département de Géologie et Paléontologie de l'Université de Genève concernant tous les secteurs abordés dans cette étude. Pour le Jura, ces données sont contrôlées par nos levés de la feuille géologiques à 1/50 000, Saint-Julien-en-Genevois, en voie d'achèvement. Cependant, les corrélations doivent être abordées avec précautions: L'analyse stratigraphique de Thônex n'est que préliminaire, celles d'Humilly 2 et Faucigny 1 sont anciennes et doivent être réactualisées. Pour une meilleure comparaison avec les coupes de terrain, les colonnes de forage ont été interprétées en profil d'érosion et pour des raisons de place, certaines ont été amputées de leur série tertiaire. L'horizon de référence arbitraire choisi est le toit de l'Urgonien.

4.5.2 Coupes du Salève

Le petit Salève n'est distant que de 3 km vers le sud et les coupes de la région du Coin sont à 8 km du forage de Thônex 1. La série synthétique est basée sur les travaux de Deville (dans Charollais & Badoux 1990). La corrélation avec Thônex est aisée car on y retrouve toutes les unités lithologiques du Crétacé et du Jurassique supérieur calcaire. Les faciès et les épaisseurs sont très comparables sauf en ce qui concerne les Calcaires récifaux (Formation des Etiollets) qui sont sensiblement plus épais au Salève qu'à Thônex. On notera que la base de la formation de Tabalcon est inconnue au Salève et que de ce fait, son épaisseur minimale est donnée sur le tableau 1.

4.5.3 Forage pétrolier d'Humilly 2

Le forage pétrolier d'Humilly 2, réalisé en 1968 par la SNPA, se trouve à 17.5 km de Thônex. Ce puits a traversé toute la série sédimentaire pour atteindre le sommet du Carbonifère à –3051 m. Les corrélations entre les puits de Thônex et Humilly 2 sont évidentes: Le log *gamma ray* des deux sections se superpose presque parfaitement. Il faut cependant noter que nous n'avons pas pu réviser les cuttings d'Humilly et que certaines attributions lithostratigraphiques sont approximatives. L'Urgonien est plus épais qu'à

Tab. 1 Corrélations d'épaisseur entre les coupes de la région genevoise. Les cotes données en mètres correspondent à la base des formations.

Unité lithologique	Forage de Thônex			Humilly 2	Salève	Jura
	Long. forée	Profondeur	Epaisseur	Epaisseur	Epaisseur	Epaisseur
Moraine argileuse à blocs	*73*	73	73	67		
Molasse grise à gypse	*364*	364	291	126		
Molasse grèseuse bariolée	*1362*	1318.6	954.6	237		
Grès sidérolitiques	*1375*	1330.7	12.1	7.5		10
Calcaires urgoniens	*1475*	1425.1	94.4	124	72	130
Pierre jaune de Neuchâtel	*1543*	1488	62.9	59	34	40
Marnes d'Hauterive	*1608*	1546.9	58.9	64	60	90
Calcaires roux	*1631*	1568.1	21.2	25	12	30
Membre du Guiers	*1647*	1582.7	14.6	13	10	20
Chambotte	*1665*	1599.2	16.5	14	16	20
Vions	*1683*	1615.6	16.4	34	30	40
Pierre-Châtel	*1726*	1654.8	39.2	25	42	38
«Purbeckien»	*1752*	1678.6	23.8	20	22	20
Tidalites de Vouglans	*1908*	1822	143.4	166	56	90
Landaize	*1955*	1865.6	43.6	?	40	40
Etiollets	*2057*	1958.6	93	56	126	80–180
Calcaires de Tabalcon	*2146*	2038.6	80	73	36	20
Calcaires micritiques beiges	*2255*	2136	97.4	151	44	
Alternances calcaires et marnes	*2537*	2389.6	253.6	275	175	
Calcaires micritiques bruns	*2571*	2420	30.4	54	110	
Total			2420	1590.5	885	668

Thônex. Quant au Complexe récifal, son épaisseur est difficile à estimer car il est mal délimité à la base et au sommet, les Formations de Tabalcon et Landaize n'étant pas clairement reconnues. Il est probable que la Formation de Landaize soit en partie inclue dans le tableau 1 à la base de Tidalites de Vouglans (Calcaires dolomitiques et oolitiques = Portlandien *auct.*).

4.5.4 Coupes du Jura

La colonne «Jura» est basée sur de nombreux levés cartographiques et stratigraphiques de diplômes et nos propres recherches, répartis dans la Haute-Chaîne entre la Faucille et le Vuache ainsi que dans la Valserine. C'est sur cette colonne que les attributions stratigraphiques sont les plus précises. Les âges et la nomenclature sont réactualisés en grande partie d'après la synthèse géologique du Sud-Est de la France (Debrand-Passard & Courbouleix 1984).

Dans toute cette aire, l'exploration détaillée du terrain nous montre bien les variations d'épaisseur et les changements latéraux de faciès. Par exemple, le Complexe récifal peut doubler d'épaisseur sur une distance kilométrique ou même disparaître pour passer latéralement aux «Calcaires en plaquettes» de lagons. La distribution horizontale de ces *patch reefs* paraît donc très discontinue et selon un schéma qui nous échappe encore.

Ceci doit nous rendre prudent lors des corrélations à plus longue distance, 10 à 20 km par exemple, ce qui est le cas de la figure 6.

4.5.5 Forage de Faucigny

A 16 km au Sud-Est de Thônex, le forage de Faucigny 1 datant de 1970 à atteint le socle permo-carbonifère à 4600 m de profondeur. La colonne présentée sur la figure 6 est redessinée en profil d'érosion et réinterprétée pour les attributions stratigraphiques. Cependant l'absence de définitions formelles pour les formations de cette région oblige à conserver une nomenclature bâtarde, lithologique et d'étage. On peut constater une surépaisseur de l'Urgonien et également de la barre calcaire du Kimmérigien–Portlandien. La reconnaissance de la formation de Tabalcon, finement bioclastique de talus distal d'avant-récif en milieu de mer ouverte, reste hyphothétique.

4.5.6 Bornes

La colonne «Bornes» est inspirée de Charollais (1963) pour le Crétacé, et de nombreux travaux de diplôme pour le Jurassique et le Tertiaire. Dans les grandes lignes, elle reprend la nomenclature de la carte géologique Annecy-Bonneville (Charollais & al. 1988). L'Urgonien est trois fois plus épais qu'à Thônex et le Néocomien, sous faciès bassin de type delphino-helvétique est également dilaté. La barre de calcaire du Tithonique, à faciès micritique et plancton de mer ouverte ne peut pas être corrélée sans autre aux formations coralligènes de plateforme interne protégée, des autres colonnes de la figure 6.

Si le forage de Brizon (BZN1 datant de 1987), près de Bonneville apporte quelques données nouvelles relatives aux faciès traversés, il n'est guère utilisable pour estimer les épaisseurs des formations car la série y est fortement tectonisée, écaillée et replissée (Charollais & Jamet 1990).

5 **Tectonique** (J. Jenny)

5.1 Observations de surface

Nous avons mesuré la direction et l'orientation de 147 fractures dans les calcaires crétacés du Petit Salève[6], sur onze affleurements près de Monnetier. Ce secteur a été choisi en raison d'un contexte tectonique relativement calme. La direction des accidents majeurs, mesurée sur carte a également été répertoriée. Les projections polaires des plans mesurés se regroupent en quatre groupes distincts sur la figure 7.

5.2 Observations dans le forage

Les carottes prélevées dans le forage présentent des fissures, mais leur orientation n'est pas possible. De la calcite de faille était également fréquemment mélangée aux roches dans les cuttings.

---

[6] Partiellement en compagnie du Prof. W. Wildi.

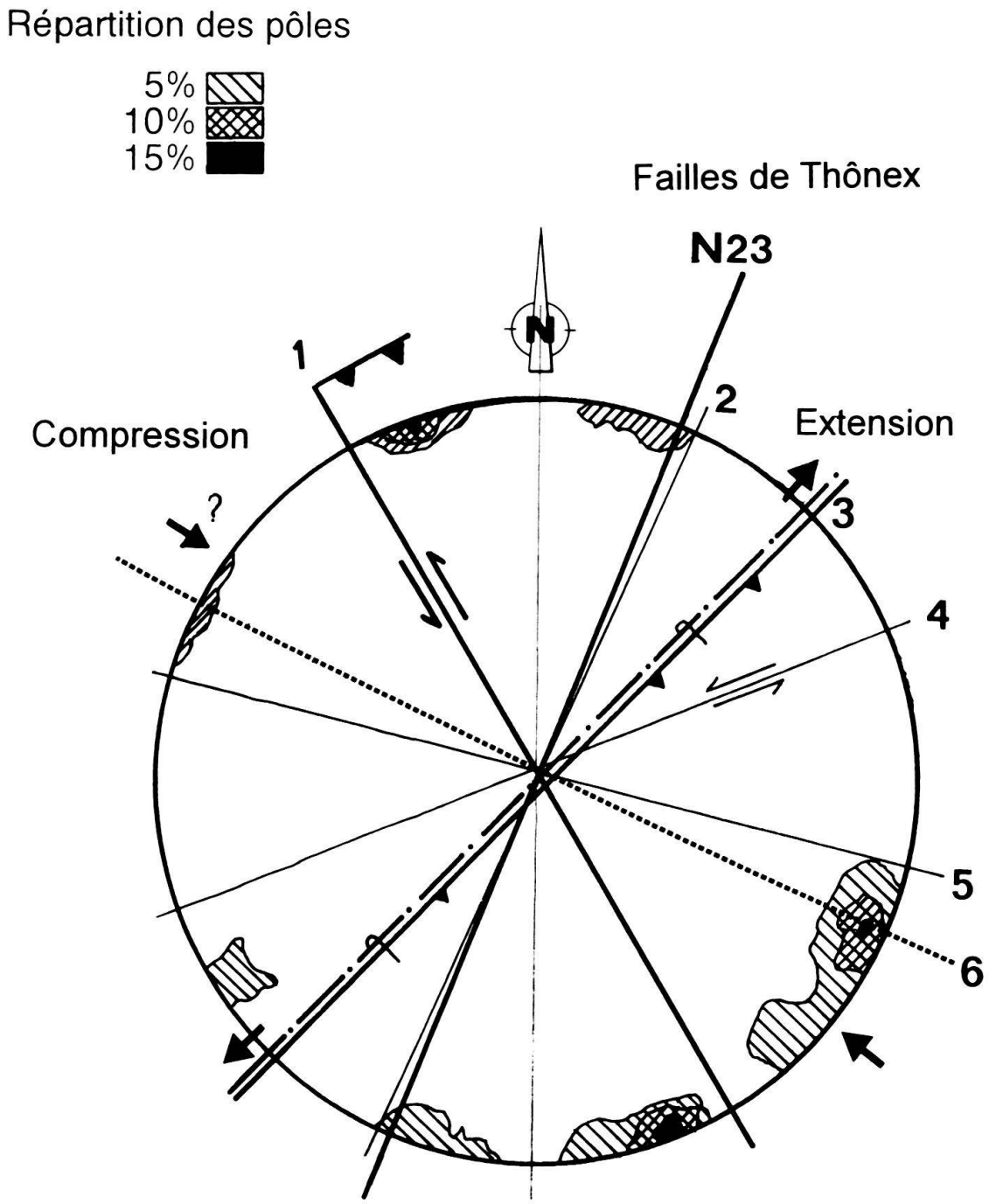


Fig. 7. Représentation par canevas de Schmidt de la répartition des fractures au Salève et à Thônex (FMS). 1. (N324°) Cette orientation correspond aux grands décrochements sénestres du Salève (Coins, Pomier, Cruseilles), mais elle se retrouve peu souvent dans nos mesures. La schistosité mesurée dans des marno-calcaires près du sommet du Petit Salève présente cette direction (Site 3). Cette direction est qualifiée d'hercynienne par certains auteurs. 2. (N23°) Cette orientation est très fréquemment représentée, dans la barre des Calcaires de Pierre Châtel à l'Est du Château de Monnetier (Site 8), dans les Calcaires de la Chambotte et dans les Calcaires urgoniens. C'est également la direction des failles de Thônex. 3. (N45°) Cette direction est celle de l'axe du plifaille du Salève: on la retrouve bien dans les calcaires de Pierre Châtel à l'Est du Château de Monnetier et dans la Formation de la Chambotte au-dessus de Monnetier. 4. (N67°) Cette orientation est assez fréquente, dans la carrière à l'Ouest de Monnetier en particulier où on a pu déterminer une direction de déplacement sénestre. 5. (N110°) Cette orientation est secondaire, mais elle est assez fréquente, dans la carrière à l'Ouest de Monnetier. 6. Fractures ouvertes de Thônex (N115°)

La diagraphie MicroScanner (FMS, fig. 5) est un système de diagraphie moderne basée sur le principe de la conductivité électrique des roches. Il s'agit de la mesure de résistivité des parois du puits avec une résolution verticale de 5 mm sur 4 patins possédant chacun 16 capteurs. On obtient une «image» du puits sur 360° que l'on peut visualiser et interpréter à l'aide d'outils informatiques puissants. Ce type de diagraphie permet de détecter et d'orienter les fractures recoupées et de connaître le pendage des couches.

Cet outil donne également des indications sur la lithologie: épaisseur des alternances marnes/calcaires, structure des calcaires. Les fractures cimentées sont caractérisées par une teinte claire signifiant la présence d'un matériau plus résistant. Connaissant les paramètres physiques de la boue de forage employée, le calcul de la dimension des fissures est possible. Les diagraphies au Micro Scanner concernent deux sections du forage, entre 1940–2100 m/lf (Formation de Landaize p.p., Complexe récifal, Calcaires de Tabalcon p.p.) et de 2400–2610 m/lf (Alternances calcaires et marnes p.p., Calcaires micritiques bruns, zone de faille). La diagraphie FMS indique:

- Les 70 pendages mesurés, provenant essentiellement des «Alternances calcaires et marnes», sont répartis de façon homogène. Les niveaux étudiés présentent un pendage de moins de 10°, légèrement incliné vers S20E.
- La répartition des fractures ouvertes est étonnamment homogène, les pôles se groupent N25°E en bordure du diagramme de Wulff. Les fissures ouvertes sont donc verticales et orientées N65°W.
- Les fractures cimentées ont une répartition moins homogène, mais plus de la moitié des plans de fractures plongent vers N15W à 45°.
- La largeur de quelques fractures ouvertes représentatives a été déterminée pour essayer de comprendre les problèmes de circulation des fluides. Les fractures mesurées ont une ouverture maximale de 0.3 mm, mais plus souvent elles sont d'environ 0.03 mm.
- La faille importante traversée vers 2580 m/lf de profondeur apparaît nettement sur le log FMS qui est très perturbé depuis –2575 m/lf jusqu'à la fin de l'enregistrement à –2610 m/lf.

5.3 Essai d'interprétation des directions de fractures

La figure 7 représente les directions tectoniques observées au Petit Salève avec le sens des mouvements, s'il a pu être déterminé (miroirs de faille) ainsi que les données FMS.

La direction de la contrainte principale est probablement horizontale, pour preuve les nombreuses stries horizontales sur les plans de faille que l'on observe. Le sens du mouvement décrochant est connu pour deux familles de failles, le groupe 1, sénestre (Accidents du Coin, Pomier, Cruseilles) et le groupe 4 qui a montré de nettes stries traduisant un jeu sénestre. Quelques stylolites font placer la contrainte principale N290° à N300°. L'accident N45° de l'axe du Salève est fortement chevauchant et implique une compression approximativement perpendiculaire. Tous ces faits nous font placer la contrainte principale à environ N50W (N310°). Cette direction est logique et parfaitement compatible avec les directions de contraintes figurées par Pavoni & Mayer-Rosa (1978) sur leur carte séismotectonique de Suisse et explique bien l'orientation N295° des fissures ouvertes de Thônex dans la direction distensive de ce système de contrainte.

6 **Diagénèse organique des séries tertiaires** (R. Schegg)

La matière organique (MO) contenue dans les sédiments se transforme au cours du temps en fonction de la température subie en profondeur. Le paramètre principal enregistrant ce processus de maturation est le pouvoir réflecteur de la vitrinite (PRV). Les méthodes de préparation et de mesure ont été décrites en détail par Schegg (1993).

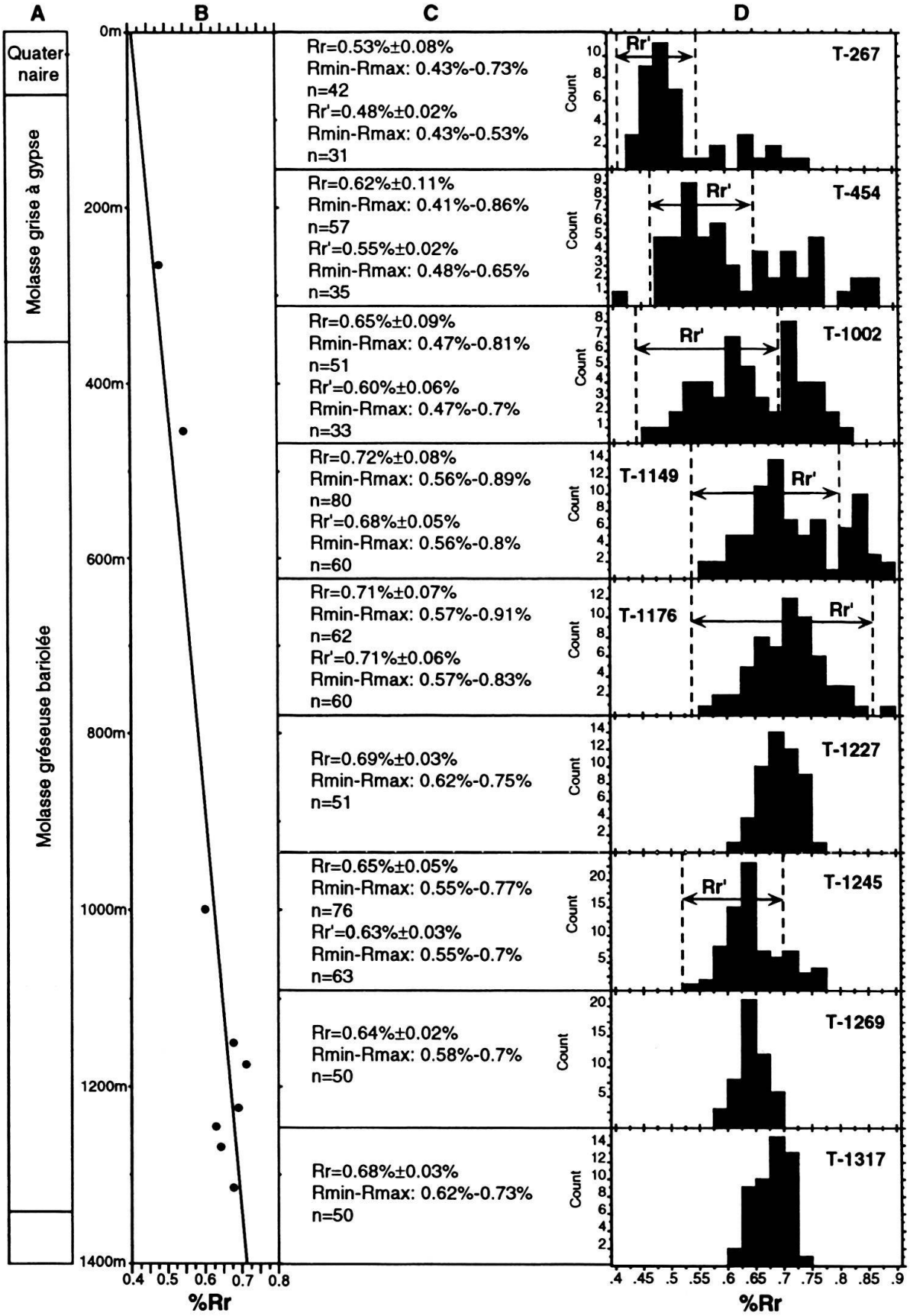
L'abondance de fragments de charbon dans les cuttings de la base de la Molasse gréseuse a permis d'étudier l'évolution de la diagenèse organique avec la profondeur. Un échantillon de la molasse marneuse à gypse et huit échantillons de la Molasse gréseuse bariolée ont été analysés. Un des problèmes rencontrés lors de la mesure du PRV est l'existence de différentes populations de vitrinite (fig. 8, colonne D). Ce phénomène est bien connu dans la littérature et plusieurs causes ont été évoquées pour l'expliquer: remaniement, variation des conditions paléo-environnementales ou variation de la composition chimique d'origine de la MO (voir p. ex. Buiskool Toxopeus 1983 et Fang & Jianyu 1992). Dans le cadre de cette étude, seule la population la plus basse d'un histogramme bimodal de PRV a été retenue pour l'interprétation (Rr' dans figure 8, colonne C et D).

Le PRV des échantillons du forage de Thônex varie entre 0.48% Rr et 0.71% Rr (fig. 8). La valeur de 0,48% Rr à 267 m de profondeur correspond avec les valeurs observées à la surface du Bassin genevois (0.47–0.48% Rr, Schegg 1993) et indique l'érosion d'une épaisse couche post-Oligocène (Molasse marine supérieure et Molasse d'eau douce supérieure?).

L'évolution verticale du PRV montre une croissance «normale» (0.15% Rr/km, Robert 1985) avec un gradient PRV de 0.18% Rr/km, respectivement 0.13 log% Rr/km (calculé avec la profondeur comme variable indépendante, voir Majorowicz et al. 1990). Ce gradient est plus élevé que ceux obtenus en Suisse orientale (Rybach & Bodmer 1980) et en Bavière (Teichmüller & Teichmüller 1986) où les gradients PRV sont généralement en dessous de 0,1% Rr/km, indiquant des paléogradients géothermiques bas d'environ 20 à 25°C/km. La différence pourrait être due à un problème statistique (petit nombre de mesure et faible profondeur) ou à un paléogradient géothermique normal, soit environ 30 à 35°C/km.

L'extrapolation du gradient PRV logarithmique jusqu'au niveau d'houillification à la surface («zéro coalification», 0,25% Rr) permet d'estimer l'épaisseur de la couverture érodée (Dow 1977). Pour le cas de Thônex, une érosion de 2000 m a été calculée (fig. 9). Pour les forages Essertines 1 et Courtion 1, Lemcke (1974) est arrivé à des valeurs comparables (2500 m et 1600 m respectivement).

Une autre approche pour estimer l'épaisseur de la couverture érodée consiste à calculer le profil géothermique au moment de l'enfouissement. Le modèle EASY%Ro de Sweeney & Burnham (1990) qui calcule la variation du PRV en fonction du temps d'après l'évolution température – temps d'un horizon stratigraphique, permet d'estimer les températures maximales subies par les échantillons analysés depuis leur dépôt. Pour le bassin molassique, la méthode a été décrite par Schegg (1992, 1993). Les paléotempératures ainsi calculées sont beaucoup plus élevées que les températures actuelles mesurées en forage (une différence de température d'environ 65°C). Le gradient paléo-géothermique calculé est de l'ordre de i) 34°C/km (figure 10, température comme variable indépendante) ou ii) 27°C/km (profondeur comme variable indépendante) et est proche


A
B
C
D
Quaternaire
Molasse grise à gypse
Molasse gréseuse bariolée
0m
200m
400m
600m
800m
1000m
1200m
1400m
0.4 0.5 0.6 0.7 0.8
%Rr
Rr=0.53%±0.08%
Rmin-Rmax: 0.43%-0.73%
n=42
Rr'=0.48%±0.02%
Rmin-Rmax: 0.43%-0.53%
n=31
T-267
Rr=0.62%±0.11%
Rmin-Rmax: 0.41%-0.86%
n=57
Rr'=0.55%±0.02%
Rmin-Rmax: 0.48%-0.65%
n=35
T-454
Rr=0.65%±0.09%
Rmin-Rmax: 0.47%-0.81%
n=51
Rr'=0.60%±0.06%
Rmin-Rmax: 0.47%-0.7%
n=33
T-1002
Rr=0.72%±0.08%
Rmin-Rmax: 0.56%-0.89%
n=80
Rr'=0.68%±0.05%
Rmin-Rmax: 0.56%-0.8%
n=60
T-1149
Rr=0.71%±0.07%
Rmin-Rmax: 0.57%-0.91%
n=62
Rr'=0.71%±0.06%
Rmin-Rmax: 0.57%-0.83%
n=60
T-1176
Rr=0.69%±0.03%
Rmin-Rmax: 0.62%-0.75%
n=51
T-1227
Rr=0.65%±0.05%
Rmin-Rmax: 0.55%-0.77%
n=76
Rr'=0.63%±0.03%
Rmin-Rmax: 0.55%-0.7%
n=63
T-1245
Rr=0.64%±0.02%
Rmin-Rmax: 0.58%-0.7%
n=50
T-1269
Rr=0.68%±0.03%
Rmin-Rmax: 0.62%-0.73%
n=50
T-1317
Rr'
Count
.4 .45 .5 .55 .6 .65 .7 .75 .8 .85 .9
%Rr

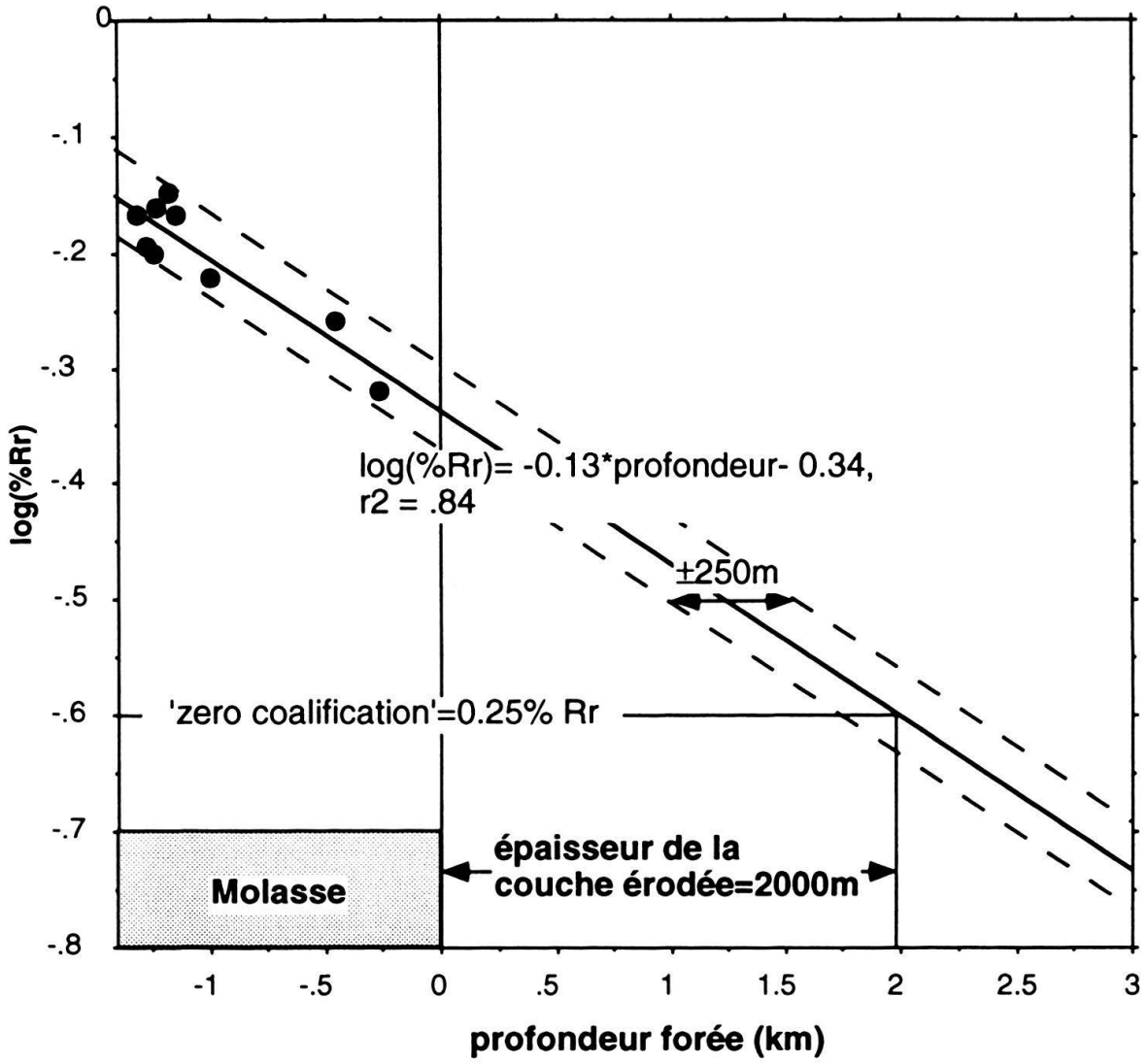


Fig. 9. Estimation de l'épaisseur de la couverture érodée par extrapolation du gradient PRV logarithmique au niveau d'houillification à la surface (<zero coalification> ≈ 0.25%Rr) d'après Dow (1977).

de la valeur actuelle de 31.2°C/km. Une couverture sédimentaire érodée de i) 1750 m (fig. 10) ou ii) 2500 m respectivement peut être calculée par extrapolation du profil paléogéothermique à une paléotempérature annuelle de surface (15°C pendant le Miocène moyen, Hochuli 1978).

Fig. 8. Progression du pouvoir réflecteur de la vitrinite (PRV) en fonction de la longeur forée et analyse statistique. A: formation, B: évolution du PRV avec la profondeur, C: analyse statistique des mesures du PRV (Rr = valeur moyenne avec écart-type, Rmin-Rmax = valeur minimale et maximale d'une analyse, n = nombre de mesures, Rr' = valeur moyenne de la population basse), D: histogramme de mesures (le numéro de l'échantillon correspond à la profondeur).

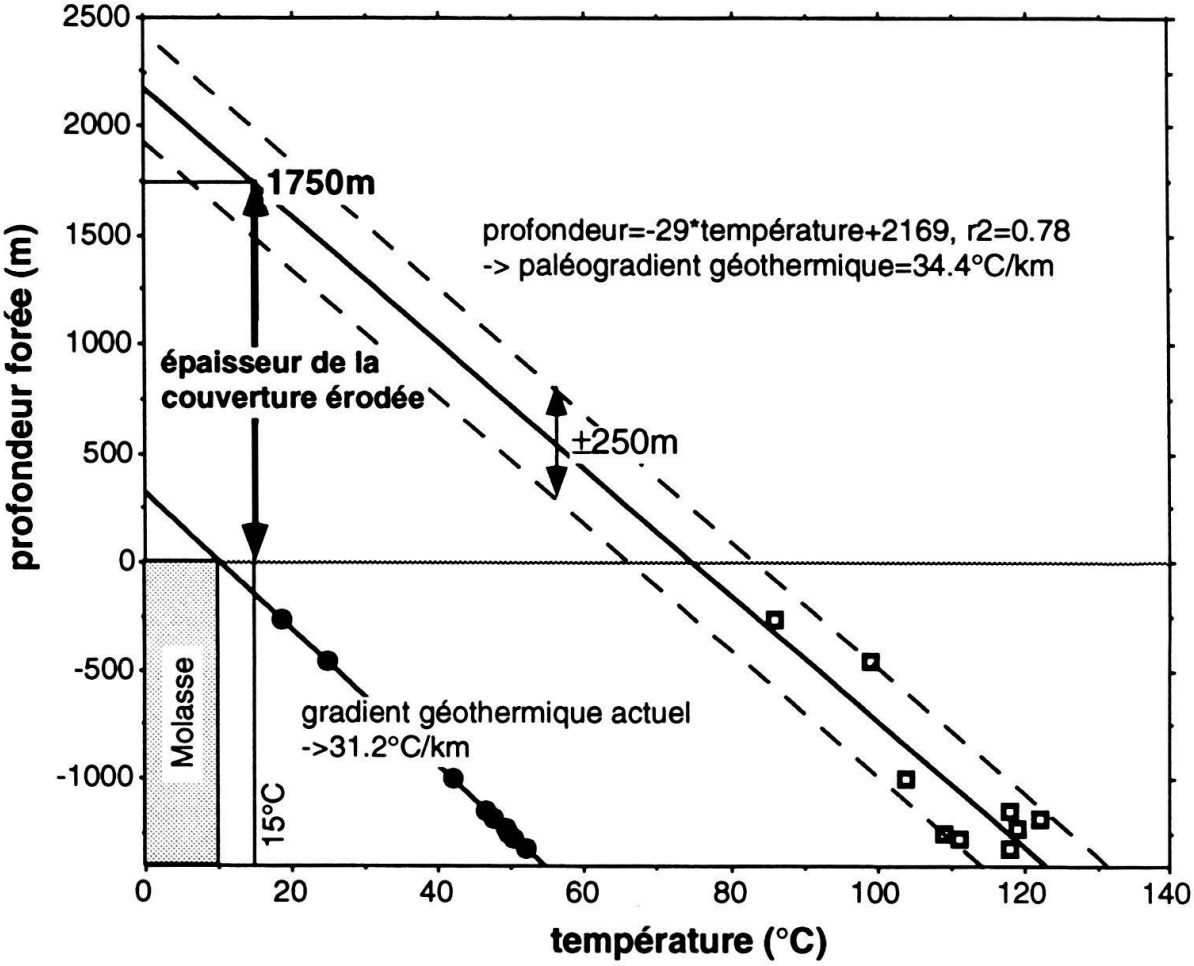


Fig. 10. Comparaison du profil géothermique actuel avec le profil géothermique au moment de l'enfouissement maximal (calculé avec une méthode décrite par Schegg 1992, 1993). Estimation de l'épaisseur de la couverture érodée par extrapolation du profil paléo-géothermique à une paléo-température de surface.

7 Essais de production (P. Ungemach)

Le Crétacé n'a pas démontré, même après une stimulation acide, d'indice de productivité digne d'intérêt: après un court test d'injectivité post-acidification, le trou a été tubé et cimenté et le forage a repris en 8''$^1/_2$.

L'intervalle supérieur du Jurassique supérieur compris entre 1950 et 2150 m lf présentait trois niveaux ponctuels de porosités d'outils (densité, neutron et sonique) comprises entre 6 et 9%, associées de toute évidence à des indices de fracturation ou microfissuration. Géologiquement, il s'agit du Complexe récifal (= Formation des Etiollets). Une perte instantanée de circulation de 9 m^3/h a été constatée en cours de forage à la cote 2590 m lf, soit à 100 m très précisément au-dessus de la cote de fond de puits.

Après nettoyage du découvert par injection de 40 m^3 de HCl 15%, le forage a été mis en production air-lift pendant une durée totale de 19 h dont 17 h effectives de pompage. Une diagraphie de débitmétrie/thermométrie a été réalisée, ensuite le puit a été fermé et

la remontée de pression à la cote 2000 (profondeur 1907) m/sol enregistrée pendant 13 h. Le volume soutiré (340 m^3) avec un débit moyen de 18 m^3/h a permis de renouveler de plus de deux fois la capacité de remplissage du puits.

L'identification par la diagraphie de débitmétrie, et surtout de thermométrie de venues convectives localisées dues à des fissures, au nombre de trois totalisant une épaisseur cumulée voisine de 30 m, entre les cotes 2040 et 2120 m lf, laissait subsister un espoir d'amélioration de la productivité de l'ouvrage par acidification.

Un programme d'acidifications étagées par injection d'acide entre obturateurs (packers) gonflables a été réalisé en trois étapes (entre 2040 et 2130 m lf), et a été parachevé par une quatrième acidification, sous packer de la base du puits pour réactiver éventuellement la zone de perte instantanée de circulation reconnue en fin de forage.

Les observations recueillies lors de ces stimulations ont permis de confirmer la thèse d'une circulation par un jeu de fissures sub-verticales. En effet, il n'a pas été possible de maintenir simultanément une pression et un débit d'injection élevés en phase d'injection d'acide et de chasse, condition d'une stimulation permettant de solliciter des zones distantes du puits, présumées plus performantes. L'amélioration sensible de la productivité de l'ouvrage par une stimulation massive, de type hydro ou *acid frac,* envisagée le cas échéant comme recours ultime devenait de ce fait improbable. Enfin, l'acidification de la base du découvert n'a pas révélé d'injectivité particulièrement élevée de la zone de perte instantanée inférieure.

La durée de l'essai a atteint 55 h 30, dont 51 h de production air-lift proprement dite. L'essai s'est assorti d'une diagraphie de débitmétrie/thermométrie, du prélèvement de deux échantillons de fond à la cote –2000 m lf, et de l'enregistrement de la remontée de pression consécutive à l'arrêt de la production. Enfin, à l'issue de la remontée de pression, un profil statique de pression/température de la totalité du puits (découvert et fractions tubées) a pu être établi.

La production, après un débit initial de 35 m^3/h, s'est rapidement établie à 20 m^3/h pour chuter ensuite progressivement à 11 m^3/h, valeur apparemment stabilisée pendant plus de 6 h au terme de l'essai. L'indice de productivité est de 0.42 $m^3/h/bar$. Le volume total produit est de 794.5 m^3. Une dépression de 33.9 bars a été observée après 55 h de production. L'observation de la remontée du niveau piézomètrique durant les semaines qui ont suivi l'essai, a permis d'interpréter la fin de la remontée des pressions selon la méthode pratiquée usuellement en hydrogéologie, connue sous le nom d'approximation semi-logarithmique de Jacob (équivalente en fait, à celle de Horner en test de puits pétroliers). Les mesures se sont poursuivies jusqu'à la récupération de l'artésianisme du puits. Celui-ci demeure très faible (< 1 m^3/h). La transmissivité est estimée entre 10^{-5} à 10^{-6} m^2/s, ce qui est faible. Elle permet également d'individualiser trois pentes différentes correspondant à trois transmissivités ou plus vraisemblablement à des réflexions sur des limites de compartiments faillés (fig.11).

Au cours du forage, la température en fond de trou a été mesurée lors des diagraphies au moyen des thermomètres à maximum associés aux outils. Ces mesures, bien que faussées par la circulation de la boue, permettent d'extrapoler une température approximative de la roche en fond de trou. La température a été relevée en continu lors des diagraphies de production où l'on décèle une température de 70°C à la cote verticale 1907 m/sol. En fond de trou, à une profondeur de 2530 m, la température atteint 80°C.

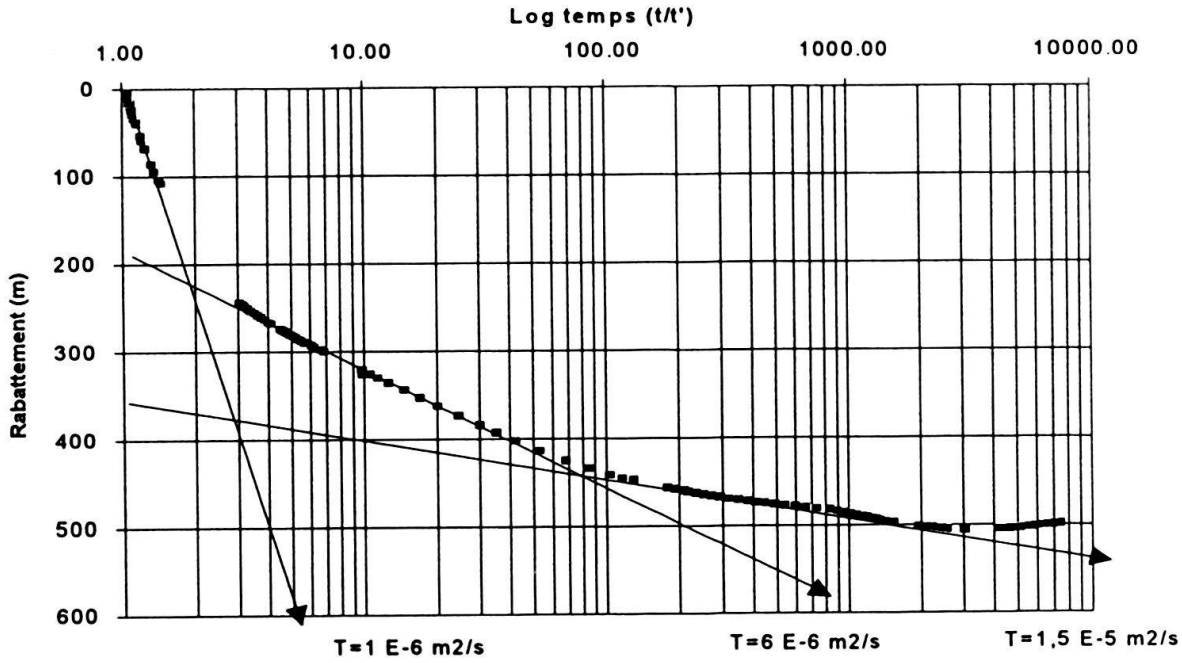


Fig. 11. Evolution du rabattement en fonction du temps observé en période de remontée du niveau de l'eau après l'essai de production en air-lift. T = transmissivité (en m^2/s).

8 Géochimie du fluide profond (R. Muralt & F. D. Vuataz)

8.1 Introduction

En raison de l'absence de venues d'eau, aucun échantillon de fluide n'a été prélevé dans le premier aquifère potentiel du Crétacé inférieur, ce dernier n'ayant pas été testé. Les grandes quantités d'acide et d'eau du réseau injectées dans l'aquifère du Malm, en combinaison avec la très modeste productivité de cet aquifère, la courte durée de l'essai de production et la méthode à l'air-lift sont responsables de la forte perturbation du chimisme des eaux observée jusqu'à la fin de l'essai. Par conséquent, aucun échantillon d'eau du forage ne peut être considéré comme représentatif de la formation testée, et les tentatives d'interprétation ne sont qu'approximatives et soumises à une grande incertitude. Durant l'essai de production, 14 échantillons ont été prélevés en tête de puits pour analyse, ainsi que deux échantillons de fond à la profondeur verticale de 1907 m.

8.2 Résultats

Pendant tout l'essai de production, la conductivité ainsi que la concentration de certaines espèces majeures (Ca, Mg, Sr, Cl, HCO_3) ne se sont jamais stabilisées et ont baissé régulièrement (fig. 12, 13). Cependant, après 43 heures de production par air-lift, on remarquait une assez forte augmentation de la conductivité et des espèces mentionnées, suivie d'une nouvelle baisse progressive. La concentration d'autres éléments et espèces aqueuses

Tab. 2 Composition chimique et isotopique de l'eau produite à la fin de l'essai de production. Il s'agit néanmoins d'une eau encore fortement influencée par les effets de l'acidification massive réalisée avant l'essai.

No. échantillon	GM 13	Température (°C)	39.1
Date prélèvement	1-10-93	Conductivité (µS/cm)	6260
Heure prélèvement	04.45	pH	7.27
Vol. produit (m^3)	786	Débit moyen (m^3/h)	14.4
Na (mg/l)	283	Cl (mg/l)	3325
K (mg/l)	9.25	HCO_3 (mg/l)	115
NH_4 (mg/l)	1.6	F (mg/l)	3.6
Li (mg/l)	0,6	I (mg/l)	2.4
Ca (mg/l)	1536	Br (mg/l)	1.5
Mg (mg/l)	116	NO_3 (mg/l)	1.1
Sr (mg/l)	15.3	SO_4 (mg/l)	61
Mn (mg/l)	0,32		
Fe (mg/l)	0,03	SiO_2 (mg/l)	21.7
Al (mg/l)	0,04	B (mg/l)	1.5
Cations (méq/l)	99.25	Anions (méq/l)	97.19
Balance ionique (%)	1.05	TSD (mg/l)	5495
δ^2H (‰)	-81.9		
$\delta^{18}O$ (‰)	-10.78	Tritium (UT)	3.5 ± 1.2

tels que Na, SiO_2, SO_4, F, Br, I et B a par contre augmenté pendant l'essai, alors que Li, K, NO_3 et les isotopes de l'eau ^{18}O et ^2H sont restés plus ou moins stables. Le dernier échantillon pris en tête de puits au cours de l'essai de production a fait l'objet d'une analyse relativement complète (tab. 2).

8.3 Interprétation

8.3.1 Processus de mélange et origine de l'eau

La baisse continue de la conductivité et des espèces majeures comme Ca, Mg, Sr, Cl, HCO_3 pendant tout l'essai de production prouve qu'on est toujours en présence des effets de l'acidification et qu'aucune stabilisation du chimisme n'a été atteinte. A la fin de l'essai, l'essentiel de la composition chimique est constitué des ions Ca et Cl, ce qui représente un type chimique très improbable dans cet environnement géologique. On peut en conclure qu'une partie importante de la teneur de ces deux éléments est induite par l'acidification à l'acide chlorhydrique qui a dissous le calcaire. Les espèces chimiques qui par contre, augmentent pendant l'essai (Na, SiO_2, SO_4, F, Br, I) sont intrinsèques à l'eau de l'aquifère du Kimméridgien. Au début, leur concentration était plus faible en raison de la dilution introduite par l'eau et l'acide injecté. Au cours de l'essai, leur teneur tend à retrouver celle de l'eau originale de la formation.

A priori, l'eau de la formation peut être considérée sans grand risque comme relativement ancienne et par conséquent dépourvue de tritium ($t^1/_2$ = 12.3 a). Donc tout le tri-

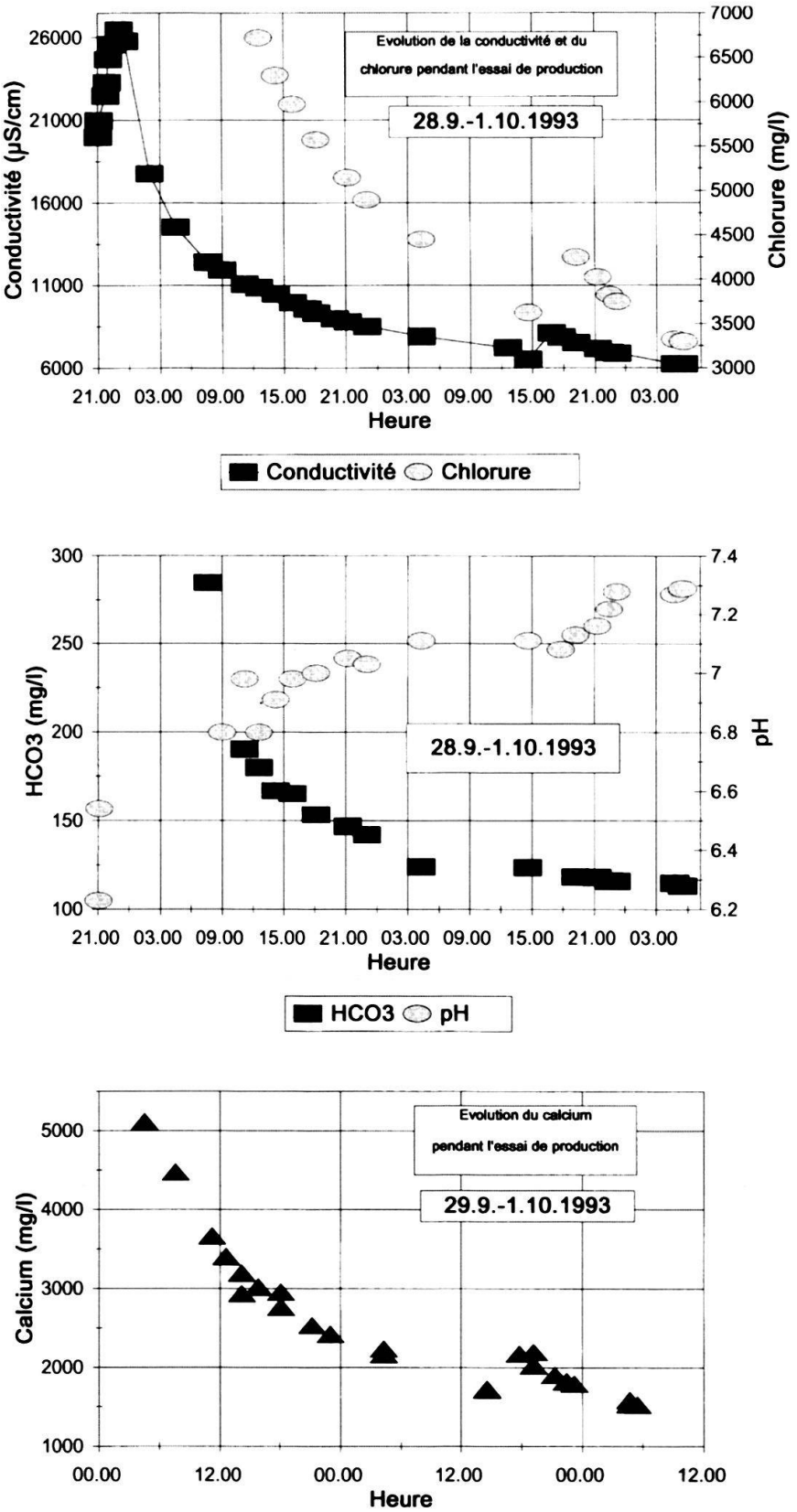


Fig. 12. Evolution de quelques paramètres physiques et chimiques principaux au cours de l'essai de production par air-lift.

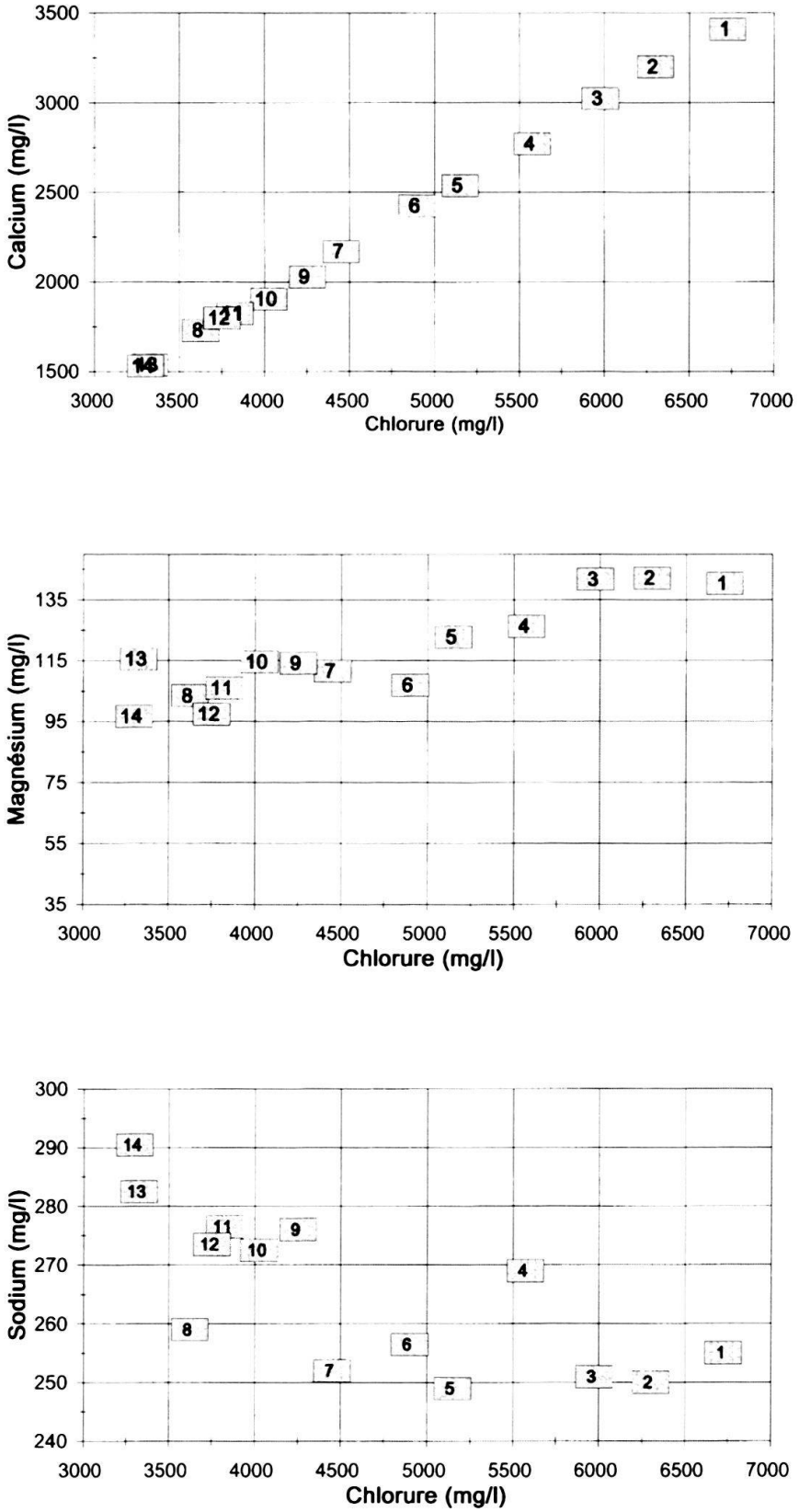


Fig. 13. Relation entre les trois cations majeurs et la concentration en chlorure au cours de l'essai de production par air-lift. Les numéros correspondent à la séquence d'échantillonnage.

tium analysé dans l'eau du Kimméridgien proviendrait du fluide injecté dans la formation pendant les acidifications de la partie découverte du puits. L'eau du réseau utilisée sur le chantier contenant 25 UT, on obtient une dilution d'environ 14% pour le dernier échantillon prélevé (GM 13).

Les analyses des isotopes stables de l'eau montrent des résultats conformes à ceux recueillis dans la littérature régionale (tab. 2). Nissile (1989) a obtenu des valeurs d'oxygène–18 entre –9.83 et –10.75‰ pour des sources karstiques, subthermales et thermales au sud du Salève (sources La Caille, Douai, Bromines et Bourbonge), que l'on peut comparer à la valeur de –10.78‰ à la fin de l'essai de production de Thônex. La valeur d'oxygène–18 de l'eau du réseau utilisée pendant les injections atteignant –11.97‰, on peut calculer sur la base des 14% de mélange, une valeur de –10.6‰ pour l'eau de la formation. En admettant que lors de l'infiltration de l'eau en profondeur le climat était similaire à celui d'aujourd'hui, et en utilisant les divers gradients altitude/^{18}O établis dans la littérature pour le Jura (Blavoux et al. 1979; Vuataz 1982; Kullin & Schmassmann 1991), on obtient une altitude moyenne du bassin d'alimentation de l'aquifère du Kimméridgien comprise entre 780 et 1200 m. Compte tenu de l'incertitude liée à la représentativité des échantillons eux-mêmes, toutes ces valeurs semblent à première vue plausibles.

8.3.2 Evaluation du chimisme de l'eau représentatif de l'aquifère du Kimméridgien

Les effets de l'acidification et le dégazage introduit par l'air-lift rendent l'estimation du chimisme de l'eau représentative de la formation très difficile. Logiquement, le dernier échantillon est celui qui devrait être le plus proche de l'eau originale de l'aquifère. En admettant que la totalité du Ca-Cl analysé dans l'eau provient de l'acidification, on peut estimer que la minéralisation totale de l'eau originale est assez faible, de l'ordre de 1 à 2 g/l. Deux hypothèses sur le chimisme peuvent être avancées.

- Si l'on considère que la majorité du Na est liée au Cl, on serait en présence d'une eau de type Na>Ca-Cl>HCO_3, avec une teneur en NaCl d'environ 800 mg/l et quelque 50 à 100 mg/l de SO_4.
- Si l'on considère par contre que toute la teneur en Cl est due à l'acidification et qu'une partie du Ca dissous pendant l'acidification précipite avec une partie du HCO_3 lors de la remontée de l'eau, on serait en présence d'une eau de type Na-HCO_3 ou peut-être Na>Ca-HCO_3.

Néanmoins une troisième hypothèse doit encore être vérifiée. Au cours de l'essai de production, on a remarqué une augmentation significative de la minéralisation après 43 heures de pompage par air-lift. Simultanément, la teneur en sodium a augmenté d'un coup de 255 ± 5 mg/l à 280 ± 10 mg/l pour ne plus baisser ensuite, alors que les autres espèces retrouvaient les valeurs antérieures. Il serait alors possible que cette augmentation de la minéralisation soit due à l'arrivée d'un deuxième type d'eau plus riche en NaCl (ou Na-HCO_3) et par conséquent plus fortement minéralisée venant d'une plus grande profondeur ou de couches plus éloignées que le fluide du début de l'essai. En admettant la présence de cette deuxième venue d'eau, la répartition des pressions entre les différents niveaux productifs n'est toutefois pas connue et par conséquent, il n'est donc

pas possible de prévoir avec certitude la chimie du ou des fluides de la formation. Dans le but de connaître réellement la composition du (des) fluide(s) de la formation, il serait indispensable de réaliser un test de pompage de longue durée, jusqu'à ce que l'eau atteigne des caractéristiques chimiques stabilisées.

9 Conclusions

9.1 Résultats géologiques

Le forage de Thônex a parfaitement correspondu aux prévisions des géologues, que ce soit du point de vue stratigraphique ou tectonique. La série sédimentaire traversée était conforme en épaisseur et les unités lithologiques sans surprises. Les failles détectées par sismique réflexion haute résolution sur le site même ont été retrouvées en profondeur.

Les fractures mises en évidence par la diagraphie FMS sont sub-verticales et régulièrement orientées vers le N65W. Cette direction correspond à la contrainte alpine minimale qui recoupe orthogonalement le plan de faille caractérisé localement.

Le gradient géothermique est parfaitement normal à Thônex (3,12°C/100 m). L'évolution verticale du pouvoir réflecteur de la vitrinite (PRV) montre une croissance normale avec un gradient PRV de 0.18%Rr/km respectivement de 0.13 log%Rr/km, indiquant un paléogradient géothermique d'environ 30 à 35°C/km. L'état de la diagénèse organique indique l'érosion d'une épaisse couche post-oligocène (OMM et OSM) d'environ 2 km.

9.2 Résultats hydrogéologiques

Les principaux aquifères attendus étaient
- les calcaires du Crétacé (urgoniens) à dominante de karstification et porosité secondaire,
- les calcaires du Jurassique supérieur à faciès récifaux, à porosité matricielle et/ou de microfissuration élevée.

Le premier objectif s'est révélé sec, les fissures d'origine karstique ont été bien identifiées par carottage mais étaient colmatées par les grès du Sidérolithique.

Les calcaires du Jurassique supérieur présentent à Thônex une porosité matricielle d'environ 5% et se sont révélés aquifères. Les diagraphies différées, soniques et nucléaires, indiquent une porosité d'outils pouvant ponctuellement approcher 10%, elles correspondent à des microfissures partiellement ou totalement cimentées, réparties sur deux niveaux, entre les profondeurs 2000 et 2100 m. L'ouverture minime de ces fissures contribue à la faible perméabilité des calcaires et à la modestie du débit du puits (environ 20 m^3/h sous 40 bars de rabattement).

9.3 Résultats hydrochimiques

Les analyses chimiques et isotopiques montrent, malgré les problèmes de contamination du fluide de la formation par l'acide chlorhydrique injecté, que l'on est en présence d'une eau peu chargée en sels minéraux (environ 1–2 g/l de sels dissous) provenant d'une altitude de 800 à 1200 m. La faible teneur en NaCl indique en outre que la majeure partie

de l'eau ne remonte pas de couches plus profondes. Dans une première hyphothèse, l'eau serait de type Na>Ca-Cl>HCO_3, mais les 800 mg/l de NaCl calculés ne peuvent guère provenir des calcaires du Kimméridgien et doivent être dissous ailleurs, peut-être dans les couches du Trias sous-jacent. Dans ce cas, on serait en présence d'un mélange d'au moins deux types d'eau. Dans une deuxième hypothèse, le fluide originel de la formation serait de type Na-HCO_3 et le sodium proviendrait d'un échange cationique entre le Ca du calcaire dissous et le Na de minéraux argileux. Seul un essai de production de longue durée permettrait de comprendre les processus hydrochimiques dans le Kimméridgien.

9.4 Avenir de la géothermie à Genève

Il n'existe apparemment pas dans la partie orientale de la cuvette genevoise de couches géologiques continues présentant une très bonne perméabilité, tout au moins au-dessus des marnes du Jurassique moyen, soit à des profondeurs inférieures à 2700 m.

L'échec relatif du forage de Thônex n'est pas imputable à une erreur de nature «géologique»: en effet stratigraphie et tectonique sont remarquablement conformes aux prévisions. Il ne saurait non plus être imputé à des problèmes pratiques liés au forage qui en dépit d'incidents techniques, a pu être conduit à son terme selon le programme établi. Il ne faut toutefois pas oublier qu'il est fort délicat de tirer des conclusions définitives sur les possibilités géothermiques d'un bassin pour lequel on dispose actuellement d'aussi peu d'informations sur sa structure profonde.

Le forage de Thônex a néanmoins apporté des éléments intéressants pour la géologie et l'hydrogéologie locale. La température de l'eau est conforme aux prévisions faites sur le gradient géothermique, proche de la moyenne (3.12°/100 m ou 31 m/°C) et à une profondeur de 2000 mètres, elle atteint 70°C. La faible teneur en sels minéraux (qu'il faudra confirmer par un essai de production prolongé) pourrait constituer un facteur très important dans la mesure où il permettrait de faire l'économie d'un puits de réinjection et de rejeter l'eau refroidie dans un émissaire de surface. Il reste à étudier les aquifères sous-jacents que l'on pourrait prospecter plus près du Jura, donc plus proches de leur alimentation présumée (Dogger, Lias carbonaté, Trias).

Les calcaires récifaux du Jurassique supérieur sont généralement poreux et contiennent de l'eau douce: il existe probablement dans le bassin genevois un secteur où une intense fracturation permettrait de les drainer sur une distance suffisante pour assurer un débit intéressant susceptible d'appeler un développement géothermique commercial.

Plusieurs axes de recherches seraient à développer si l'on voulait poursuivre la prospection géothermique dans la région genevoise. La synthèse stratigraphique et tectonique de la cuvette genevoise constituerait un objectif de recherche universitaire aussi utile qu'innovant, ainsi qu'une base pour des recherches et prospections futures. L'étude détaillée de la fracturation locale, en relation avec les données tectoniques de surface et les lignes sismiques profondes, permettrait une meilleure compréhension des mécanismes commandant la tectonique profonde.

Enfin, la recherche par sismique réflexion haute résolution de masses récifales importantes pourrait constituer un préalable à un forage sub-horizontal visant à les traverser sur une distance maximale. Ainsi drainerait-on le récif sur plusieurs centaines de mètres, au lieu de la centaine de mètres recoupée par un forage quasi-vertical comparable à celui de Thônex, multipliant d'autant la productivité. Dans ce contexte, les chances de succès

d'une stimulation par acidification et/ou d'une fracturation hydraulique existent, pour autant que les fractures se développent, comme à Thônex, presque verticalement, car elles ainsi seraient orthogonales à l'axe du puits et non parallèles comme c'était le cas dans le forage réalisé.

Remerciements

De nombreuses personnes nous ont apporté leur concours lors des travaux du forage géothermique, il faut signaler en particulier:

- Dr. G. Amberger (service cantonal de Géologie) pour ses nombreux conseils avisés.
- Prof. G. Gorin (Université de Genève) pour son aide dans l'interprétation des diagraphies.
- Prof. J. Charollais (Université de Genève) pour ses informations stratigraphiques et l'appui logistique (lames minces).
- R. Fontaine (Pétroconsultant) pour sa documentation.
- Prof. W. Wildi (Université de Genève) pour son aide et ses conseils.
- Nous remercions l'Office cantonal de l'énergie (Département de l'économie publique) de nous avoir autorisé à publier les résultats du forage géothermique. Le projet de recherche n° 21-325.40.91 du Fonds national suisse de la recherche scientifique a permis de financer une partie des analyses chimiques et isotopiques de l'eau. Les Dr L. Hauber et U. Gruner ont apporté par leur lecture de l'article des critiques constructives et pertinentes.

BIBLIOGRAPHIE

AMBERGER, G. 1988: Interprétation géologique des résultats de l'étude vibrosismique effectuée par la Compagnie Générale de Géophysique. Rapp. 100.88.A, Serv. cantonal de Géol., Dépt. de l'Intérieur et de l'Agriculture.

ARNAUD, D. 1989: Etude géologique établie à partir des images satellites Landsat 5, Spot 1 et Seasat 1. Soc. cartogr. de France.

BLAVOUX, B., BURGER, A., CHAUVE, P. & MUDRY, J. 1979: Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. Rev. Géogr. phys. Géol. Dyn. 21, 295–306.

BUISKOOL TOXOPEUS, J. M. A. 1983: Selection Criteria for the Use of Vitrinite Reflectance as a Maturity Tool. In: Petroleum Geochemistry and Exploration of Europe. (Ed. by BROOKS, J.). Geol. Soc. Spec. Publ. 12, Blackwell Scientific Publications, London, 295–307.

CHAROLLAIS, J. 1963: Recherches stratigraphiques dans l'Est du Massif des Bornes, (Haute-Savoie). Arch. Sci. (Genève) 15, 631–732.

CHAROLLAIS, J., BUSNARDO, R., CLAVEL, B., DECROUEZ, D., DELAMETTE, M., GORIN, G., LEPILLER, M., MONDAIN, P. H., ROSSET, J. & VILLARS, F. 1988: Notice explicative de la feuille Annecy-Bonneville à 1/50 000e. Bur. Rech. Géol. Min. Orléans.

CHAROLLAIS, J. & BADOUX, E. 1990: Suisse lémanique, Pays de Genève et Chablais. Guides géol. rég. Masson Ed. Paris.

CHAROLLAIS, J. & JAMET, M. 1990: Principaux résultats géologiques du forage Brison, (BZN1), Haute Savoie (France). Mém. Soc. Géol. France N.S 156, 185–202.

DEBRAND-PASSARD, S. & COURBOULEIX, S. 1984: Synthèse géologique du Sud-Est de la France. Mém. Bur. Rech. géol. min. 125.

DEVILLE, Q. 1991: Stratigraphie, sédimentologie et environnement de dépôts et analyse séquentielle dans les terrains entre le Kimméridgien supérieur et le Valanginien du Mont Salève, Haute-Savoie (France). Thèse inéd. Univ. Genève.

DOW, W. G. 1977: Kerogen studies and geological interpretation. J. geochem. Explor. 7, 79–99.

GEOLOGIE-GEOPHYSIQUE 1979: Energie géothermique dans le Canton de Genève. Etude complémentaire. Rapp. inéd. Serv. cantonal Géol. Dépt. de l'Intérieur et de l'Agriculture.

GEOLOGIE-GEOPHYSIQUE & GEOPRODUCTION CONSULTANTS 1994: Forage géothermique de Thônex, Rapport final 3 volumes. Rapp. inéd. Office cantonal de l'énergie, Dépt. des travaux publics et de l'énergie.

GORIN, G. 1989: Interprétation géologique de la campagne sismique GG87 dans le Canton de Genève, Rapp. inéd. Serv. cantonal. Géol. Dépt. de l'Intérieur et de l'Agriculture.

HOCHULI, P. A. 1978: Palynologische Untersuchungen im Oligozän und Untermiozän der Zentralen und Westlichen Paratethys. Beitr. Paläont. Oesterr. 4, 1–132.

FANG, H. & JIANYU, C. 1992: The cause and mechanism of vitrinite reflectance anomalies. J. Petrol. Geol. 15, 419–434.

KULLIN, M. & SCHMASSMANN, H. 1991: Isotopic composition of modern recharge. In: Applied isotope hydrogeology. A case study in northern Switzerland. (Ed. by PEARSON, F. J., BALDERER, W., LOOSLI, H. H., LEHMANN, B. E., MATTER, A., PETERS, TJ., SCHMASSMANN, H. & GAUTSCHI, A.). Elsevier, Amsterdam.

LEMCKE, K. 1974: Vertikalbewegungen des vormesozoischen Sockels im nördlichen Alpenvorland vom Perm bis zur Gegenwart. Eclogae geol. Helv. 67, 121–133.

MAJOROWICZ, J. A., JONES, F. W., ERTMAN, M. E., OSADETZ, K. G. & STASIUK, L. D. 1990: Relationship between thermal maturation gradients, geothermal gradients and estimates of the thickness of the eroded foreland section, southern Alberta Plains, Canada. Mar. Petrol. Geol. 7, 138–152.

NEGRON, J. 1987: Rapport d'interprétation sur l'étude de sismique réflexion Géothermie de Genève 1987, Mission 140,36.52. Rapp. inéd. Cie. gén. Géophys.

NISSILE, J. C. 1989: Les sources thermales, subthermales et karstiques de la Caille, (Cruseilles), Bromines et Lovagny, (Haute-Savoie, France). Diplôme inéd. Univ. Genève.

PAVONI, N. & MAYER-ROSA, D. 1978: Seismotektonische Karte der Schweiz. Eclogae geol. Helv. 72, 293–297.

ROBERT, P. 1985: Histoire géothermique et diagenèse organique. Bull. Cent. Rech. Expl. Prod. Elf-Aquitaine, Mém. 8, Pau.

RYBACH, L. & BODMER, P. 1980: Die geothermischen Verhältnisse der Schweizer Geotraverse im Abschnitt Basel–Luzern. Eclogae geol. Helv. 73, 501–512.

SCHEGG, R. 1992: Thermal maturity of the Swiss Molasse Basin: Indications for paleogeothermal anomalies? Eclogae geol. Helv. 85, 745–764.

– 1993: Thermal maturity and history of sediments in the North Alpine Foreland Basin (Switzerland, France). Thèse Univ. Genève, Publ. Dépt. Géol. Paléont. 15.

SWEENEY, J. J. & BURNHAM, A. K. 1990: Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol. 74, 1559–1570.

TEICHMÜLLER, R. & TEICHMÜLLER, M. 1986: Relations between coalification and palaeogeothermics in Variscan and Alpidic foredeeps of western Europe. In: Lecture Notes in Earth Sciences 5: Paleogeothermics. (Ed. by BUNTEBARTH, G. & STEGENA, L.) Springer-Verlag, Berlin, 53–78.

VUATAZ, F. D. 1982: Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. Matér. Géol. Suisse, Sér. Hydrol. 29.

Manuscrit reçu le 18 novembre 1994
Révision acceptée le 30 mars 1995

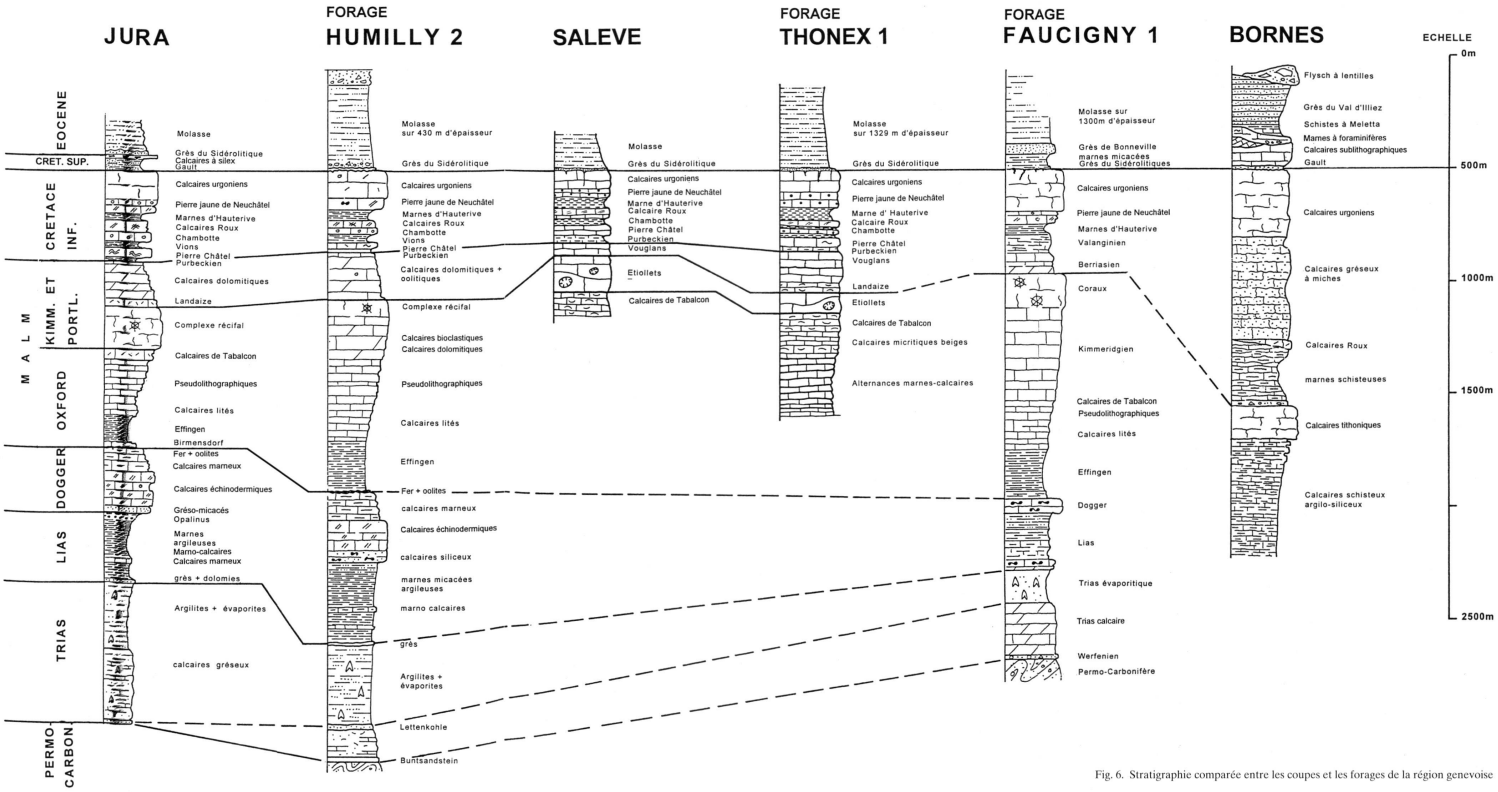


Fig. 6. Stratigraphie comparée entre les coupes et les forages de la région genevoise