

Rapport final décembre 2002

Opération géothermique de Lavey-les Bains (VD)

CESLA – Chaleur des Eaux Souterraines de Lavey S.A.
**Réalisation du forage géothermique profond P600
et exploitation de la ressource énergétique
par pompage dans les puits P600 et P201
(juin 1997 – décembre 2002)**

élaboré par
Bianchetti Gabriele
ALPGEO Sàrl – Hydrogéologues Conseils
Rue du Bourg 49 – 3960 SIERRE



Zones de protection des eaux
Captages d'eau potables
Essais de pompage, traçages



Forages profonds, puits, drainages
Eaux thermales et minérales
Terrains instables, zones de danger

CESLA - Chaleur des Eaux Souterraines de Lavey S.A.
OPERATION GÉOTHERMIQUE DE LAVEY-LES-BAINS (VD)

REALISATION DU FORAGE GEOTHERMIQUE PROFOND P600
ET EXPLOITATION DE LA RESSOURCE ENERGETIQUE
PAR POMPAGE DANS LES PUITES P600 ET P201
(juin 1997 – décembre 2002)



DECEMBRE 2002

RESUME'

L'opération géothermique de Lavey-les-Bains (VD) avait pour objectifs de capter en profondeur de l'eau thermique à $>63^{\circ}\text{C}$ avec un débit de l'ordre de 800 l/min. Elle devait garantir l'autonomie énergétique des Bains et du Centre médical de Lavey pour les besoins de chauffage, ventilation, production d'eau chaude sanitaire et pour les bassins, sans devoir recourir à des pompes à chaleur. En 1997, le forage P600, financé par l'Etat de Vaud, a été réalisé sur le site thermal. Avec une longueur de 595 m et une profondeur de 517 m, ce forage incliné et dévié (environ 45° dans la zone cible) a été un franc succès. Le programme de perforation, les délais de réalisation et le budget de 1.24 Mio de CHF. ont été parfaitement respectés. Les tests de pompage et les diagaphies ont montré la possibilité de capter dans les gneiss fissurés de l'eau thermique à $\sim 69^{\circ}\text{C}$ avec des débits $> 1'100$ l/min.

L'équipement du P600 a été posé en avril 1998 : une colonne de tubages en INOX, avec un diamètre interne de 238 mm jusqu'à 98 m et de 219 mm jusqu'à 254 m, a été cimentée sur toute la hauteur pour isoler l'aquifère thermal profond des eaux froides de la nappe phréatique du Rhône. Les eaux thermales sont captées entre 254 et 595 m, dans un tronçon qui a été laissé en trou nu. Un test de production, réalisé en 1998 pendant 43 jours, a donné des résultats qui ont largement dépassé les prévisions les plus optimistes : débit de 1'340 l/min, rabattement de 77 m et température de l'eau en tête de puits de 68.7°C . Le potentiel thermique disponible est de l'ordre de 5.8 MWth (rejet à 5°C). Le chimisme des eaux montre une minéralisation de l'ordre de 1.4 g/l, de type $\text{Na-SO}_4 > \text{Cl}$. Aucune liaison hydraulique avec la nappe phréatique n'a été constatée et l'impact sur l'ancien puits de production P201 a été faible, à l'exception d'une baisse réversible de la conductivité. Ce pompage a donc montré qu'il était possible d'exploiter simultanément l'ancien puits P201 (environ 400 l/min à 60°C).

Un pompage de 6 mois avec un débit de 620 l/min a été entrepris de août 1999 à mars 2000, en attendant la pose des conduites de transport et l'achat des pompes immergées. Il devait permettre de vérifier l'impact à long terme sur le puits P201 en pompant simultanément dans les deux puits. On constate à la fin du pompage que la température de l'eau du P600 a légèrement diminué (68.2°C), alors que la conductivité se stabilise autour de $2'000 \mu\text{S/cm}$. L'impact sur le puits P201 est le suivant : rabattement supplémentaire de ~ 4 m, baisse de la température de l'eau de l'ordre de 1.5°C et diminution de la conductivité d'environ $150 \mu\text{S/cm}$, moins marquée que celle constatée lors du test de production ($\sim 370 \mu\text{S/cm}$).

Les puits géothermiques P600 et P201 sont en exploitation simultanée depuis avril 2000 et alimentent en eau thermique le complexe thermo-ludique des Bains de Lavey, qui connaît actuellement un essor prodigieux, et le Centre médical de Lavey. Les équipements de raccordement et de pompage ont bénéficié du soutien financier de l'Office fédéral de l'Energie. Trois conduites isolées DN 100 en polyéthylène, dont deux de 870 m pour le P600, permettent d'acheminer l'eau jusqu'aux Bains. L'utilisation des pompes immergées, l'une d'une puissance de 30 KW posée à -93 m dans le P600 et l'autre de 7.5 KW à -50 m dans le P201, est gérée par les besoins de l'établissement thermal. En 2002, un volume de l'ordre de $500'000 \text{ m}^3$ d'eau a été fourni aux utilisateurs, avec un débit moyen annuel de 500 l/min pour le P600 et de 466 l/min pour le P201. Environ 1.5 Mio. de m^3 ont été pompés depuis avril 2000! Jusqu'en septembre 2002, la fermeture des vannes au niveau des Bains de Lavey provoquait le refoulement de l'eau pompée dans la nappe phréatique (P600, en moyenne 150 l/min) et dans le Rhône (P201, env. 20 l/min). Depuis, une modification des installations a permis, sauf cas exceptionnel, de ne plus avoir de rejets. La consommation électrique cumulée des pompes a été maximale en 2001 ($186'000 \text{ kWh}$), pour se stabiliser à $160'000 \text{ kWh}$ en 2002. La consommation spécifique a été de 0.29 kWh par m^3 d'eau pompée pour le P600 et de 0.25 kWh par m^3 pour le P201.

Les pompages en continu permettent de fournir un débit maximum de 1'240 l/min à $\sim 66^{\circ}\text{C}$ pour le P600 et 470 l/min à 58°C pour le P201 (valeurs en décembre 2002). On observe depuis le début de l'exploitation une baisse de température et de conductivité de l'eau thermique pompée, de l'ordre de 2°C et de $280 \mu\text{S/cm}$ pour le P600 et de $\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ et $\sim 500 \mu\text{S/cm}$ pour le P201. Ce phénomène est certainement lié au mode d'exploitation de l'aquifère thermal avec des débits élevés. Même si pour l'instant on ne peut pas encore parler de surexploitation de la ressource énergétique, ce phénomène fait l'objet d'une surveillance attentive pour déceler rapidement soit une accélération de la tendance, soit une stabilisation à long terme.

L'eau thermique fournie aux utilisateurs permet ainsi de couvrir la presque totalité des besoins en chauffage, production d'eau chaude sanitaire, ainsi qu'évidemment le réchauffement de l'ensemble de l'eau des piscines des Bains et du Centre médical de Lavey. Cela est possible grâce à une exploitation en cascade de l'eau thermique à différents niveaux de température, produits par un enchaînement hiérarchisé d'échangeurs de chaleur, sans utilisation d'aucune pompe à chaleur. Sur les $1'829 \text{ kW}$ que représente le besoin moyen annuel en chaleur, seulement 100 kW sont apportés par une chaudière à mazout d'appoint (5.5%). Les rejets actuels du centre thermal, qui se chiffrent à ~ 650 l/min d'eau à une température comprise entre 30 et 34°C , pourraient être valorisés dans un projet de chauffage à distance à St-Maurice. En rajoutant un groupe de chaleur-force à la centrale de chauffage, la puissance maximale à distribuer atteindrait alors $\sim 4.7 \text{ MW}$, permettant de chauffer plus de 500 équivalent-logements.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel der geothermischen Arbeiten von Lavey-les-Bains (VD) war, ein Thermalwasser über 63°C mit Pumpraten einer Grössenordnung von 800 l/min in der Tiefe zu fassen. Diese sollten die Energie-Unabhängigkeit für die Bedürfnisse von Gebäudeheizung, Lüftung, Brauchwasser und Badewasser des thermalen- und des klinischen Zentrums von Lavey garantieren, ohne Wärmepumpen zu beanspruchen. Im Jahre 1997, wurde die vom Kanton Waadt finanzierte Bohrung P600 auf dem Thermalgebiet durchgeführt. Mit einer Länge von 595 m und einer Tiefe von 517 m, war diese geneigte und abgelenkte Bohrung (ungefähr 45° im Zielgebiet) ein grosser Erfolg. Das Bohrprogramm, die Erstellungsfrist und das Budget von 1.24 Mio. CHF. wurden genau beachtet. Die Pumpversuche und Diagrafen, haben die Möglichkeit aufgezeigt Thermalwasser (~ 69°C) mit Pumpraten höher als 1'100 l/min in dem geklüfteten Gneiss zu fassen.

Der Bohrungseinbau P600 wurde in April 1998 erstellt : Eine Inox-Verrohrung, mit einen internen Durchmesser von 238 mm bis 98 mm und von 219 mm bis 254 mm, wurde auf der ganzen Länge einzementiert um das Warmwasser des Grundwasserträgers vom kalten, mit der Rhone zusammenhängenden Grundwasser, zu isolieren. Das Thermalwasser wurde zwischen 254 und 595 m Tiefe gefasst, auf einer Strecke, auf der die Bohrung unverbohrt war. 1998 wurde ein Fördertest während 43 Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse haben die optimistischsten Erwartungen weit übertroffen: Pumprate von 1'340 l/min, Wassersenkung von 77 m und Bohrkopf-Wassertemperatur von 68.7°C. Die Wärmeleistung liegt in der Grössenordnung von 5.8 MWth (Auslauf bei 5°C). Die Wasserchemie hat eine Mineralisierung mit Na-SO₄>Cl in einer Grössenordnung von 1.4 g/l gezeigt. Keine hydraulische Verbindung mit dem Grundwasser wurde festgestellt und die Auswirkung auf die ehemalige Fassung P201 war schwach, mit Ausnahme einer reversiblen Senkung der Leitfähigkeit. Dieser Pumpvorgang hat also bewiesen, dass man gleichzeitig die ehemalige Fassung P201 ausbeuten kann (ungefähr 400 l/min mit 60°C).

In der Wartezeit, zwischen dem Verlegen der Leitungen und dem Kauf der Tauchpumpen, wurde ein 6 monatlicher Pumpvorgang mit einer Pumprate von 620 l/min von August 1999 bis März 2000 durchgeführt. Dieser sollte erlauben die Wirkung auf die ehemalige Fassung P201 zu überprüfen, während in beiden Brunnen gleichzeitig gepumpt wurde. Am Ende des Pumpvorgangs wurde festgestellt, dass die Wassertemperatur des P600 leicht abgesunken war (68.2°C), obwohl sich die Leitfähigkeit bei 2'000 µS/cm stabilisiert hatte. Die Auswirkungen auf die Fassung P201 sind die folgenden : zusätzliche Wassersenkung von ~ 4 m, Senkung der Wassertemperatur einer Grössenordnung von 1.5°C und Abnahme der Leitfähigkeit von ungefähr 150 µS/cm, weniger deutlich als die, die im Fördertest festgestellt worden war (-370 µS/cm).

Die geothermischen Fassungen P600 und P201 werden seit April 2000 gleichzeitig ausgebeutet und versorgen das Spiel- und Thermalbad von Lavey-les-Bains, das derzeit einen wunderbaren Aufschwung erlebt, ebenso wie das ärztliche Zentrum von Lavey mit Thermalwasser. Der Einbau der Leitungs- und Pumpausrüstungen wurde vom Bundesamt für Energiewirtschaft finanziell unterstützt. Drei isolierte Leitungen ND 110 aus Polyäthylen, zwei davon mit einer Länge von 870 m, für die Bohrung P600, erlauben das Thermalwasser bis zu den Bädern zu befördern. Die Benutzung der Tauchpumpen, mit einer Leistung von 30 KW in -93 m Tiefe in der Fassung P600, die andere mit 7.5 KW in -50 m Tiefe in P201, wird durch die Bedürfnisse des Thermalbades gesteuert. Im Jahre 2002, wurde den Verbrauchern ein Wasservolumen in einer Grössenordnung von 500'000 m³ geliefert, mit einer jährlichen durchschnittlichen Pumprate von 500 l/min für P600 und von 466 l/min für P201. Ungefähr 1.5 Mio. m³ wurden seit April 2000 gepumpt! Bis September 2002, verursachte das Schliessen der Schieber auf der Höhe der Bäder von Lavey, eine Verdrängung des gepumpten Wassers in das Grundwasser (P600, durchschnittlich 150 l/min) und in die Rhone (P201, ungefähr 20 l/min). Eine Veränderung der Installationen erlaubte seit dem, ausser in Ausnahmefällen, einen Auslauf zu vermeiden. Der gesamte elektrische Verbrauch der Pumpen, war 2001 auf einem Maximum (186'000 kWh), um sich im Jahre 2002 auf 160'000 kWh zu stabilisieren. Der spezifische Kraftstoffverbrauch war für das gepumpte Wasser von P600, 0.29 kWh pro m³ und für P201, 0.25 kWh pro m³.

Die ununterbrochenen Pumpvorgänge erlauben eine maximale Pumprate von 1'240 l/min mit ~66°C für P600 und 470 l/min mit 58°C für P201 (Werte von Dezember 2002). Seit dem Anfang der Ausbeutung wird eine Senkung der Temperatur und der Leitfähigkeit des gepumpten Thermalwassers beobachtet, in einer Grössenordnung von 2°C und 280 µS/cm für P600 und von ~1.3°C und ~500 µS/cm für P201. Dieses Phänomen hängt sicher mit der Art der Ausbeutung des thermalen-Grundwasserträgers durch hohe Pumpraten zusammen. Obwohl man zurzeit nicht von einer übertriebenen Ausbeutung der Energie sprechen kann, ist dieses Phänomen Gegenstand einer aufmerksamen Überwachung, sowohl um schnell Tendenzänderungen als auch eine Langzeitstabilisierung beobachten zu können.

Das den Benutzern gelieferte Thermalwasser erlaubt auf dieser Weise, die fast vollständige Deckung der Bedürfnisse an Warmwasser für Gebäudeheizung, Brauchwasser, und selbstverständlich des gesamten Badewassers des thermalen- und klinischen Zentrums von Lavey. Dies wird ermöglicht dank einer stufenweisen Nutzung des Thermalwassers bei verschiedenen Temperaturen, erzeugt durch eine abgestufte Verkoppelung der Wärmeaustauscher ohne Benutzung einer Wärmepumpe. Von den 1'829 kW die den jährlichen Wärmeverbrauch ausmachen, werden nur 100 kW von einem zusätzlichen Heizölkessel geliefert (5.5%). Der jetzige Auslauf des Thermalzentrums, der bei ~650 l/min und einer Temperatur zwischen 30 und 34°C liegt, könnte in einem Projekt ausgewertet werden, das eine Heizung im entfernten St Maurice vorsieht. Durch Zusatz einer kraft-wärmekupplung an die Heizzentrale, könnte eine maximale Verteilerleistung von ~4.7 MW erreicht werden, die erlaubt 500 Wohneinheiten zu heizen.

RIASSUNTO

Gli obiettivi dell'operazione geotermica di Lavey-les-Bains (VD) erano di captare in profondità dell'acqua termale ad una temperatura $> 63^{\circ}\text{C}$, con una portata di circa 800 l/min. Questa doveva garantire l'autonomia energetica dei Bagni e del Centro di cure di Lavey, coprendo i bisogni di riscaldamento, ventilazione, produzione d'acqua corrente calda e riempimento delle piscine termali, senza utilizzo di termopompe. Nel 1997, si è quindi realizzato il sondaggio P600, finanziato dal Canton Vaud. Lungo 595 m e profondo 517 m, questo sondaggio inclinato e deviato (circa 45° nella zona-bersaglio) ha avuto un grande successo. Il programma di perforazione, i termini di realizzazione e il preventivo di 1.24 Mio di CHF. sono stati perfettamente rispettati. I test di pompaggio e le diagrame hanno dimostrato che è possibile captare negli gneiss fissurati dell'acqua termale con una temperatura di $\sim 69^{\circ}\text{C}$ e con una portata $> 1'110$ l/min.

Il rivestimento del P600 è stato posato nell'aprile 1998 : una colonna di tubi in INOX, con diametro interno di 238 mm fino a 98 m e di 219 mm fino a 254 m, è stata interamente cementata fino in superficie per isolare l'aquifero termale dalle acque fredde della falda freatica del Rodano. Le acque termali sono captate tra 254 e 595 m, in un tratto di roccia che non è stato rivestito. Un test di produzione, realizzato nel 1998 durante 43 giorni, ha dato dei risultati nettamente al di là delle previsioni più ottimistiche : portata di 1'340 l/min, abbassamento di 77 m e temperatura dell'acqua in testa al pozzo di 68.7°C . Il potenziale termico è di circa 5.8 MWth (raffreddamento a 5°C). Il chimismo delle acque mostra una mineralizzazione di circa 1.4 g/l, di tipo Na-SO₄>Cl. Non si è riscontrata alcuna connessione idraulica con la falda freatica e l'impatto sul vecchio pozzo di produzione P201 è minimo, all'eccezione di un abbassamento reversibile della conducibilità. Questo pompaggio ha quindi dimostrato che è possibile sfruttare in modo simultaneo anche il pozzo P201 (circa 400 l/min a 60°C).

Aspettando la posa delle condotte di trasporto e l'acquisto delle pompe immerse, si è provveduto a pompare durante 6 mesi con una portata di 620 l/min. Si voleva così verificare l'impatto a lungo termine sul pozzo P201 pompando simultaneamente nei due pozzi. Alla fine del pompaggio, si è riscontrato un leggero abbassamento della temperatura dell'acqua del P600 (68.2°), mentre la conducibilità si stabilizza a circa 2'000 $\mu\text{S/cm}$. L'impatto sul P201 è il seguente : abbassamento supplementare di ~ 4 m, abbassamento della temperatura dell'acqua di circa 1.5°C e diminuzione della conducibilità di circa 150 $\mu\text{S/cm}$, comunque di minor entità di quella osservata durante il test di produzione (~ 370 $\mu\text{S/cm}$).

Dall'aprile 2000, i pozzi geotermici P600 e P201 sono sfruttati in simultanea e alimentano con acqua termale il complesso termoludico dei Bagni di Lavey, che conosce attualmente uno sviluppo prodigioso, e il Centro di cure di Lavey. Il sistema di condotte e le installazioni di pompaggio hanno beneficiato del sostegno finanziario dell'Ufficio federale dell'Energia. Tre condotte isolate DN 100 in polietilene, due delle quali lunghe 870 m (P600), permettono il trasporto dell'acqua fino al centro termale. L'utilizzo delle pompe immerse, di cui quella posata a -93 m nel P600 ha una potenza di 30 kW, mentre quella del P201, situata a -50 m, è di 7.5 kW, sono gestite in base alle esigenze dello stabilimento termale. Nel 2002, si è fornito un volume di circa 500'000 m³ d'acqua termale agli utilizzatori, con una portata media annua di 500 l/min per il P600 e di 466 l/min per il P201. Circa 1.5 Mio di m³ sono stati pompati dall'aprile 2000! Fino al settembre 2002, la chiusura delle valvole di regolazione dei Bagni di Lavey provocavano lo scarico dell'acqua pompata nella falda freatica (P600, in media 150 l/min) o nel Rodano (P201, circa 20 l/min). Da allora, tranne casi eccezionali, i rigetti hanno completamente cessato. Il consumo di elettricità per le due pompe è stato massimo nel 2001 (186'000 kWh) e si è stabilizzato a 160'000 kWh nel 2002. Il consumo specifico è stato di 0.29 kWh per m³ d'acqua pompata dal P600 e di 0.25 kWh per m³ nel P201.

I pompaggi permettono di fornire una portata massima di 1'240 l/min a circa 66°C per il P600 e di 470 l/min a 58°C per il P201 (valori del dicembre 2002). Dall'inizio dello sfruttamento dei pozzi, si osserva un abbassamento della temperatura e della conducibilità dell'acqua pompata, di circa 2°C e di 280 $\mu\text{S/cm}$ per il P600 e di $\sim 1.3^{\circ}\text{C}$ e ~ 500 $\mu\text{S/cm}$ per il P201. Questo fenomeno è sicuramente legato al tipo di sfruttamento dell'aquifero termale, con portate elevate. Anche se per il momento non si può ancora parlare di sovrasfruttamento della risorsa energetica, questo fenomeno è sorvegliato attentamente per evidenziare rapidamente sia un'accelerazione della tendenza, sia una stabilizzazione a lungo termine.

L'acqua termale fornita agli utilizzatori permette così di coprire quasi interamente i bisogni per il riscaldamento, la produzione di acqua sanitaria, così come naturalmente il riscaldamento dell'acqua di tutte le piscine dello stabilimento termale e il loro riempimento. Ciò è possibile grazie ad uno sfruttamento in cascata dell'acqua termale a differenti livelli di temperatura, prodotti da una concatenazione gerarchica di scambiatori di calore, senza alcun utilizzo di termopompe. Sui 1'829 kW che rappresenta il bisogno termico medio annuale dei Bagni di Lavey, solo 100 kW sono forniti da una caldaia complementare a nafta (5.5%). Gli scarichi attuali del centro termale, che totalizzano quasi 650 l/min ad una temperatura di $30-34^{\circ}\text{C}$, potrebbero essere valorizzati nell'ambito di un progetto di teleriscaldamento a St-Maurice. Aggiungendo un impianto di cogenerazione forza-calore alla centrale di riscaldamento, la potenza massima da distribuire raggiungerebbe allora ~ 4.7 MW, permettendo il riscaldamento dell'equivalente di più di 500 alloggi.

SOMMAIRE

	Page
1. INTRODUCTION ET HISTORIQUE	9
2. OPERATION GEOTHERMIQUE DE LAVEY-LES-BAINS : MOTIVATIONS ET OBJECTIFS	11
3. PERFORATION DU FORAGE GEOTHERMIQUE P600 (juin – septembre 1997)	11
3.1 Organisation des travaux, implantation du forage et prévisions	11
3.2 Programme des travaux, budget, financement et critères de succès	12
3.3 Caractéristiques techniques de la perforation, trajectoire et inclinaison du forage	13
4. DIAGRAPHIES ET TESTS DE PRODUCTION (août – octobre 1997)	14
4.1 Diagraphies et zones aquifères	14
4.2 Tests de pompage, productivité, impact sur le puits P201 et chimisme de l'eau	16
5. EQUIPEMENT DU FORAGE P600 ET TEST DE PRODUCTION (avril – juin 1998)	17
5.1 Equipement du forage	17
5.2 Test de production, objectifs et déroulement	17
5.3 Résultats, productivité du forage P600, chimisme de l'eau thermique et impact sur le P201	18
5.4 Débit d'exploitation et puissance thermique disponible	20
6. POMPAGE DANS P600 AVANT MISE EN PRODUCTION (août 1999 – mars 2002)	21
6.1 Raisons de ce pompage	21
6.2 Installation mise en place et déroulement du pompage	21
6.3 Résultats	23
7. MISE EN EXPLOITATION DES PUIITS GEOTHERMIQUES P201 ET P600 (dès mars 2000)	25
7.1 Utilisateurs de l'énergie géothermique	26
7.2 Puits de pompage exploités	26
7.3 Systèmes de pompage	26
7.4 Transport de l'eau thermique, alimentation électrique et système hydraulique	28
8. GESTION DES POMPAGES, FOURNITURE D'EAU ET CONSOMMATION ELECTRIQUE	29
8.1 Gestion des pompages	29
8.2 Fourniture d'eau thermique	30
8.3 Consommation électrique des pompes immergées	33
9. SUIVI DES PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES	34
9.1 Réseau de surveillance et paramètres mesurés	34
9.2 Débits et niveaux d'eau	35
9.3 Température et conductivité de l'eau thermique	36
9.4 Productivité des puits P600 et P201	39
10. VALORISATION DE LA RESSOURCE ENERGETIQUE	41
10.1 Besoins de l'établissement thermal	41
10.2 Utilisation d'eau "fraîche" à 63°C	42
10.3 Utilisation d'eau "fraîche" à 36°C	42
11. BILAN ENERGETIQUE	42
11.1 Données utilisées	42
11.2 Couverture des besoins en énergie du centre thermal	44
11.3 Eau thermique disponible et rejets thermiques valorisables	44
12. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	45

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES + PHOTOS

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 :** Chronologie et type de diagraphies géophysiques effectuées dans le forage P600.
- Tableau 2 :** Synthèse des informations délivrées par les diagraphies géophysiques (5.ème intervention du 2 octobre 1997).
- Tableau 3 :** Tests hydrauliques effectués dans le forage P600 et principaux résultats.
- Tableau 4 :** Caractéristiques et principaux résultats du test de production de 1998.
- Tableau 5 :** Principales caractéristiques du système de pompage du P600 (pompage avant exploitation).
- Tableau 6 :** Chronologie de l'essai de pompage de longue durée entrepris dans P600.
- Tableau 7 :** Synthèse des résultats du pompage de longue durée dans P600.
- Tableau 8 :** Principales caractéristiques des puits géothermiques de Lavey-les-Bains
- Tableau 9 :** Principales caractéristiques des systèmes de pompage mis en place dans les puits P600 et P201 (phase d'exploitation).
- Tableau 10 :** Débits moyens annuels du pompage, de la fourniture d'eau thermique aux bains et des rejets pour les années 2000 à 2002. En 2000, les puits n'ont fonctionné que depuis le 30 mars.
- Tableau 11 :** Statistiques des mesures des différents paramètres hydrauliques et physico-chimiques pour les années 2000 à 2002.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 :** Plan de situation de Lavey-les-Bains et de la zone des forages géothermiques.
- Figure 2 :** Plan de situation de la zone des forages géothermiques.
- Figure 3 :** Vue du chantier du forage géothermique P600.
- Figure 4 :** Profils thermiques dans les forages profonds de Lavey-les-Bains.
- Figure 5 :** Test de production (1'300 l/min).
- Figure 6 :** Situation des forages P600 (Vaud) et E2 (Valais).
- Figure 7 :** Courbe caractéristique du puits P600, comparée à celles des pompages N°4 et 5 effectués avant l'équipement du forage.
- Figure 8 :** Détail de la chambre de pompage et de l'emplacement de la pompe immergée dans le forage P600.
- Figure 9 :** Alimentation électrique et commande des équipement de pompage de l'eau thermique
- Figure 10 :** Puits P600 : principe de réglage de la pression en tête de puits.
- Figure 11 :** Volumes d'eau thermique pompée, fournie aux bains et rejetée durant les années 2000 à 2002.
- Figure 12 :** Evolution des débits moyens d'eau thermique fournie aux Bains et rejetée (2000 – 2002).
- Figure 13 :** Consommation électrique des pompes immergées installées dans les puits géothermiques durant les années 2000 à 2002.
- Figure 14 :** Evolution de la température de l'eau pompée par les deux puits durant la période 1998 – 2002.
- Figure 15 :** Courbes caractéristiques des puits P600 et P201
- Figure 16 :** Echangeurs de chaleur à plaques utilisés par les Bains de Lavey
- Figure 17 :** Diagramme de flux d'eau thermique et des échanges d'énergie
- Figure 18 :** Centre thermal de Lavey-les-Bains.

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 :** *Résumé / abstract de la publication de BIANCHETTI, 1994.*
- Annexe 2 :** *Chronologie détaillée des travaux de perforation du forage P600 (20 juin – 10 octobre 1997).*
- Annexe 3 :** *Liste des mesures d'inclinaison et azimuth effectuées dans le forage P600.*
- Annexe 4 :** *Liste des mesures d'inclinaison effectuées dans le forage P600.*
- Annexe 5 :** *Profil vertical du forage P600.*
- Annexe 6 :** *Trajectoire du forage P600, avec indication des principales venues d'eau.*
- Annexe 7 :** *Vitesses de perforation du forage P600, principales zones fissurées d'après l'analyse des cuttings et principales zones aquifères d'après les diagraphies.*
- Annexe 8 :** *Diagraphies géophysiques effectuées le 2.10.1997 dans le forage P600.*
- Annexe 9 :** *Diagraphies de température dans le P600, au repos et en pompage (25.8 et 2.10.1997).*
- Annexe 10 :** *Diagraphies de température dans le P600 (2 octobre 1997).*
- Annexe 11 :** *Diagraphies de conductivité électrique dans le P600, au repos (2.10.1997).*
- Annexe 12 :** *Localisation des principales venues d'eau dans le forage P600 d'après les diagraphies.*
- Annexe 13 :** *Tronçons testés par les pompages effectués durant la phase de perforation du P600 et principaux résultats.*
- Annexe 14 :** *Log géologique/technique du forage P600 et équipement.*
- Annexe 15 :** *Test de production dans le P600 : évolution des principaux paramètres contrôlés lors du pompage.*
- Annexe 16 :** *Analyses chimiques de l'eau du puits P600 et comparaison avec celle du puits P201.*
- Annexe 17 :** *Test de production dans le P600 : évolution des principaux paramètres contrôlés au puits P201.*
- Annexe 18 :** *Analyses chimiques de l'eau du puits P201 et comparaison avec celle du puits P600.*
- Annexe 19 :** *Test de production dans le P600 : évolution des rabattements dans les deux puits de pompage et dans les forages profonds environnants.*
- Annexe 20 :** *Courbes caractéristiques obtenues à partir des tests de pompage (avant équipement) et du test de production réalisé après l'équipement du forage P600.*
- Annexe 21 :** *Pompage de longue durée dans le P600 (18.8.99 – 5.3.00) : évolution des paramètres mesurés dans les puits P600 et P201.*
- Annexe 22 :** *Log géologique/technique du forage P201 (réalisé en 1973) et équipement.*
- Annexe 23 :** *Détail de la chambre de pompage et de l'emplacement de la pompe immergée dans le forage P201.*
- Annexe 24 :** *Schéma des conduites pour le transport de l'eau thermique.*
- Annexe 25 :** *Fourniture d'eau thermique et rejets avant consommation par les Bains durant la période mars 2000 – décembre 2002.*
- Annexe 26 :** *Gestion du pompage au P600 : synthèse des valeurs mesurées durant la période 2000 – 2002.*
- Annexe 27 :** *Gestion du pompage au P201 : synthèse des valeurs mesurées durant la période 2000 – 2002.*
- Annexe 28 :** *Consommation électrique pour chacune des pompes immergées et puissances calculées.*
- Annexe 29 :** *Pression en tête de puits, fréquence des pompes et ampérage relevés aux variateurs de fréquence.*
- Annexe 30 :** *Evolution des principaux paramètres hydrauliques et physico-chimiques du puits P201, qui est exploité depuis 1973.*
- Annexe 31 :** *Evolution des principaux paramètres hydrauliques et physico-chimiques des puits P201 et P600, durant la période 1998 – 2002 (mesures manuelles).*
- Annexe 32 :** *Courbes caractéristiques des puits de pompage.*
- Annexe 33 :** *Schéma de principe simplifié des installations du centre thermal.*

DOSSIER PHOTOGRAPHIQUE

- Photo 1 :** *Tête du puits géothermique P600*
- Photo 2 :** *Tête du puits géothermique P201*
- Photo 3 :** *Chantier du forage P600*
- Photo 4 :** *Forage P600 : un air de champ géothermique néo-zélandais ...*
- Photo 5 :** *Outils de forage utilisés pour la perforation du forage P600*
- Photo 6 :** *Courts essais de pompage et test de production du forage P600 (mai - juin 1998)*
- Photo 7 :** *Salle des machines du centre thermal de Lavey-les-Bains*
- Photo 8 :** *Une équipe gagnante!*

1. INTRODUCTION ET HISTORIQUE

Sur le site de Lavey-les-Bains (Canton Vaud), à deux kilomètres au sud-est de la localité de St-Maurice (VS), un forage de 201 m (P201) capte depuis 1972 de l'eau thermique à une température de 62 °C et avec un débit de 400 l/min dans les gneiss fracturés du massif des Aiguilles Rouges (ZAHNER et al. 1974, VUATAZ 1982, BIANCHETTI 1994). Cette ressource a permis le développement de l'établissement thermal de Lavey-les-Bains (ETLB), propriété du Canton de Vaud (JAFFE et al. 1976). En plus du remplissage des piscines à 37°C, cette eau permettait, grâce à des échangeurs et à une pompe à chaleur (PAC), d'assurer presque complètement le chauffage des bâtiments et de l'eau sanitaire de l'ETLB avec un faible apport de combustibles fossiles. Seule une chaudière à mazout d'appoint était nécessaire pendant les périodes de grand froid. Toutefois, en raison de l'augmentation des coûts de l'électricité nécessaire au fonctionnement de la PAC, celle-ci a été remplacée dès 1996 par une chaudière à mazout.

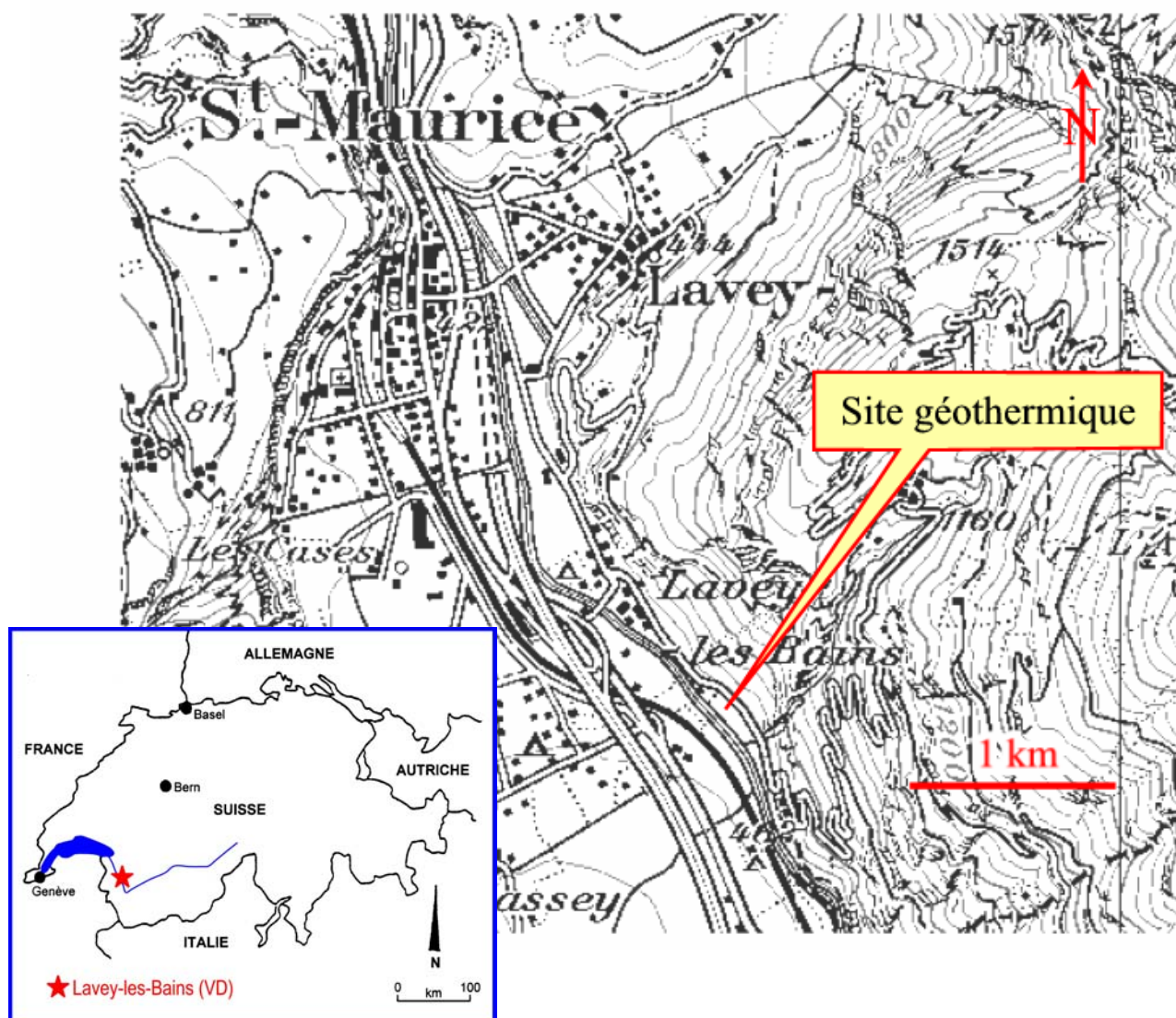


Figure 1 : Plan de situation de Lavey-les-Bains et de la zone des forages géothermiques.

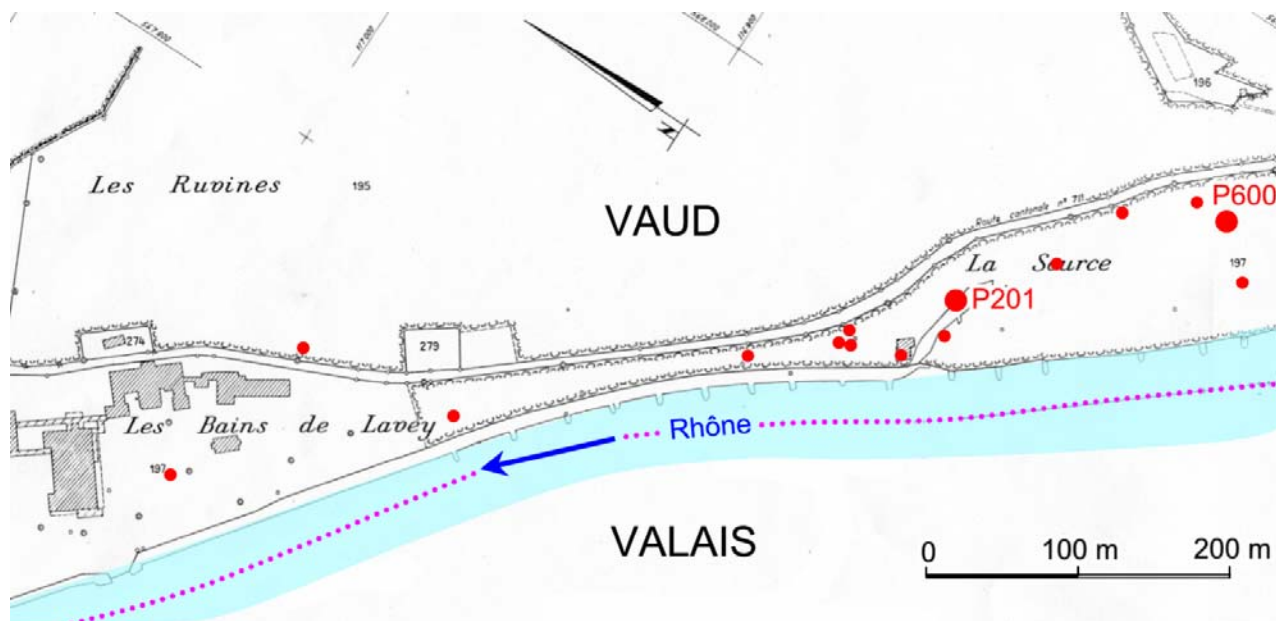


Figure 2 : Plan de situation de la zone des forages géothermiques.
Les points rouges sans dénomination correspondent aux forages de reconnaissance réalisés depuis 1970

En 1992, un projet de recherche pour étudier l'optimisation de la ressource énergétique a été financé par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN). Cette étude, réalisée par le Laboratoire d'Energétique Industrielle (LENI) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), a été menée en parallèle sur deux fronts différents (énergie et hydrogéologie). Elle conclut à la possibilité, moyennant une augmentation du débit et de la température de la ressource géothermale, **de garantir l'autonomie énergétique de l'ETLB sans PAC et uniquement avec des échangeurs de chaleur, avec en prime un prix concurrentiel par rapport aux autres sources d'énergie** (KRUMMENACHER et BIANCHETTI, 1995). La condition pour aboutir au succès de l'opération, moyennant un renouveau des installations existantes, est de disposer d'eau thermale avec un débit de 800 l/min à une température minimale de 63°C (ou d'un potentiel thermique comparable, p.ex. 650 l/min à 70°C). Pour augmenter la puissance thermique de la ressource géothermale, la réalisation d'un nouveau forage géothermique profond est alors apparue comme la solution évidente.

En juillet 1996, un dossier pour l'obtention de la couverture du risque de forage géothermique était déposé auprès de l'OFEN par le Service des Hospices cantonaux de l'Etat de Vaud (BIANCHETTI et HADORN, 1996). En mars 1997, le Conseil d'Etat vaudois décidait d'autoriser le financement des travaux du forage géothermique profond et l'OFEN acceptait la requête de garantie du risque géothermique. L'opération géothermique de Lavey-les-Bains pouvait enfin démarrer!

2. OPERATION GEOTHERMIQUE DE LAVEY-LES-BAINS : MOTIVATIONS ET OBJECTIFS

Le projet du nouveau forage géothermique de Lavey-les-Bains est né d'une constatation toute simple : bien que disposant d'une ressource géothermique à température élevée (62°C) et avec un débit intéressant (400 l/min), on devait recourir, pour assurer le chauffage des bâtiments, à une pompe à chaleur. L'utilisation de celle-ci engendrait une dépense annuelle de l'ordre de CHF. 150'000 pour l'électricité. Pire encore! Depuis 1996, pour des raisons de rentabilité financière, la PAC a été mise hors service et remplacée par une grosse chaudière à mazout, avec tout de même une dépense annuelle de l'ordre de CHF. 120'000! Un vrai comble, en sachant qu'il était possible d'augmenter la température de la ressource géothermale en la captant à plus grande profondeur!

Les **objectifs** de l'opération géothermique de Lavey-les-Bains étaient donc les suivants :

- **capter de l'eau thermale au moyen d'un forage profond avec une température supérieure à 63°C et un débit de l'ordre de 800 l/min.** Il va de soi que des températures encore plus élevées permettraient d'atteindre le même but avec des débits sensiblement inférieurs (p.ex. 650 l/min pour 70°C);
- **garantir l'autonomie énergétique du complexe des Bains** pour les besoins de chauffage, ventilation, production d'eau chaude sanitaire ainsi qu'évidemment le réchauffement de l'ensemble de l'eau des bassins intérieurs et extérieurs, **sans devoir recourir à des pompes à chaleur.**

3. PERFORATION DU FORAGE GEOTHERMIQUE P600 (juin – septembre 1997)

3.1 Organisation des travaux, implantation du forage et prévisions

Maître de l'ouvrage :	Etat de Vaud, Service des Hospices cantonaux, Lausanne.
Direction des travaux :	Bureau Gabriele Bianchetti, hydrogéologue dipl., Sierre
Travaux de perforation :	Entreprise STUMP Sondages SA, Etagnières
Diagraphies géophysiques :	GEOTEST AG, Zollikofen

Les travaux ont également été suivis par une commission de construction, composée de M. Nicolas Herkommer, architecte auprès du Service des Hospices du canton de Vaud, du Dr. François Vuataz, hydrogéologue du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel et de M. Michel Marrel, hydrogéologue cantonal vaudois. Deux experts scientifiques ont été désignés par l'Etat de Vaud et par l'OFEN pour superviser la qualité des travaux, en la personne du Prof. François Zwahlen, respectivement de M. Jean-Paul Burri, géologue à Meyrin.

L'implantation et le choix de l'azimut du forage géothermique profond, appelé P600, ont été effectués sur la base de nombreuses études menées depuis 1987 (BIANCHETTI 1994, FLAMM 1994). Il a été possible aussi de profiter des nouvelles connaissances hydrogéologiques et géothermiques acquises sur sol valaisan dans le cadre du programme GEOTHERMOVAL (évaluation et mise en valeur des ressources géothermiques du canton du Valais), mené de 1988 à 1992 par le Centre de Recherches sur l'Environnement Alpin de Sion, qui a permis de mieux comprendre les mécanismes de circulation des eaux profondes dans l'aquifère thermal (VUATAZ et al. 1993; RIOND et MASSON 1991).

Une gravière située au SE du puits de production actuel (P201) a été retenue pour l'implantation du forage P600. Quatre forages de reconnaissance réalisés dans cette zone en 1992 ont mis en évidence la présence de venues d'eau thermale dans le massif rocheux fissuré. La zone choisie est facile d'accès et très éloignée des habitations et de l'hôtel, ce qui a permis de diminuer les frais d'installation du chantier (pas de parois anti-bruit) et le coût de la perforation (possibilité de travailler 24 heures sur 24). L'azimut de 300° et l'inclinaison de 45° dans la zone-cible prévus pour le forage P600 ont été choisis pour recouper de manière optimale les fissures aquifères en profondeur, compte tenu de l'espace disponible (nécessité d'arrêter le forage avant la frontière intercantonale Vaud-Valais).

Plusieurs études hydrogéologiques et géothermiques de Lavey-les-Bains ont permis de conclure qu'il était possible d'obtenir le débit et la température recherchés. Depuis 1972, sept forages de reconnaissance de 70 à 250 m de profondeur ont démontré que seule une partie des eaux thermales de l'aquifère profond était exploitée et qu'un potentiel non négligeable pouvait être encore capté. L'extrapolation des caractéristiques physico-chimiques de l'eau thermale profonde, basée sur l'étude géochimique et isotopique des eaux pompées dans les forages existants, concluait à la possibilité de capter de l'eau plus chaude que celle actuellement fournie par le forage P201 (BIANCHETTI 1994). Les prévisions montraient qu'un forage géothermique de l'ordre de 500-600 m permettrait d'obtenir un débit jusqu'à 900 l/min et température de l'eau de l'ordre de 70°C (annexe 1).

3.2 Programme des travaux, budget, financement et critères de succès

Le programme du forage P600 prévoyait une perforation jusqu'à environ 100 m avec une inclinaison de 10°, portée progressivement jusqu'à 45° dans le tronçon de 100 à 400 m. Cette déviation devait se faire soit au moyen des paramètres de perforation (pression sur les tiges, vitesse de rotation, configuration des masses-tiges), soit par l'utilisation d'une turbine entre environ 150 et 350 m, qui aurait permis si nécessaire de corriger aussi l'azimut du forage, au cas où celui-ci déviait vers le territoire valaisan limitrophe. La zone de la cible aquifère était représentée par un tronçon de 400 à 600 m, à perforer avec une inclinaison constante de 45°. La longueur totale prévue du P600 était donc de 600 m pour une profondeur à atteindre de 490 m.



Figure 3 : *Vue du chantier du forage géothermique P600. Au premier plan on voit le bac à boue et le tamiseur. La foreuse est visible en haut à gauche de la photo.*

Le budget total de l'opération géothermique était de 1.24 Mio. de CHF. (TVA incluse), financés entièrement par l'Etat de Vaud. Le projet a obtenu la garantie du risque de forage par l'OFEN. En cas d'échec total du forage, la Confédération aurait dû verser à l'Etat de Vaud 60% des coûts de forage, soit au maximum CHF. 744'000.- (TVA incluse). Les critères pour le succès ou l'échec du forage ont été définis de la manière suivante :

Succès : Puissance géothermique ≥ 3 MWth et minéralisation ≤ 3.5 g/l

Echec : Puissance géothermique ≤ 1.6 M kWth ou minéralisation > 3.5 g/l

Entre ces deux valeurs, le forage est considéré comme un succès partiel. La garantie au risque est alors accordée au prorata entre les valeurs de puissance-succès et puissance-échec.

3.3 Caractéristiques techniques de la perforation, trajectoire et inclinaison du forage

Après l'installation du chantier en juin 1997, les travaux de perforation ont été réalisés selon les prévisions en deux mois, du 25 juillet au 26 septembre 1997, en 5 étapes successives (annexe 2) :

1. Perforation du Quaternaire (alluvions fluviales et moraine) et du toit du rocher (gneiss) jusqu'à 50 m, réalisée au rotary avec bentonite. On a d'abord perforé en diamètre 17 ½" (444 mm) jusqu'à 8.5 m, avec pose et cimentation d'un tubage technique 16" (406 mm). La perforation a été ensuite poursuivie en diamètre 14 ¾" (375 mm) jusqu'à 50 m, avec pose et cimentation d'un tubage technique de 13 ⅝" (340 mm).
2. Perforation dans le rocher (gneiss) au rotary avec bentonite et polymères de 50 à 105 m. Le diamètre est de 12 ¼" (311 mm). Réalisation de diagraphies dans la boue et de l'air-lift N° 1. Pose et cimentation d'un tubage technique diamètre 10 ¾" (273 mm) jusqu'à 105 m.
3. Perforation au rotary avec polymères de 105 à 254 m avec un diamètre de 9 ⅞" (250 mm). Réalisation de l'air-lift N°2, suivi du pompage N°1 et de diagraphies dans l'eau claire. Pose jusqu'à 254 m et cimentation au sabot d'un tubage technique 8 ⅝" (219 mm). A 103 m, un filetage à gauche a été posé pour permettre de retirer plus tard le tubage avant l'équipement final du forage.
4. Perforation au rotary 7 7/8" avec polymères de 254 à 268 m, ensuite perforation avec turbine diamètre 7 7/8" (200 mm) de 268 à 411 m (déviations contrôlées du forage). Réalisation de diagraphies dans la boue, suivies de l'air-lift N°3, du pompage N° 2 et de diagraphies dans l'eau claire.
5. Perforation au rotary à l'air et à l'eau de 411 à 595 m avec un diamètre de 7 7/8".

Le forage a une longueur totale de 595 m et atteint une profondeur de 517 m. Le fond du trou se situe ainsi 84 m sous le niveau de la mer. L'ensemble du forage a été réalisé en destructif, il n'y a pas eu de carottages. Le forage est en "trou nu" dans les gneiss fissurés entre 254 et 595 m (zone drainante).

L'azimut et l'inclinaison du forage ont été contrôlés au fur et à mesure de l'avancement pour connaître à tout moment l'évolution de la trajectoire et la position exacte du fond de trou (annexes 3 et 4). Le forage devait en effet rester impérativement sur sol vaudois et ne pas traverser la frontière avec le canton du Valais. Au total, 50 mesures de type single-shot ont été réalisées pour connaître la trajectoire du forage.

Du 27 septembre au 8 octobre 1997, la perforation du forage a été suivie de 3 pompages supplémentaires (N° 3 à 5) et de diagraphies dans l'eau claire, qui ont investigué la zone en trou nu entre 254 et 595 m. Le chantier a été démobilisé les 9 et 10 octobre 1997.

Le forage a débuté avec un azimuth de 300° et une inclinaison de 8° par rapport à la verticale (annexe 5). A 105 m, la trajectoire du forage était encore pratiquement droite (azimut 299° et inclinaison 10°). Dans le tronçon entre 105 et 254 m, le forage a fortement dévié vers l'Ouest (azimut 289° à 250 m) et s'est dirigé vers la frontière intercantonale (annexe 6). Pour cette raison, il a été décidé de mobiliser la turbine afin de corriger la trajectoire du forage. Cette opération, réalisée de 268 à 411 m par l'entreprise allemande Halliburton, a été couronnée de succès. La trajectoire du forage a été progressivement ramenée vers le NW pour atteindre un azimuth de 302° à 411 m. En même temps, l'inclinaison du forage a été portée à 40.2° à la même longueur. Entre 411 et 595 m, la trajectoire du forage a de nouveau dévié vers l'Ouest (295° à 593 m), alors que l'inclinaison augmentait progressivement pour atteindre 47.8° au fond du forage.

Lors de la perforation, la vitesse d'avancement a été régulièrement mesurée et les cuttings ont fait l'objet d'une investigation détaillée pour mettre en évidence les zones fissurées et les circulation d'eau (altération de certains minéraux). Certaines zones aquifères mises en évidence par ces observations ont été confirmées par les diagraphies réalisées une fois le forage terminé (annexe 7).

4. DIAGRAPHIES ET TESTS DE PRODUCTION (août – octobre 1997)

4.1 Diagraphies et zones aquifères

La zone de Lavey-les-Bains est caractérisée par un gradient thermique anormalement élevé, résultant de l'émergence des eaux thermales (figure 4). Il était donc très important d'effectuer des diagraphies dans le forage pour mettre en évidence des anomalies de température et pour pouvoir connaître avec précision les zones d'arrivées d'eau thermo-minérale. Des diagraphies ont été réalisées à 5 reprises par l'entreprise GEOTEST de Zollikofen pour tester les différents tronçons aquifères. Les investigation réalisées sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1: Chronologie et type de diagraphies géophysiques effectuées dans le forage P600.

Intervention	Date	Fluide dans le trou	Tronçon testé	Type de diagraphie	Etat
N° 1	11.8.'97	Boue	50 - 105 m	Température + conductivité électrique Résistivité (FEL) et caliper	Repos
N° 2	25.8.'97	Eau claire	105 – 253 m	Température + conductivité électrique Caliper et flowmètre	Repos + pompage
N° 3	5.9.'97	Boue	254 – 411 m	Température + conductivité électrique Caliper	Repos
N° 4	15.9.'97	Eau claire	254 – 411 m	Température + conductivité électrique Caliper et flowmètre	Repos + pompage
N° 5	2.10.'97	Eau claire	254 – 595 m	Température + conductivité électrique Caliper et flowmètre	Repos + pompage

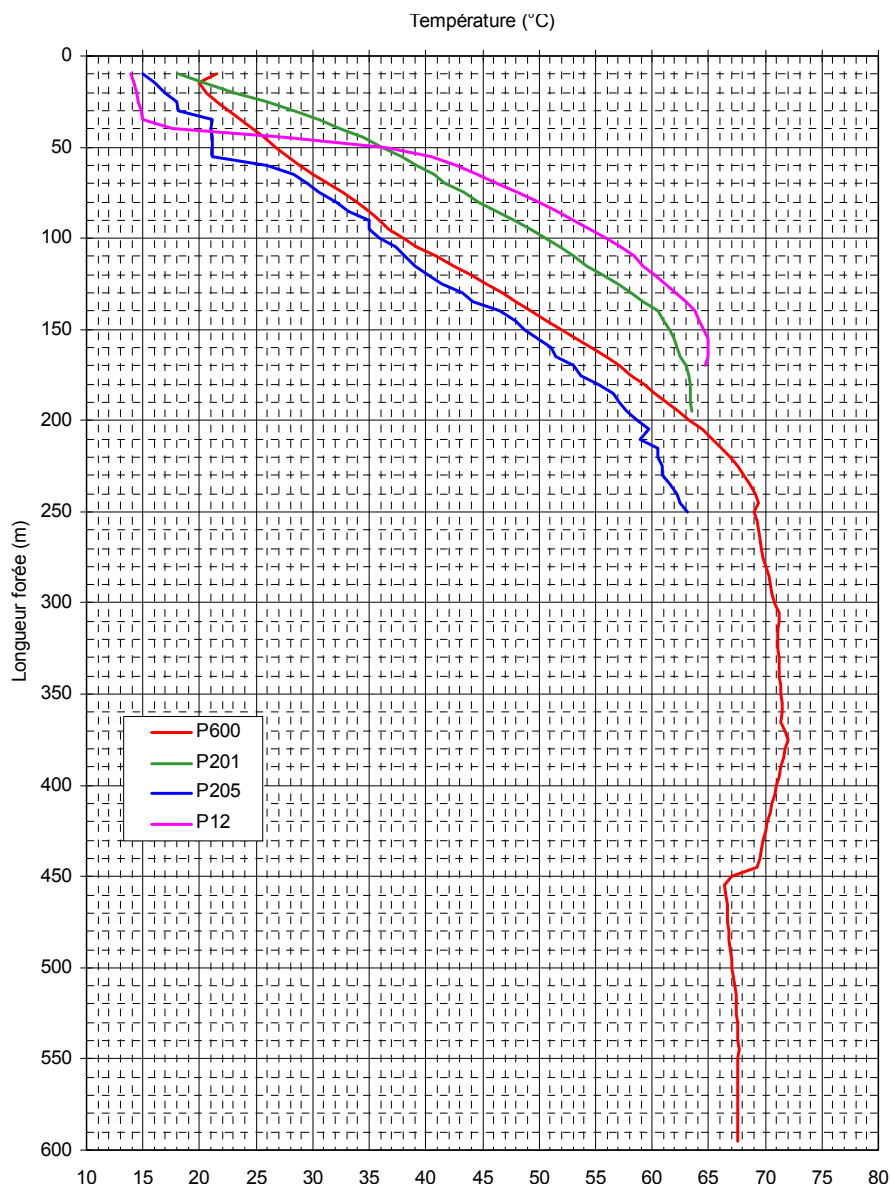


Figure 4 : Profils thermiques dans les forages profonds de Lavey-les-Bains.

Après les essais de pompage, la 5.ème et dernière intervention a mesuré le tronçon laissé en trou nu de 254 à 595 m. Ont été mesurés : log caliper, profil de température et de conductivité au repos et avec pompage, ainsi que log flowmètre avec pompage (annexe 8). Les résultats des différents logs sont concordants et mettent en évidence plusieurs fractures ou zones de fissures aquifères. La température maximale mesurée a été de 72.1 °C à 373 m lors de la diagraphie au repos réalisée le 2 octobre 1997 (annexes 9 et 10). On remarque qu'en pompant la température à cette profondeur accuse une baisse de 3°C. En effet, les eaux drainées dans la zone la plus productive du forage, à 447 m, ont une température de 68°C. La conductivité maximale (corrigée à 20°C) a été mesurée entre 520 et 595 m, avec des valeurs de 2'060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (annexe 11). Une synthèse des informations fournies par les diagraphies effectuées le 2 octobre 1997 dans le forage terminé est présentée dans le tableau 2. La localisation des principales zones aquifères et leur productivité est illustrée à l'annexe 12.

Tableau 2: Synthèse des informations délivrées par les diagraphies géophysiques (5.ème intervention du 2 octobre 1997).

Localisation des fractures ou zones de fissures	Débit (%)	Débit (l/min)	Température de l'eau (°C)
514 m	6	69	67.5
454 m	6	69	66.2
447 m	49	564	67.9
de 370 à 373 m	16	184	70.0
de 358 à 360 m	13	150	70.5
de 321 à 327 m	8	92	72.5
254 m (rupture cimentation ?)	2	23	55.7

4.2 Tests de pompage, productivité, impact sur le puits P201 et chimisme de l'eau

Plusieurs tests de production ont été effectués pour déterminer la productivité des différents tronçons de gneiss fracturés traversés par le forage. Les principaux résultats sont présentés dans le tableau 3 et l'annexe 13.

Tableau 3: Tests hydrauliques effectués dans le forage P600 et principaux résultats.

Date	Durée	Tronçon testé	Type de test	Débit (l/min)	Rabattém. (m)	Tempér. (°C)
11.8.1997	6 h	50 - 105 m	Air-lift N°1	50	65	28.6
19.8.1997	11 h	105 - 254 m	Air-lift N°2	100	88	45.1
21-22.8.1997	22 h	105 - 254 m	Pompage N°1	99	68	55.7
8.9.1997	8 h	254 - 411 m	Air-lift N°3	223	52	61.3
11-12.9.1997	32 h	254 - 411 m	Pompage N°2	285	58	67.6
27-28.9.1997	28 h	254 - 595 m	Pompage N°3	900	30	68.4
29.9-1.10.1997	52 h	254 - 595 m	Pompage N°4	900	31	68.5
6-8.10.1997	45 h	254 - 595 m	Pompage N°5	1'100	45	68.6

Le chimisme des eaux thermales les plus chaudes est de type Na ; SO₄>Cl, similaire à celui de l'eau pompée depuis 1972 dans le puits de production P201 (annexe 16). Les eaux les plus chaudes sont aussi les plus minéralisées (environ 1.4 g/l) et l'on dénote toujours la présence d'une faible teneur en H₂S.

Lors de la perforation du forage P600 et pendant les tests de production, le puits d'exploitation P201 a été contrôlé plusieurs fois par jour et les forages environnants au moins une fois par jour. Des changements de la température (± 3 °C) et de la conductivité de l'eau ont été remarqués lors de la perforation à l'air et à l'eau. Ces variations ont cessé une fois la perforation terminée. L'impact des pompages n° 4 et 5 sur le puits P201 est relativement restreint : on observe en effet une augmentation d'environ 2.5 m du rabattement et une diminution de quelques dixièmes de °C pour la température de l'eau pompée au P201. Par contre, aucun impact n'a été observé sur les forages situés sur sol valaisan à Epinassey, à environ 1.5 km du forage P600.

5. EQUIPEMENT DU FORAGE P600 ET TEST DE PRODUCTION (avril – juin 1998)

5.1 Equipement du forage

Le programme du forage P600 prévoyait que l'équipement final serait défini une fois la perforation terminée et les résultats des essais de pompage connus. En raison des délais de livraison des tubages en Inox, on savait qu'il fallait attendre entre deux et trois mois avant d'effectuer cette opération. Pour des raisons techniques (température de l'air > 5°C pour des soudures de bonne qualité), l'équipement du forage a été remis au printemps 1998.

Le temps d'attente de 6 mois entre la fin des essais de pompage (septembre 1997) et la mise en place de l'équipement (mars 1998), a été mis à profit pour commander les tubages lorsque le prix de l'acier l'Inox était le plus favorable. D'autre part, vue la bonne tenue des parois du trou de forage dans la zone aquifère qu'on voulait exploiter, il a été décidé de ne pas installer des crépines et de laisser le trou nu entre 254 et 595 m. Ces deux décisions ont permis au Maître de l'ouvrage de réaliser une économie substantielle (de l'ordre de CHF. 100'000.-) par rapport au budget initialement prévu.

Les travaux d'équipement du forage P600 ont débuté le 31 mars et se sont terminés le 3 avril 1998. Tout d'abord, le tubage technique 8⁵/₈", qui était uniquement cimenté au sabot, a été entièrement arraché, laissant ainsi le forage en trou nu de 105 à 595 m. Ensuite, il a été procédé à la mise en place et à la cimentation d'une colonne de tubages pleins (= non crépinés) en Inox qualité V4A, soudés par tronçons d'environ 6 m, selon le schéma présenté à la figure 8 :

- de 0 à 98 m, tubages Inox 9⁵/₈" (diamètre int. 238 mm) : il s'agit de la "chambre de pompage".
- de 98 à 254 m, tubages Inox 8⁵/₈", (diamètre int. 219 mm).

La cimentation de l'annulaire n'a pas posé de problèmes particuliers et aucune perte n'a été constatée. Le trou de forage a été laissé nu de 254 à 595 m (diamètre 200 mm).

5.2 Test de production, objectifs et déroulement

Les objectifs de ce pompage étaient les suivants :

- Tester l'aquifère thermal sur une période d'environ 1 mois.
- Vérifier l'étanchéité de la cimentation (absence de liaisons hydrauliques avec l'aquifère froid de la nappe phréatique du Rhône) et tester l'efficacité de l'équipement du forage.
- Déterminer la productivité du forage et le débit d'exploitation maximum.
- Vérifier l'impact sur l'actuel puits de production P201 et sur le forage E2 situé sur sol valaisan.

Le système de pompage se présentait de la manière suivante :

- Pompe immergée 8", type GRUNDFOS, modèle SP 95-8 avec moteur de SP95-12 (55 kW), placée à -94 m.
- Evacuation des eaux dans le bournier, et vidange dans la fosse d'infiltration.
- Système de jaugeage du débit avec un bac de 5'000 l, volume gradué de 650 l.

Le pompage s'est déroulé du 6 mai au 18 juin 1998. L'aquifère a ainsi été testé de manière interrompue pendant 43 jours. Le temps de pompage a été prolongé d'environ 2 semaines par rapport au programme, afin de mieux confirmer l'impact sur le puits de production P201. Cinq paliers de différents débits ont été réalisés, jusqu'à un maximum de 1'340 l/min (env. 22 l/s). La courbe de remontée a été mesurée pendant 5 jours après l'arrêt du pompage.

A remarquer que 5 heures environ après le début du pompage dans P600, le puits P201 a été aussi mis en production, avec un débit moyen de l'ordre de 370 l/min (env. 6 l/s).



Figure 5 : Test de production (1'300 l/min à 68.7°C).

5.3 Résultats, productivité du forage P600, chimisme de l'eau thermique et impact sur le P201

Les principaux résultats de ce pompage sont présentés dans le tableau 4. La représentation graphique de l'évolution des différents paramètres mesurés au P600 et au P201 se trouve dans les annexes 15 et 17.

Evolution de la température de l'eau

La température de l'eau thermique, après avoir atteint un maximum de 70.0°C dans les premières heures du pompage, a progressivement baissé pour se stabiliser, au bout d'un mois, et se maintenir ensuite jusqu'à la fin du pompage, à 68.7°C (annexe 15).

Evolution de la conductivité électrique de l'eau

La conductivité électrique a atteint un maximum de 2'100 µS/cm après une heure de pompage. Elle a ensuite brusquement chuté en l'espace de quelques heures jusqu'à 1'960 µS/cm, en concomitance avec le démarrage du pompage dans le puits P201. Par la suite, la conductivité a progressivement augmenté jusqu'à un maximum de 2'050 µS/cm au bout de 8 jours de pompage. Depuis ce moment, les valeurs ont diminué de nouveau pour se stabiliser à 1'900 µS/cm en fin de pompage (annexe 15).

Productivité

Le niveau d'eau avant le pompage était situé à -10.32 m. Avec un débit maximum de 1'340 l/min, le niveau s'est abaissé et stabilisé vers 87 m, le rabattement est donc d'environ 77 m (annexe 15). La courbe caractéristique du forage P600, obtenue en reportant les différents rabattements en fonction des débits de pompage, est présentée à l'annexe 20. Pour des débits élevés (>900 l/min), les différents points s'alignent sur une droite : le débit critique n'est pas atteint jusqu'à des débits d'au moins 1'340 l/min.

Tableau 4: Caractéristiques et principaux résultats du test de production de 1998.

Palier	Durée	Débit (l/min)	Rabatement (m)	Température (°C)	Conductivité(μS/cm)
1	633 h	1'200 - 1'180	64.70	70.0 - 68.8	2'030 - 1'936
2	230 h	1'300 - 1'340	76.88	68.8 - 68.7	1'932 - 1'882
3	119 h	840 - 900	39.58	68.3 - 68.7	1'883 - 1'895
4	26 h	600 – 570	18.71	68.5 - 68.7	1'895 - 1'903
5	31 h	1'200 – 1'090	52.48	68.7	1'903 - 1'901

La comparaison avec la courbe caractéristique du forage avant équipement montre une baisse de la productivité de l'ordre de 17% : cette diminution de débit ne peut s'expliquer que par le colmatage de fissures aquifères, qui toutefois ne peut pas être imputé à la cimentation (ou alors uniquement dans une moindre mesure), étant donné l'absence de pertes de ciment au fond du tubage technique constaté lors de ces travaux. Des phénomènes physico-chimiques (précipitation de calcite) pourraient être à l'origine de ce phénomène.

Chimisme de l'eau thermique

Un échantillonnage a été effectué au 36.ème jour de pompage (11.6.1998), à la fin du palier avec débit maximum (1'340 l/min). Le chimisme des eaux thermales est de type Na-SO₄>Cl et s'apparente à celui de l'eau pompée depuis 1972 dans le puits de production P201 (annexe 18). On remarque toujours la présence de H₂S.

Impact sur le pompage au puits P201

Avant, pendant et après le test de production (période mai - juillet 1998), l'ancien puits de production P201, où on pompait en parallèle avec des débits entre 340 et 445 l/min a été contrôlé (annexe 17), ainsi que les forages profonds environnants (annexe 19). Le niveau d'eau dans le P201 a atteint une profondeur maximale de 24.7 m (rabatement d'environ 22.5 m). La température de l'eau atteint un maximum de 61.9°C après 12 jours de pompage au P600, pour progressivement diminuer jusqu'à 61.2°C en fin de pompage. La conductivité de l'eau du P201, qui avant le pompage dans le P600 était de 1'840 μS/cm, n'a cessé de diminuer jusqu'à la fin du palier N° 2 du pompage au P600 (débit maximum de 1'340 l/min) : elle a atteint un minimum de 1'470 μS/cm! Dès la réduction de débit au P600, les valeurs de conductivité de l'eau du P201 ont progressivement augmenté jusqu'à 1'680 μS/cm à la fin des pompages au P600 et au P201.

En fait, l'impact sur le puits P201 est relativement contenu en ce qui concerne la température (baisse de quelques dixièmes de °C) et le niveau d'eau (rabatement supplémentaire de l'ordre de 3 m environ). La productivité de ce puits n'est pas diminuée de manière significative par le pompage dans le forage P600. Par contre, la forte baisse de la conductivité de l'eau (-370 μS/cm), indiquant une importante diminution de la minéralisation, est plus spectaculaire et a été confirmée par les analyses chimiques (annexe 17). Il s'agit toutefois d'un phénomène temporaire et réversible, la conductivité ayant progressivement augmenté dès l'arrêt du test de production dans P600 pour atteindre 1'820 μS/cm 40 jours après (annexe 17).

Le pompage dans le forage P600 entraîne naturellement un rabattement dans tous les forages profonds, montrant la réaction de l'aquifère thermal sollicité par le prélèvement d'eau à débit élevé (annexe 19). Ce sont les forages le plus proche (S9) et le plus éloigné (P205) du P600 qui montrent les rabattements les plus importants, à savoir 7.3 m, respectivement 6.3 m (annexe 19).

L'impact à long terme sur l'actuel puits de production P201 n'est pour le moment que partiellement connu : depuis les travaux de perforation et les pompages dans P600, on observe une diminution irréversible de la température de l'ordre de 0.5 °C, alors que la conductivité n'a que peu varié, à l'exception de la période du test de production. Par contre, la productivité du P201 n'a pas été modifiée.

Conclusions

Le test de production a permis d'obtenir un certain nombre d'informations utiles pour l'exploitation du puits P600 :

- Possibilité de pomper des débits élevés (~1'350 l/min), avec une température en tête de puits de l'ordre de 69°C.
- Absence de liaisons hydrauliques avec la nappe d'eau froide du Rhône, confirmée par les valeurs élevées de température de l'eau et par la stabilité de ce paramètre dans le temps.
- Stabilisation des rabattements même pour des débits élevés, montrant que l'aquifère thermal n'est pas surexploité même pour de longues périodes de pompage.
- Faible impact sur l'ancien puits de production P201, à l'exception d'une forte diminution de la minéralisation de l'eau, indiquée par la chute des conductivités, malgré une relation hydraulique indubitable. L'exploitation simultanée de l'ancien et du nouveau puits est donc possible (voir ci-après).
- Impact nul sur le forage E2, situé sur sol valaisan à 1'600 m de distance (Bureau Tissières, 1998, cf. figure 6).

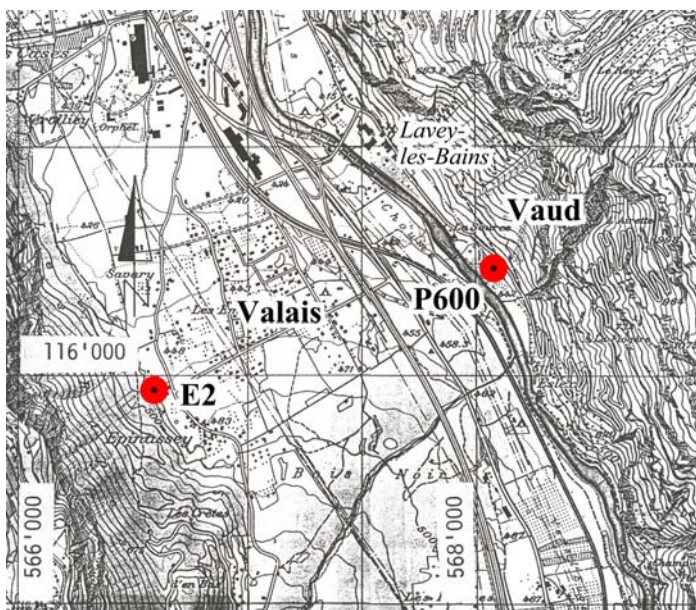


Figure 6 : Situation des forages P600 (Vaud) et E2 (Valais).

5.4 Débit d'exploitation et puissance thermique disponible

Sur la base du test de production (annexe 20), il est possible de prévoir les caractéristiques d'un pompage de longue durée avec une pompe installée à environ 95 m de profondeur. Les valeurs de débit et de température attendues pour la phase d'exploitation du puits P600 sont les suivantes : 1'300 l/min avec un rabattement de 75 m (niveau d'eau à -87 m) et une température de l'ordre de 69°C en tête de puits. Avec ces valeurs, la puissance thermique disponible est considérable et, pour une température de rejet de 5°C, atteint 5,8 MWth.

Une acidification du forage avec de faibles quantités d'acide (< 1 tonne) pourrait permettre d'augmenter la productivité au même niveau atteint lors des pompages effectués avant l'équipement du forage. Le cas échéant, il serait possible de disposer d'une puissance thermique de 7.0 MWth avec un débit d'exploitation de 1'500 l/min. Cette opération, dont le but serait de dissoudre les encroûtements de calcite qui colmatent partiellement les fissures aquifères, comporte certains risques à court terme (impact temporaire sur l'actuel puits de production P201, ouverture de fissures en relation directe avec la nappe phréatique froide). Pour cette raison, elle ne sera tentée que si un réel besoin d'énergie thermique supplémentaire s'avère nécessaire et après avoir évalué les risques et les avantages d'une telle opération.

6. POMPAGE DANS P600 AVANT MISE EN PRODUCTION (août 1999 – mars 2002)

6.1 Raisons de ce pompage

Le test de production réalisé en mai 1998 après l'équipement définitif du forage P600 a montré une baisse de la productivité par rapport aux résultats obtenus lors des pompages effectués en septembre - octobre 1997 à la fin des travaux de perforation, lorsque le forage n'était pas encore équipé (cf. chap. 5.3). En effet, pour un même rabattement, le débit d'exploitation maximum est passé de 1'500 l/min à 1'340 l/min. Les causes de cette perte de productivité ne sont pas claires. Il est possible que ce phénomène soit lié à un colmatage des fissures aquifères par précipitation de minéraux solubles à haute température en raison de la longue période d'inactivité du puits, et dans une moindre mesure, à l'effet de la cimentation du tubage.

Pour éviter une progression de ce phénomène, nous avons recommandé de maintenir en activité le forage avant la mise en production définitive. Pour cette raison, un pompage de longue durée a été planifié en attendant le raccordement du P600 à l'établissement thermal de Lavey-les-Bains.

Les objectifs de ce pompage étaient donc les suivants :

- Maintenir en activité le forage P600 en attendant la mise en exploitation définitive.
- Suivre l'évolution à long terme des paramètres hydrauliques (niveau d'eau, rabattement) et physico-chimiques (température et conductivité de l'eau pompée).
- Déterminer l'impact d'un pompage de longue durée au P600 sur l'ancien puits de production P201.

6.2 Installation mise en place et déroulement du pompage

En attendant l'achat d'une pompe immergée adéquate pour le P600, il a été décidé, dans le but de limiter au maximum les coûts du pompage, d'utiliser la pompe de réserve du P201 et la nouvelle colonne refoulante en acier INOX. La pompe immergée, qui permet de livrer un débit maximum de l'ordre de 650 l/min pour une hauteur de refoulement de 30 m, ne permet pas de tester le débit maximum d'exploitation du P600 (environ 1'300 l/min). Les principales caractéristiques du système de pompage mis en place sont résumées dans le tableau 5.

La chronologie de l'essai de pompage de longue durée est présentée dans le tableau 6. Il s'est déroulé sans interruptions du 18 août 1999 au 5 mars 2000, soit au total 200 jours et plus précisément 4'803 heures. La durée du pompage, prévue dans un premier temps sur 6 mois, a été prolongée de quelques semaines en attendant la pose des nouvelles conduites reliant le forage à l'établissement thermal. Au total, 197'728 m³ d'eau ont été pompés avec un débit moyen de 630 l/min.

Depuis le 24 janvier 2000, le pompage du P201 a été aussi mis en service avec un débit moyen de 360 l/min. On a donc pompé simultanément dans les deux puits pendant 40 jours.

Tableau 5 : Principales caractéristiques du système de pompage du P600 (pompage avant exploitation).

Type de pompe installée	GRUNDFOS SP 27-7-N (pompe de réserve du P201) Moteur spécial de 7.5 kW
Principales caractéristiques de la pompe	<ul style="list-style-type: none"> Longueur : 1.44 m ; Ø : 147 mm ; poids : 56 kg Puissance : 7.5 kW Débit nominal : 27 m³/h (450 l/min), $\Delta h^{(1)}$ = 52 m Débit max. : 600 l/min, $\Delta h^{(1)}$ = 30 m Exécution spéciale en acier V4A
Principales caractéristiques de la colonne de refoulement :	<ul style="list-style-type: none"> 8 tubes de 6.02 m de longueur Diamètre 4" (int. 100 / ext. 104 mm) Longueur totale : 48.16 m Raccords par brides, 6 boulons + 2 passages pour câbles électriques Diamètre des brides : 220 mm Exécution en acier INOX V4A
Longueur / profondeur ⁽²⁾ de :	
Flexible 1" (mesure niveau d'eau) :	48.5 m / 48.0 m
Colonne de refoulement :	48.2 m / 47.7 m
Aspiration pompe immergée :	49.1 m / 48.6 m
Fond installation pompage (base pompe) :	49.6 m / 49.1 m
Cote de référence nivelée :	431.75 m.s.m. (sommet dalle en béton cave P600)
Cote de référence flexible 1" :	432.42 m.s.m. (sommet tube flexible)

⁽¹⁾ Hauteur de refoulement

⁽²⁾ S'agissant d'un forage incliné, la longueur et la profondeur (distance verticale depuis le niveau du sol) sont différentes. Les valeurs de profondeur ont été calculées sur la base de mesures d'inclinaison du forage effectuées tous les 5 m environ entre 0 et -50 m, variant entre un minimum de 8° en surface et un maximum de 8.5° à -50 m.

Tableau 6 : Chronologie de l'essai de pompage de longue durée entrepris dans P600.

Date et heure Période	Travaux effectués	Remarques
26 – 28.7.1999	Installation pompe P600	
29.7 – 18.8.1999	Mesures du niveau d'eau au repos	Le démarrage du pompage, prévu pour le 7 août 1999, a dû être repoussé en raison d'une inondation dans le puits P201
18.8.1999 à 10 h	Démarré pompage dans P600	Le puits P201 est au repos. Suivi de l'abaissement du niveau d'eau dans P600 et P201 jusqu'à 20 h
24.1.2000 à 11 h	Démarré pompage dans P201	Problèmes avec le variateur de fréquence du P201. Arrêté et redémarré la pompe à plusieurs reprises. Suivi de l'abaissement du niveau d'eau dans P600 et P201 jusqu'à 16 h
22.2.2000 à 14 h	Arrêt pompage dans P201	Branché variateur de fréquence. Redémarré pompe le 23.2.00 à 11 h
24.2.2000 à 9 h	Arrêt pompage dans P201	Installation vanne nouvelle conduite. Redémarré pompe le 28.2.00 à 13 h
5.3.2000 à 13 h	Arrêt pompage dans P600	Début travaux pose nouvelle conduite. Suivi de la remontée du niveau d'eau jusqu'à 14 h, ensuite dépose de la pompe
6 – 30.3.2000	Pose nouvelles conduites	L'exploitation du P600 a démarré le 30 mars 2000 à 16 h

6.3 Résultats

L'évolution des paramètres mesurés est présentée sous forme de graphiques à l'annexe 21. Les principaux résultats de l'essai de pompage de longue durée sont synthétisés dans le tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Synthèse des résultats du pompage de longue durée dans P600.

	Paramètre	Max	Min	Final ¹
P600	Débit (l/min)	655	0	620
	Niveau (m) ²	-29.28	-7.53	-29.21
	Rabatement (m)	21.81	0	21.73
	Température eau (°C)	70.0	60.9	68.2
	Conductivité eau (µS/cm)	2'580	2'000	2'010
P201	Débit (l/min)	460	0	350
	Niveau (m) ³	-33.90	-0.91	-17.62
	Rabatement (m)	32.70	0	16.44
	Température eau (°C)	60.0	58.0	59.8
	Conductivité eau (µS/cm)	1'764	1'350	1'681

¹ Mesures juste avant l'arrêt du pompage dans P600

² Par rapport à la cote de référence du P600 (431.75 m.s.m.)

³ Par rapport à la cote de référence du P201 (422.30 m.s.m.)

Niveaux d'eau et rabattements

P600 Le niveau d'eau au repos dans P600 se situait à -7.7 m (18.8.99). Le niveau a rapidement baissé au cours des premières heures de pompage jusqu'à -25.1 m. Du 18 août 1999 jusqu'au 24 janvier 2000, cette descente s'est poursuivie lentement et le niveau a atteint -27.6 m, juste avant le démarrage de la pompe dans le P201. L'exploitation de l'ancien puits de production a provoqué un abaissement supplémentaire de 1.6 m et le niveau a finalement atteint -29.3 m juste avant l'arrêt de la pompe dans P600, le 5 mars 2000. Le niveau est alors rapidement remonté, pour se stabiliser à environ -9.8 m deux semaines après la fin du pompage dans le P600. Le rabattement dans le P600 sans l'influence du pompage dans le P201 est de l'ordre de 20 m pour un débit de 620 l/min.

P201 Le niveau d'eau au repos dans P201, se situait à -1.2 m juste avant le démarrage du pompage dans P600 (18.8.99). Durant le pompage dans P600, il a baissé de manière régulière pour atteindre -5.4 m avant l'enclenchement de la pompe du P201 (24.1.00). En raison de ce pompage, on a observé un abaissement rapide dans les premières heures avec une stabilisation du niveau d'eau vers -17.6 m juste avant l'arrêt du pompage dans P600. Le rabattement dans P201 est de 16.4 m pour un débit de 350 l/min

Température de l'eau

P600 Au début du pompage, la température de l'eau a rapidement augmenté pour atteindre 60.9°C après 10 minutes et un maximum de 70.0°C après 6 heures de pompage. Durant la première semaine de pompage, l'eau s'est refroidie d'environ 0.1°C par jour et a atteint ainsi 69.3°C le 25 août 1999. Ce phénomène avait déjà été observé lors du test de production. Par la suite, la température a encore progressivement baissé, mais de manière beaucoup plus lente, pour finalement se stabiliser à 68.2°C après 6 mois de pompage. Cette température est inférieure de 0.5°C à celle mesurée à la fin du test de production (68.7°C). Il ne faut toutefois pas oublier que la température de l'eau du P600 est directement proportionnelle au débit d'exploitation : plus celui-ci sera élevé et plus la température sera haute.

P201 La température de l'eau a progressivement augmenté pour atteindre un maximum de 60.0 °C après un mois de pompage dans ce puits. Cette valeur confirme ainsi la baisse observée déjà par les mesures effectuées lors du test de production. On rappellera que la température de l'eau du P201 avant la perforation du P600 et les tests de pompage était de 61.6°C. La tendance à la baisse suite à la mise en exploitation du P600 se trouve ainsi confirmée.

Conductivité électrique de l'eau

P600 Durant les trois premiers mois du pompage, on a observé une allure en dents de scie des valeurs de conductivité de l'eau, qui ont varié entre 2'020 et 2'580 $\mu\text{S/cm}$. Ces variations sont probablement à mettre en relation avec la mobilisation d'eaux plus minéralisées, reliques des fluides de forage salés utilisés lors de la perforation. Depuis le mois de décembre 1999, on a par contre observé une stabilisation avec des valeurs de l'ordre de 2'000 $\mu\text{S/cm}$. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles mesurées lors du test de production (1'900 $\mu\text{S/cm}$).

P201 La conductivité de l'eau du P201 a progressivement augmenté pour atteindre des valeurs de l'ordre de 1'700 $\mu\text{S/cm}$. La forte baisse de conductivité constatée lors du test de production de 1998 (valeurs minimales de l'ordre de 1'470 $\mu\text{S/cm}$) n'a pas été observée.

Productivité du forage P600

Avec un rabattement de 20 m pour un débit de 620 l/min, on se trouve parfaitement sur la courbe caractéristique du puits établie lors du test de production (annexe 20). La productivité du P600 est donc restée inchangée depuis juin 1998.

Impact sur l'ancien forage de production P201

L'impact d'un pompage de longue durée dans le forage P600 avec un débit de l'ordre de 600 l/min sur l'ancien puits de production P201 peut se résumer ainsi (comparaison avec les valeurs mesurées avant la réalisation du P600) :

- rabattement supplémentaire du niveau d'eau de l'ordre de 4 m;
- baisse de la température de l'ordre de 1.0 à 1.5 °C;
- baisse de la conductivité de l'ordre de 100 – 150 $\mu\text{S/cm}$.

Par contre, l'impact d'un pompage de longue durée dans P201 avec un débit de l'ordre de 350 l/min sur le puits P600 est nettement moins important : à part un rabattement supplémentaire de l'ordre de 1.5 m, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau du P600 ne montrent pas de modifications significatives.

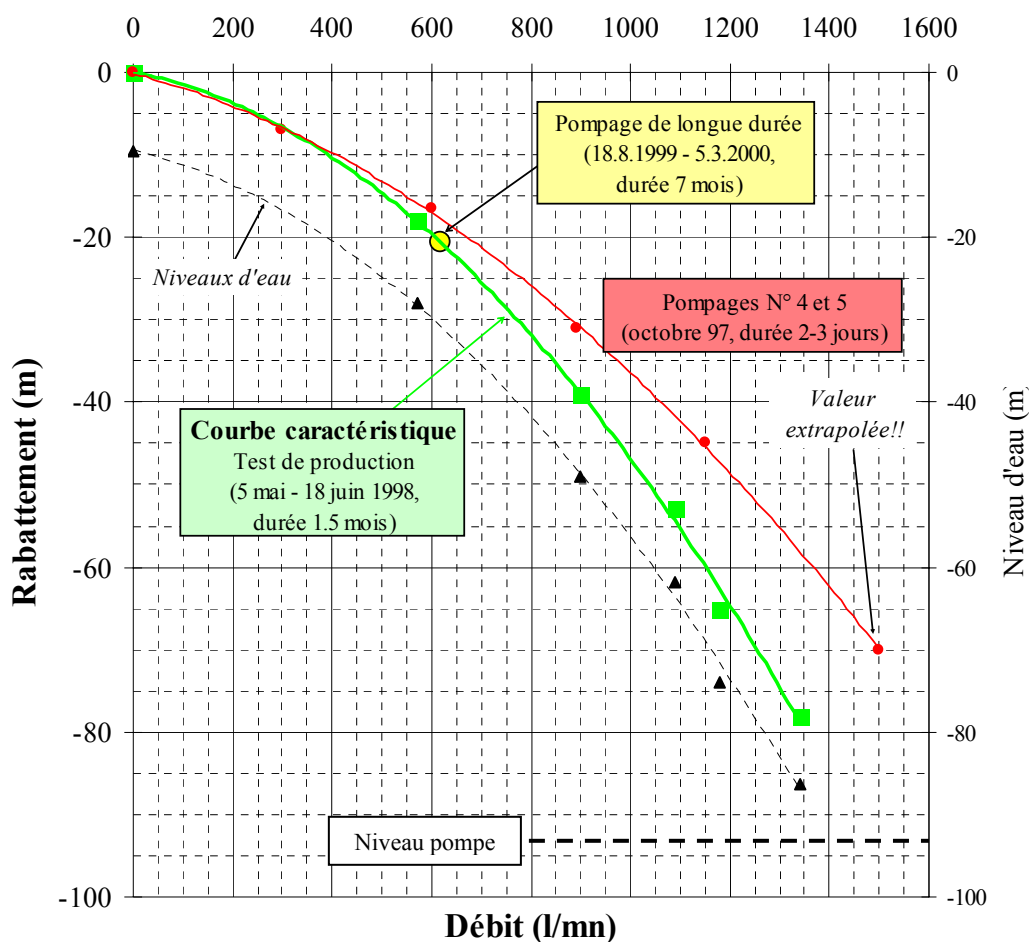


Figure 7 : Courbe caractéristique du puits P600 établie lors du test de production de mai-juin 1998, comparée à celles des pompages N° 4 et 5 effectués avant l'équipement du forage.

7. MISE EN EXPLOITATION DES Puits GEOTHERMIQUES P201 ET P600 (dès mars 2000)

Vu les résultats favorables du test de production et du pompage de longue durée, la société nouvellement créée Chaleur des Eaux Souterraines de Lavey S.A. (CESLA S.A.) a décidé de raccorder les puits de pompage P600 et P201 à l'établissement thermal.

L'organisation des travaux était la suivante :

Maître de l'ouvrage :	CESLA S.A., Lavey-Village
Direction des travaux :	Bureau BSI S.A., Olivier Graf, ingénieur, Lausanne
Génie civil, fouilles :	Consortium Cadosch S.A. & Echenard S.A., BEX
Fourniture et pose conduite à distance :	BRUGG ROHR SYSTEM A.G., Kleindöttingen
Appareillage, hydraulique :	ASA, Collombey-Muraz
Alimentation électrique + alarmes :	ESTELEC, Aigle

7.1 Utilisateurs de l'énergie géothermique

Les principaux utilisateurs de l'énergie géothermique fournie par les puits P600 et P201 sont :

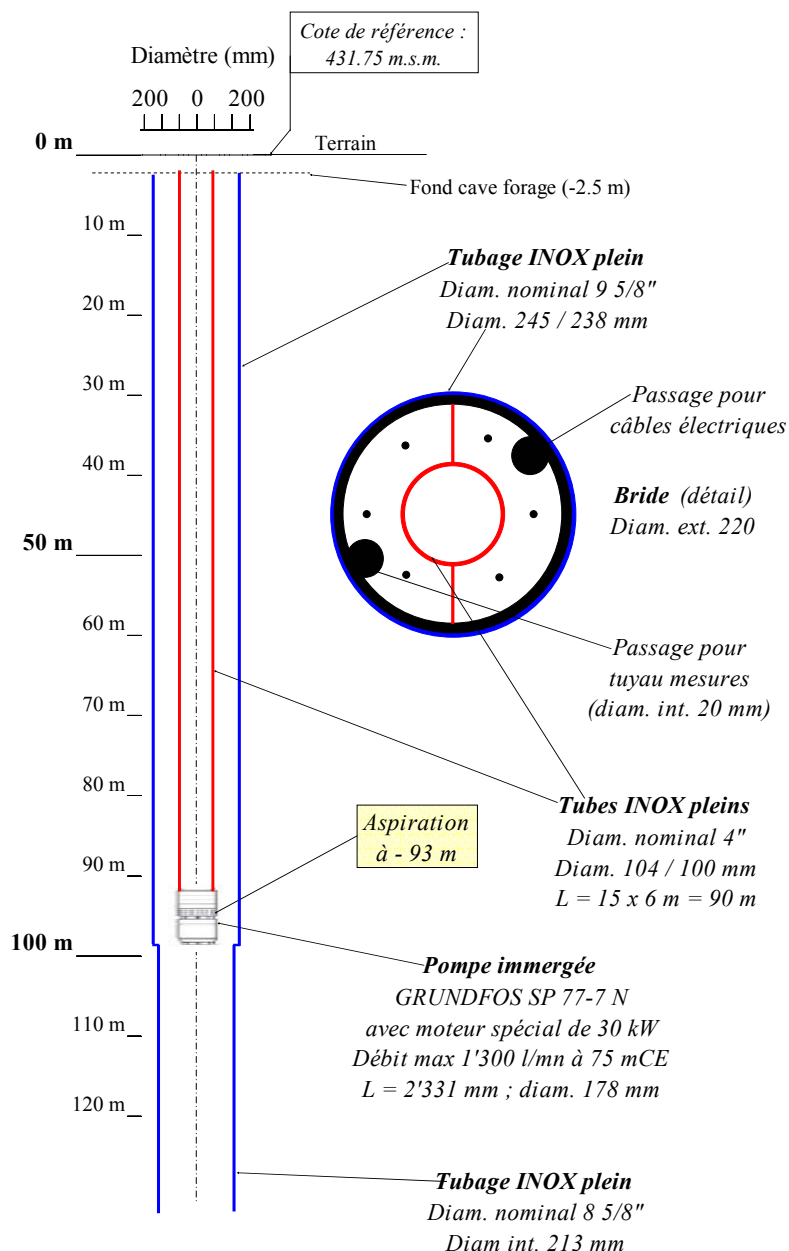
- l'établissement thermal des Bains de Lavey S.A.;
- le Centre médical de Lavey-les-Bains.

L'eau thermique pompée et acheminée jusqu'à ces deux complexes assure la couverture de la quasi totalité de l'énergie nécessaire aux bâtiments pour les besoins de chauffage, ventilation, production d'eau chaude sanitaire ainsi qu'évidemment le réchauffement de l'ensemble de l'eau des bassins intérieurs et extérieurs et le remplissage des différentes piscines.

7.2 Puits de pompage exploités

Les principales caractéristiques des deux puits géothermiques exploités à Lavey-les-Bains sont présentées dans le tableau 8. Le schéma de la chambre de pompage du puits P600 est représenté à la figure 8. Pour le puits P201, le log géologique et technique, ainsi que le schéma de la chambre de pompage se trouvent aux annexes 22 et 23.

Figure 8 : Détail de la chambre de pompage et de l'emplacement de la pompe immergée dans le forage P600.



7.3 Systèmes de pompage

En mars 2000, il a été procédé à l'installation des pompes immergées dans le P201 et le P600 et à la pose des conduites de transport de l'eau thermique jusqu'aux Bains. L'eau du P201 est acheminée avec une conduite isolée en PE DN 100 mm longue 620 m, alors que pour le P600 on a deux conduites du même type d'une longueur de 870 m (annexe 24). Les caractéristiques des systèmes de pompages sont présentées dans le tableau 9.

Tableau 8 : Principales caractéristiques des puits géothermiques de Lavey-les-Bains

Puits (date de réalisation)	P600 (1997)	P201 (1972)
Longueur / profondeur	595 m / 517 m	201 m / 201 m
Quaternaire / gneiss	de 0 à 43 m / de 43 à 595 m	de 0 à 15 m / de 15 à 201 m
Équipement (diam. intérieur)	0–98 m : tp Inox (238 mm) 98–254 m : tp Inox (213 mm) 254–595 m : trou nu (200 mm)	0–5 m : tp Hagusta* (200 mm) 15–130 m : tp Hagusta (175 mm) 130–195 m : cr Hagusta (175 mm) 195–201 m : tp Hagusta (175 mm)
tp = tube plein cr = crépine		
Zone cimentée / zone drainante	de 0 à 254 m / de 254 à 595 m	de 0 à 130 m / de 130 à 201 m
Débit d'exploitation (rabattement)	1'200 l/min (65 m)	450 l/min (26 m)
Débit avec rabattement de 30 m	770 l/min	500 l/min
Temp. eau (pompage simultané)	66 °C en 2002	59 °C en 2002

* Hagusta : tubage en acier noir recouvert d'une pellicule de matière plastique

Depuis le 30 mars 2000, le puits P600 a été mis en service avec un débit qui a été limité à 800 l/min jusqu'en novembre 2000. Dès le 14 avril 2000 l'eau pompée a commencé à alimenter les Bains Lavey SA et le Centre médical. Le débit de l'autre puits de pompage P201 a été réglé à 380 l/min.

Tableau 9 : Principales caractéristiques des systèmes de pompage mis en place dans les puits P600 et P201 (phase d'exploitation).

Forage	P600	P201
Pompe immergée	GRUNDFOS 8", type SP 77-7 N ⁽¹⁾	GRUNDFOS 6", type SP 30-6 N ⁽¹⁾
Longueur / diamètre / poids	2.33 m / 178 mm / 115 kg	1.56 m / 142 mm / 39 kg
Puissance moteur ⁽²⁾	30 kW	7.5 kW
Débit nominal / Hauteur refoulem.	77 m ³ /h (1'280 l/min) / 83 m	30 m ³ /h (500 l/min) / 45 m
Débit max. / Hauteur refoulem	1'600 l/min / 58 m	590 l/min / 32 m
Profondeur aspiration	93 m	50 m
Colonne de refoulement	15 tubes INOX ⁽³⁾ de 6.02 m	11 tubes Hagusta ⁽⁴⁾ de 4.0 m + 2 m
Raccords	Brides diam. 220 mm, 6 boulons	Tubes vissés (tulipage)
Diamètre colonne	4" (int. 100 / ext. 104 mm)	3" (int. 75 / ext. 85 mm)

⁽¹⁾ Exécution spéciale en acier 1.4401

⁽²⁾ Moteur surdimensionné en raison de la température élevée de l'eau thermique.

⁽³⁾ INOX type V4A.

⁽⁴⁾ Hagusta : tubage en acier noir recouvert d'une pellicule de matière plastique

7.4 Transport de l'eau thermique, alimentation électrique et système hydraulique

Les puits de pompage P201 et P600 se situent à 620 m, respectivement à 870 m de l'établissement thermal. L'eau pompée est acheminée par des conduites de chauffage à distance flexibles et isolées en polyéthylène réticulé (PE-X), protégées par un revêtement en polyéthylène à basse densité (PE-LD). Les raccords entre tronçons de conduite ont été choisis en fonction du chimisme particulier de l'eau thermique pour se comporter de manière neutre. Ils sont en acier inoxydable. Une conduite de diamètre DN100 est affectée au puits P201 et deux conduites DN100 sont affectées au puits P600 (annexe 24). Le choix de ce type de conduite a été déterminé par le chimisme de l'eau (qualité alimentaire requise), par la facilité de mise en œuvre et également par leur coût raisonnable. La mise en place des conduites a pu se faire en quatre étapes seulement car celles-ci peuvent être livrées en segments d'un seul tenant de 270 mètres que l'on déroule par treuillage directement sur le lit de sable dans la fouille.

Le schéma technique de l'alimentation électrique, du système hydraulique et des commandes est présenté à la figure 9. L'introduction dans la centrale technique des Bains de Lavey SA thermal comporte deux vannes motorisées d'entrée, deux thermomètres digitaux de contrôle et deux compteurs volumétriques d'eau chaude de manière à permettre la facturation séparée de l'eau thermique des deux puits. Les vannes d'entrée sont pilotées par la régulation numérique interne du centre thermal des Bains de Lavey SA en fonction de leurs besoins.

Toutes ces réalisations ont fait l'objet d'une participation au financement de la part de l'Office fédéral de l'Énergie (projet pilote) et de diverses instances cantonales.

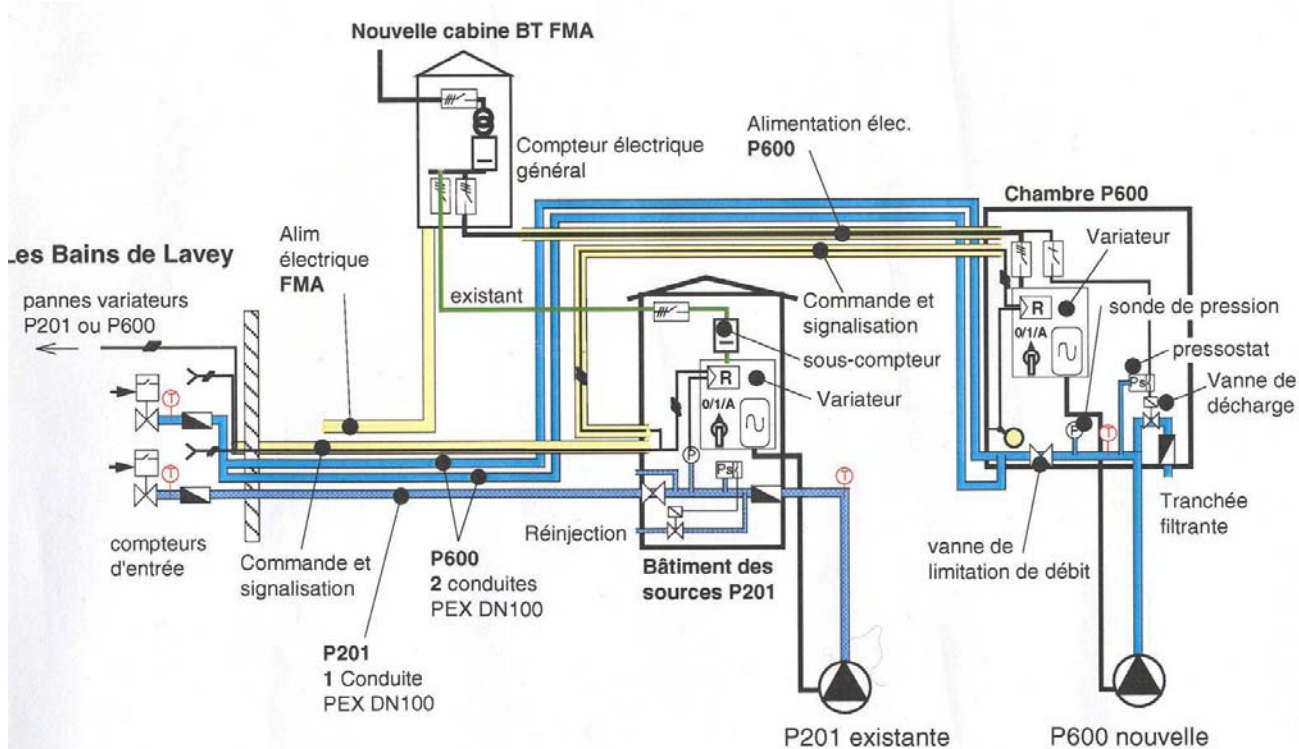


Figure 9 : Alimentation électrique et commande des équipement de pompage de l'eau thermique (schéma fourni par BSI S.A.)

8. GESTION DES POMPAGES, FOURNITURE D'EAU ET CONSOMMATION ELECTRIQUE

8.1 Gestion des pompages

Chaque puits est équipé d'une pompe immergée dont le moteur électrique a été volontairement surdimensionné pour limiter au maximum l'échauffement par effet Joule à cause de la température élevée de l'eau thermique (tableau 9). Tous les éléments des pompes ainsi que les colonnes de refoulement sont en acier inoxydable, à l'exception de la colonne installée dans le forage P201, de type HAGUSTA (acier noir revêtu d'une pellicule de matière plastique).

La gestion des pompes immergées est basée sur le principe d'un maintien de la pression constante en tête de puits à 1.0 bar environ par réglage de la vitesse. Lors de faible demande, la pompe atteint sa vitesse minimale et la pression augmente en tête de puits jusqu'à la valeur d'enclenchement d'un pressostat à 3 bar (figure 10). Ce dernier provoque l'ouverture d'une vanne de décharge qui limite la pression en tête de puits à 2 bar environ. Lorsque la demande en eau thermique augmente, la pression chute en dessous de la valeur de déclenchement du pressostat, de 0.7 bar, qui referme la vanne de décharge.

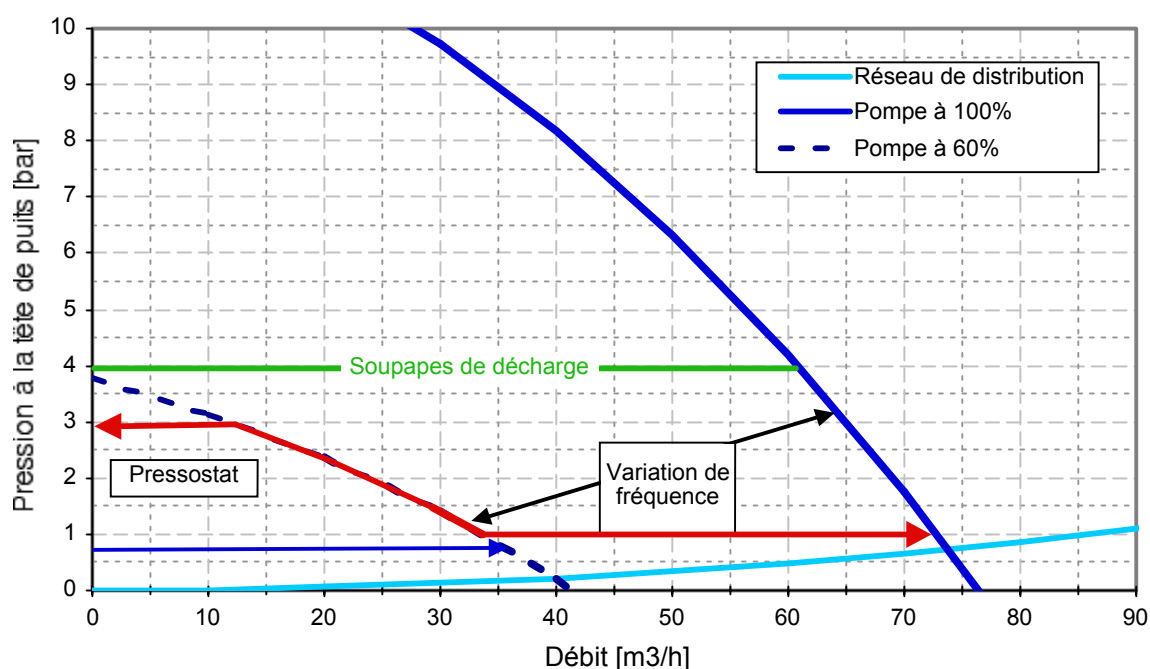


Figure 10 : Puits P600 : principe de réglage de la pression en tête de puits (graphique fourni par BSI S.A.)

Pour le puits P600, compte tenu de la pression élevée délivrée par la pompe à faible débit, une protection supplémentaire par soupapes mécaniques a été mise en œuvre de manière à protéger les conduites. Le débit d'exploitation maximal et continu du forage P600 est d'environ 1'200 l/min et celui du puits P201 d'environ 450 l/min. Depuis décembre 2001, les deux installations de pompage sont équipées d'une transmission d'alarme vers l'Usine électrique de Lavey, propriété des Services Industriels de Lausanne, qui dispose d'un service de piquet et qui a été mandatée pour cette surveillance par CESLA SA. Les exploitants des Bains de Lavey disposent ainsi d'une eau thermique de qualité exceptionnelle dont la fourniture est assurée en tout temps.

Chacune des pompes immergées installées dans les puits P600 et P201 est alimentée par le biais d'un convertisseur statique de fréquence (variateur) de manière à pouvoir faire varier leur vitesse de rotation entre 30 et 50 Hz. Il est ainsi possible de gérer les variations de débit (selon les besoins des Bains de Lavey SA), en minimisant la consommation électrique. Lorsque les vannes des Bains sont complètement fermées, un débit de fuite (50 l/min pour le P201 et 300 l/min pour le P600) permet de maintenir les pompes en activité. Ainsi, les deux pompes fonctionnent en continu pour éviter une usure accrue par des enclenchements/déclenchements répétés, ce qui permet d'augmenter leur durée de vie.

Les eaux du puits P201 ont été rejetées au Rhône jusqu'au 15 mars 2002. Depuis, la conduite de refoulement a été raccordée à un forage profond 170 m situé à proximité (P12). L'eau thermique refoulée lors de la fermeture des vannes des Bains de Lavey SA est ainsi rejetée dans l'aquifère thermal profond. Par contre, faute de disposer d'un forage profond permettant d'absorber le débit de fuite du P600, ses eaux sont infiltrées dans les terrains meubles du Quaternaire par la tranchée drainante utilisée pendant les essais de pompage lors de la perforation. Celle-ci avait été remblayée et équipée de drains. Depuis le 26 septembre 2002, l'eau auparavant refoulée par le P600 est fournie aux Bains de Lavey à un tarif préférentiel : il n'y a donc plus aucun rejet de cette eau à 66°C dans le terrain.

La mise en service des forages P201 et P600 a eu lieu le 30 mars 2000, un mois avant l'ouverture officielle des Bains. Le débit du P600 a été limité à 800 l/min, étant donné la difficulté de mesurer le niveau d'eau au-delà de 50-60 m de profondeur (cf. chap. 9.2.1).

8.2 Fourniture d'eau thermique

Les mesures dont nous disposons couvrent la période mars 2000 – décembre 2002. En 2000, les puits n'ont fonctionné que 9 mois et n'ont pas été exploités au maximum de leur productivité, le bassin principal des Bains de Lavey n'étant opérationnel que depuis juillet 2000. L'année 2001 est à considérer comme une période test, au cours de laquelle différentes modifications ont été apportées au système hydraulique pour optimiser la consommation d'eau thermique et d'électricité à fournir pour les pompes. L'année 2002, durant laquelle les pompes ont fonctionné de manière ininterrompue, peut être considérée comme une période représentative de l'exploitation à long terme des puits géothermiques de Lavey-les-Bains. Une statistique des fournitures et rejets d'eau thermique est présentée dans le tableau 10, à la figure 11 et dans les annexes 25 à 27.

Tableau 10 : Débits moyens annuels du pompage, de la fourniture d'eau thermique aux Bains et des rejets pour les années 2000 à 2002. En 2000, les puits n'ont fonctionné que depuis le 30 mars.

	Année 2000		Année 2001		Année 2002	
	P600	P201	P600	P201	P600	P201
Fonctionnement pompes	276 jours	261 jours	362 jours	304 jours	365 jours	365 jours
Débit moyen annuel pompes	561 l/min	360 l/min	809 l/min	340 l/min	634 l/min	467 l/min
Débit moyen annuel fournitures	356 l/min	319 l/min	679 l/min	325 l/min	500 l/min	466 l/min
Débit moyen annuel rejets	205 l/min	41 l/min	130 l/min	15 l/min	134 l/min	<1 l/min

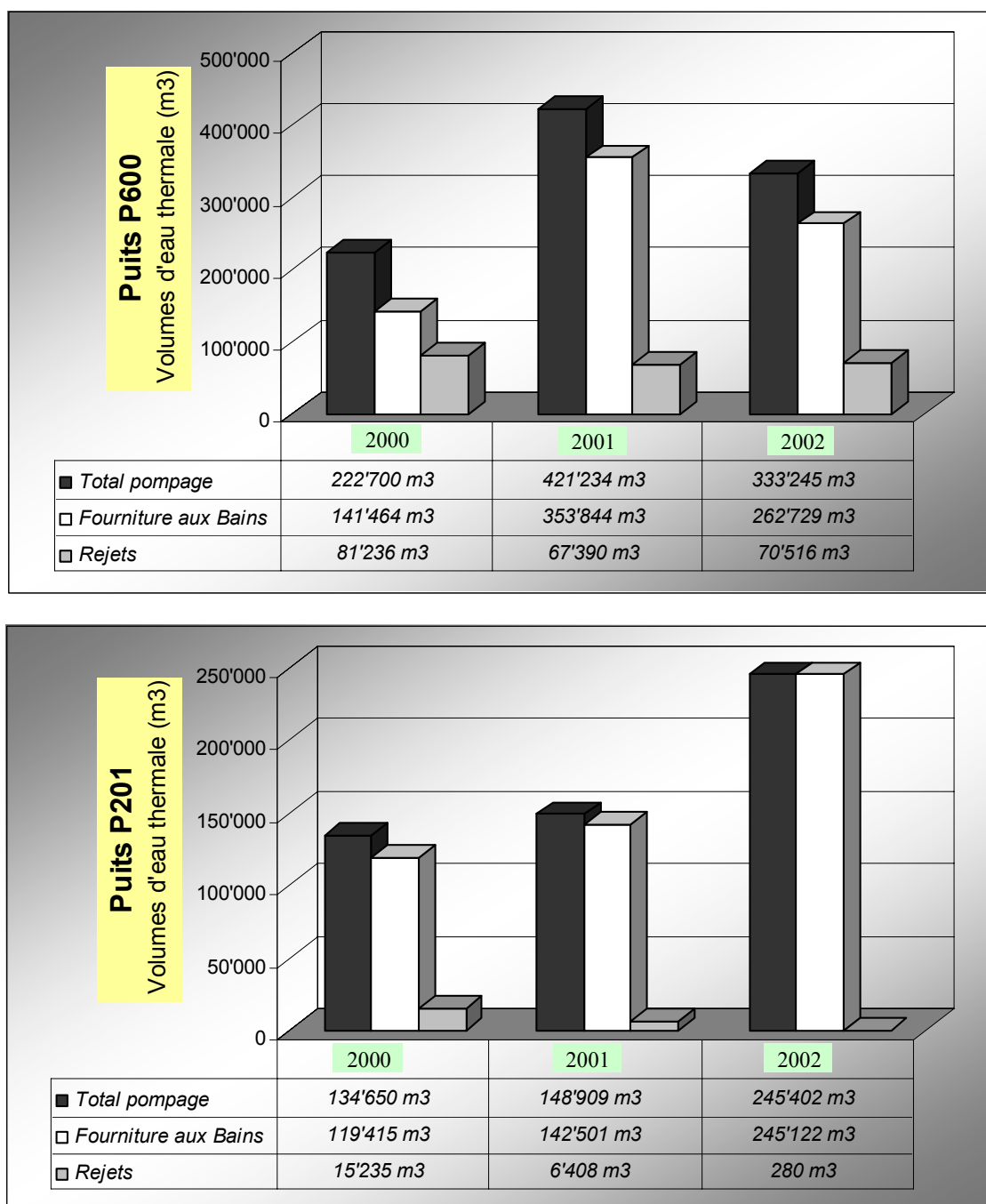


Figure 11 : Volumes d'eau thermique pompée, fournie aux Bains et rejetée durant les années 2000 à 2002. En 2000, les puits n'ont fonctionné que durant 9 mois.

Le volume total d'eau thermique pompée par les deux puits est passé d' ~357'000 m³ en 2000 à ~570'000 m³ en 2001. Il semble que le volume de croisière soit atteint, car en 2002 la quantité d'eau est sensiblement la même (~579'000 m³). Les rejets cumulés ont progressivement diminué d' ~96'000 m³ en 2000 à ~71'000 m³ en 2002. C'est principalement le P201 qui a contribué à cette diminution, la quantité d'eau rejetée passant d' ~15'000 m³ en 2000 à 280 m³ en 2002! Pour 2003, on prévoit encore une forte baisse des rejets, étant donné l'arrêt des rejets d'eau du P600 dans le terrain depuis le 26 septembre 2002.

Exprimé en débit moyen annuel, l'eau thermique pompée par les deux puits est passée d' ~920 l/min en 2000 à ~1'150 l/min en 2001. Pour 2002, cette dernière valeur se confirme (~1'100 l/min). Pour le puits P600, le débit moyen annuel soutiré a été d' ~350 l/min en 2000, ~680 l/min en 2001 et ~500 l/min en 2002. Pour le P201, les valeurs ont augmenté de 360 l/min en 2000 à ~470 l/min en 2002 (tableau 10).

L'évolution des débits moyens fournis aux Bains montre pour le puits P600 des variations saisonnières : le maximum de la demande coïncide logiquement avec les mois les plus froids (figure 12). Quant au P201, depuis fin 2001 le débit fourni est très constant et indépendant des saisons. On remarque qu'il n'y a plus aucun rejet d'eau du P201 depuis octobre 2001, alors que pour le puits P600 les déversements ont cessé en octobre 2002.

Au registre des interruptions de pompage, il n'y en a eu aucune pour le P600, ce qui démontre la fiabilité des installations et le parfait dimensionnement de la partie hydraulique. Par contre, le variateur de fréquence et la pompe du P201 sont tombés en panne le 25 novembre 2000. La pompe défectueuse, de type GRUNDFOS SP 27-9 a été remplacée en l'espace de quelques jours avec la pompe de réserve de type GRUNDFOS SP27-7, moins puissante. On a profité de cette occasion pour placer la pompe à une plus grande profondeur (45 m). L'origine de la panne est probablement à mettre en compte au mauvais fonctionnement du variateur de fréquence, qui a depuis été réglé différemment. Du 5 octobre au 12 novembre 2001 le pompage du P201 a été arrêté en raison de fuites à une vanne du système hydraulique en place depuis 1973. Pour permettre le remplacement et la simplification de cet ancien système par de nouvelles conduites et vannes, le pompage a été de nouveau arrêté du 29 novembre au 14 décembre 2001. Depuis, le pompage du P201 a fonctionné de manière ininterrompue.

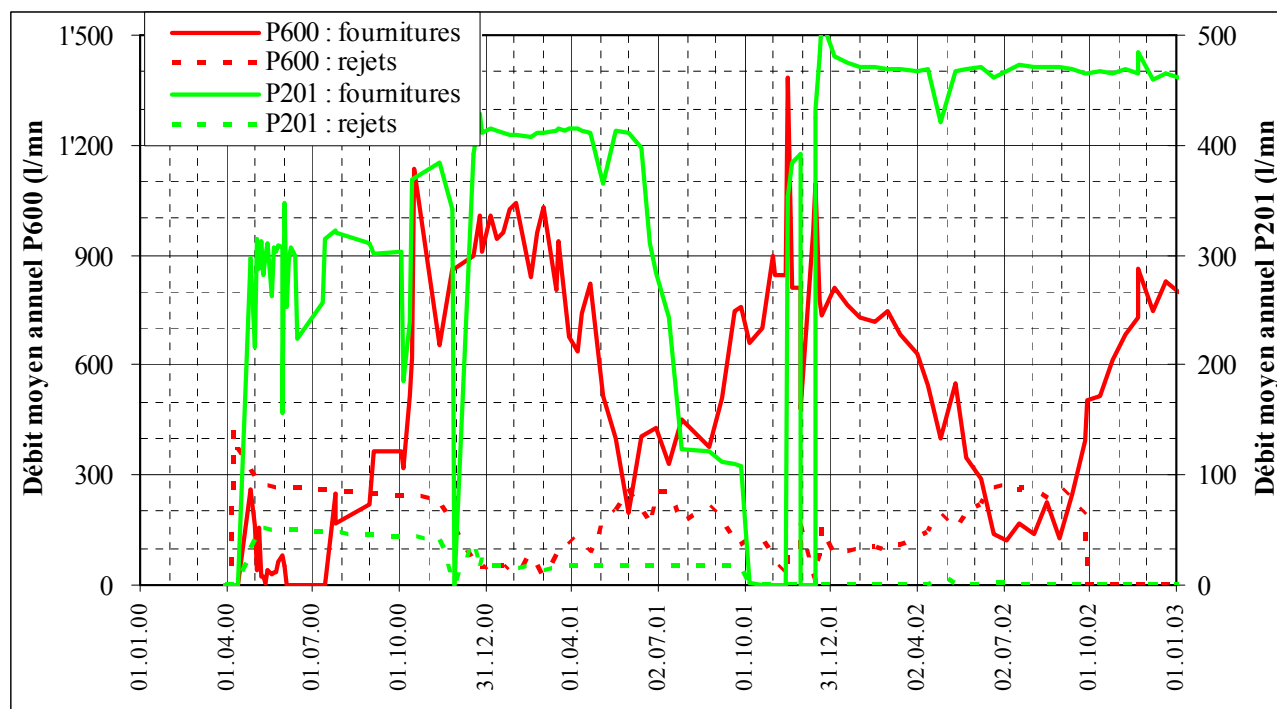


Figure 12 : Evolution des débits moyens d'eau thermique fournie aux Bains et rejetée (2000 – 2002).

8.3 Consommation électrique des pompes immergées

Les pompes immergées sont alimentées depuis une station transformatrice située à proximité du Bâtiment des Sources, près du forage P201. Un compteur permet de connaître la consommation globale d'électricité et un sous-comptage fournit la part consommée par la pompe du puits P201. La consommation électrique de chaque pompe peut être aussi relevée au niveau du tableau des variateurs de fréquence.

Pour le puits P201, on remarque le fonctionnement en continu et à plein régime de la pompe immergée, à part lors des travaux de rénovation des conduites réalisés en fin d'année 2001 (annexe 28). La consommation a progressivement augmenté de 52'720 kWh/an en 2000 à 62'189 kWh/an en 2002 (figure 13). Toutefois, cette augmentation est toute relative, si l'on considère qu'en 2000 la pompe n'a tourné que durant 260 jours, alors qu'en 2002 la durée de fonctionnement a été de 365 jours (annexe 27). On voit alors que la consommation journalière moyenne a en effet progressivement diminué, passant de 203 kWh en 2000 à 198 kWh en 2001, pour terminer à seulement 170 kWh en 2002. L'énergie électrique est récupérée sous forme de chaleur dans l'eau thermique et représente par exemple pour 2001 une élévation moyenne de la température de 0.35 K.

La consommation liée à la pompe installée dans P600 est beaucoup plus modulée (annexe 28). Le variateur de fréquence permet ainsi de réduire de plus de moitié la consommation pendant les périodes de faible demande. Le maximum d'énergie a été consommé en 2001, avec 125'742 kWh/an ou 14.5 kW (figure 13). L'élévation de température correspondante de l'eau thermique est ainsi de 0.26 K. Si l'on considère la consommation journalière moyenne, celle-ci a été de 208 kWh en 2000, de 348 kWh en 2001 et de 269 kWh en 2002.

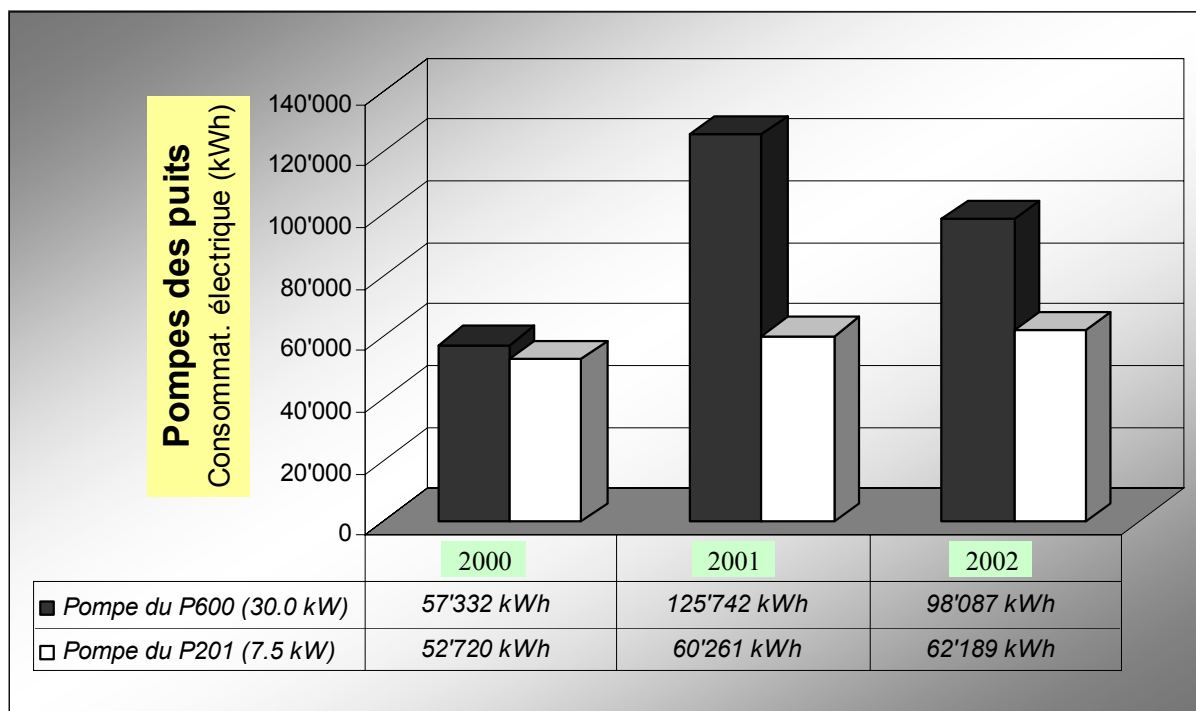


Figure 13 : Consommation électrique des pompes immergées installées dans les puits géothermiques durant les années 2000 à 2002. En 2000, les puits n'ont fonctionné que depuis le 30 mars.

La consommation spécifique de la pompe du P201 pour les années 2000 et 2001 est de l'ordre de 0.40 kWh par m³ d'eau pompée, alors que celle de la pompe du P600 est, pour les mêmes années, bien plus faible, de 0.26 kWh par m³ en 2000 et de 0.30 kWh par m³ en 2001 (annexes 26 et 27). La consommation spécifique indique donc que, malgré une hauteur de refoulement plus faible et une moindre puissance, la pompe du P201 consomme plus que celle du P600. Ceci indique que le point de fonctionnement de la pompe du P600 correspond à un rendement beaucoup plus élevé que celui de la pompe du P201. Les travaux d'assainissement engagés à fin 2001 sur les équipements de régulation et sur la simplification des équipements du puits P201 ont permis depuis d'obtenir une diminution de la consommation spécifique, qui n'est plus que de 0.25 kWh par m³ en 2002.

9. SUIVI DES PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES

9.1 Réseau de surveillance et paramètres mesurés

Pour la période avril - novembre 2000, on ne dispose que d'une dizaine de mesures de contrôle. Depuis décembre 2000, un réseau de surveillance des principaux paramètres physico chimiques et hydrauliques a été mis en place. Les mesures sont régulièrement effectuées deux fois par mois par le personnel de l'Usine hydroélectrique de Lavey, mandaté par CESLA S.A. Les données relevées sont transmises au bureau ALPGEO à Sierre pour être saisies dans une banque de données. Tous les paramètres sont représentés ensuite sous forme graphique pour en suivre l'évolution dans le temps. Les paramètres suivants sont contrôlés pour chacun des puits :

- **Débits de pompage, de rejet et fournis aux Bains** : volume total et débit instantané (compteurs à ailettes);
- **Niveaux d'eau** : mesures manuelles avec sonde de niveau;
- **Températures de l'eau** : lecture de sondes digitales pt100 situées en tête de puits et à l'entrée des Bains. Un acquisateur automatique de données de type MADD enregistre aussi la température de l'eau en tête du P600, avec un pas de temps de 3 heures. Des mesures de calage manuelles avec un thermomètre-conductivimètre digital de type WTW sont effectuées trimestriellement par le géologue;
- **Conductivités électriques de l'eau** : mesures manuelles avec un thermomètre-conductivimètre digital de type WTW effectuées trimestriellement par le géologue. Les valeurs mesurées sont corrigées à 20°C.

Etant donnée l'évolution à la baisse des températures de l'eau thermale, depuis janvier 2002 ce paramètre est relevé chaque semaine. Afin de mieux suivre l'évolution des conductivités électriques de l'eau thermale, on prévoit aussi de prélever chaque semaine un échantillon d'eau de chacun des puits à partir de janvier 2003. Il sera possible alors de mesurer en laboratoire ce paramètre pour vérifier s'il y a une baisse généralisée de la minéralisation des eaux exploitées.

Une statistique des valeurs mesurées durant la période avril 2000 à décembre 2002 est présentée dans les annexes 26 et 27. Les valeurs maximales et minimales des différents paramètres pour cette période sont indiquées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Statistiques des mesures des différents paramètres hydrauliques et physico-chimiques pour la période de avril 2000 à décembre 2002.

	Puits P600		Puits P201	
	Max	Min	Max	Min
Débit de pompage (l/min)	1'240	0	500	0
Niveau d'eau (m)	-65.4	-9.8	-38.1	-2.3
Rabattement (m)	57.7	7.9	36.8	1.0
Débit spécifique (l/min par m de rabattement)	41	11	27	13
Tempér. eau en tête de puits (°C), WTW	68.3	65.0	60.6	56.9
Tempér. eau en tête de puits (°C), sonde ⁽¹⁾	66.6	64.6	59.8	56.3
Tempér. eau entrée des Bains (°C), sonde ⁽¹⁾	66.2	62.2	58.3	55.0
Conductiv. de l'eau en tête de puits (µS/cm)	2'060	1'599	1'789	1'205

⁽¹⁾ Mesures seulement en 2001 et 2002

9.2 Débits et niveaux d'eau

9.2.1 Puits de pompage P600

Les **débits** varient en fonction de la demande des Bains. Le débit minimum, fixé au début de l'exploitation en fonction de la puissance de la pompe immergée, est de l'ordre de 300 l/min. Ce débit est normalement celui utilisé durant l'été (figure 14 et annexe 31). De avril à octobre 2000, le débit maximum a été bridé à 820 l/min, étant donné la difficulté de contrôler exactement le niveau d'eau avec une sonde conventionnelle. En effet, lorsque le niveau d'eau se situe au-delà de 50 m, en raison de la longueur et de la température élevée, le câble plat adhère au tube en plastique installé pour les mesures et il y a risque de le coincer, en empêchant ainsi toute possibilité de contrôle. Depuis novembre 2000, ce problème a été résolu en achetant une sonde de niveau avec câble rond. Le débit maximum a été alors progressivement porté à 1'000 l/min dans un premier temps et jusqu'à 1'240 l/min ensuite.

Les **niveaux d'eau** n'ont jamais dépassé la profondeur de 70 m, même avec le débit maximum de 1'240 l/min (annexe 31). Ils sont toujours inférieurs aux niveaux déterminés par le test de production effectué en 1998 (p.ex., avec 1'240 l/min on avait 78 m). Cela s'explique en raison des variations rapides de débit, les valeurs de niveau d'eau mesurées correspondant à des niveaux non stabilisés (figure 15).

A remarquer que pour contrôler le niveau d'eau en continu, il était prévu d'installer une sonde de niveau piézoélectrique. En raison d'une mésentente avec l'entreprise de forage, celle-ci n'a pas été posée lors de la mise en place de la pompe immergée. Il est prévu d'installer cette sonde lors de la prochaine révision de la pompe.

9.2.2 Puits de pompage P201

Les **débits** sont constants et maintenus à une valeur fixe, les variations de demande des Bains étant absorbées par le pompage du P600 (figure 14 et annexe 31). Depuis le début de l'exploitation en avril 2000, le débit du P201 a été chaque année augmenté : il était de l'ordre de 380 l/min en 2000, de 430 l/min en 2001 et de 470 l/min en 2002. Cette dernière année, il n'y a pratiquement plus eu de rejets. A remarquer qu'avant la réalisation du puits P600, le P201 a été exploité durant 25 ans avec un débit maximum de 430 l/min, sauf lors d'un test à 515 l/min en septembre 1994.

Les **niveaux d'eau** ont atteint une profondeur maximale de 38.1 m en décembre 2002, pour un débit de 470 l/min (annexe 31). C'est exactement la même valeur qui avait été mesurée en septembre 1994 à la fin d'un pompage de 3 semaines à 515 l/min. Logiquement, les niveaux sont plus bas que ceux mesurés avant la mise en service du puits P600, d'une part en raison du rabattement supplémentaire engendré par ce pompage, de l'ordre de 4 m, et d'autre part en raison des débits d'exploitation plus élevés, notamment en 2002 (annexe 30 et figure 15). Toutefois, ces changements restent contenus.

9.3 Température et conductivité de l'eau thermique

9.3.1 Remarques préliminaires

- Les valeurs brutes de température enregistrées par la sonde digitale installée en tête du puits P600 sont le plus souvent inférieures à celles mesurées par la sonde à l'entrée des Bains, ce qui n'est pas logique. La première sonde n'enregistre pas tout à fait les températures de l'eau thermique, en raison d'un mauvais contact thermique.
- La sonde digitale censée mesurer les températures en tête du puits P201 est située en fait sur la conduite qui se trouve dans le Bâtiment des Sources, à environ 50 m du P201. Les valeurs mesurées doivent donc être légèrement inférieures à celles qui seraient effectivement mesurées en tête de puits, en raison des pertes de chaleur dans l'ancienne conduite en Eternit qui relie le P201 à cette maisonnette.
- Lors des tournées de contrôle, il arrive assez fréquemment de mesurer une température anormalement basse de l'eau du P600 à l'entrée des Bains, en raison de la fermeture de la vanne. A ce moment, la température mesurée est celle de l'eau stagnante qui se trouve dans la conduite. Un autre cas de figure anormal consiste à mesurer une température élevée à l'entrée des Bains (débit de pompage maximum) et, par la suite, une température plus basse en tête de puits, car entre-temps la vanne a été fermée et le débit est bien inférieur.

Pour toutes ces raisons, un certain nombre de mesures de température de l'eau thermique du P600 à l'entrée des Bains n'ont pas été prises en considération. De plus, les valeurs indiquées par la sonde digitale en tête des puits P600 et P201 ont été corrigées pour pallier au mauvais contact thermique, aux pertes de chaleur et pour être comparables aux valeurs de température mesurées ponctuellement avec l'appareil WTW. La correction par rapport aux valeurs brutes est la suivante : +1.1°C pour le P600 et +0.5°C pour le P201.

9.3.2 Puits de pompage P600

Les **températures de l'eau** varient en dents de scie en raison des variations de la demande d'eau par les Bains, les températures étant directement proportionnelles aux débits (figure 14). Si on considère les maxima de température depuis 1998, la température de l'eau du P600 a passé de 70.0°C en mai 1998 à 66.1°C en novembre 2002, soit une baisse de 3.9°C ! Toutefois, ce phénomène doit être relativisé. D'une part, lors du test de production en 1998 et du pompage de longue durée en 1999-2000, on avait déjà observé une tendance à la baisse après avoir atteint une température maximale de l'ordre de 70°C dans les premières heures de pompage. D'autre part, le mode d'exploitation du P600, avec de courtes périodes avec débit maximum, ne permet pas une "montée en température" optimale de l'eau pompée.

Si l'on considère les valeurs maximales pour les années 2000 à 2002, on observe que la baisse de température n'est pas négligeable, de l'ordre de 2°C. Celle-ci a passé de 68.2°C avant la mise en exploitation du P600 (température mesurée à la fin du pompage de longue durée à 600 l/min, cf. chap. 6.3) à 66.3°C en 2002. Toutefois, il faut de nouveau relativiser l'ampleur de cette baisse si on considère que celle-ci est intervenue en grande partie dans les premières semaines qui ont suivi la mise en exploitation du puits P600 : ce phénomène reste pour l'instant inexpliqué. En observant les pointes de température pour les années 2001 et 2002, cette baisse a été de 0.7°C entre avril 2001 et novembre 2002 (figure 14).

N'ayant pas assez de recul et d'informations pour expliquer les raisons de cette tendance à la baisse, il faudra continuer les mesures dans les années à venir pour comprendre si ce phénomène se poursuit de manière irréversible ou si on observe une stabilisation à long terme, voir une inversion de tendance.

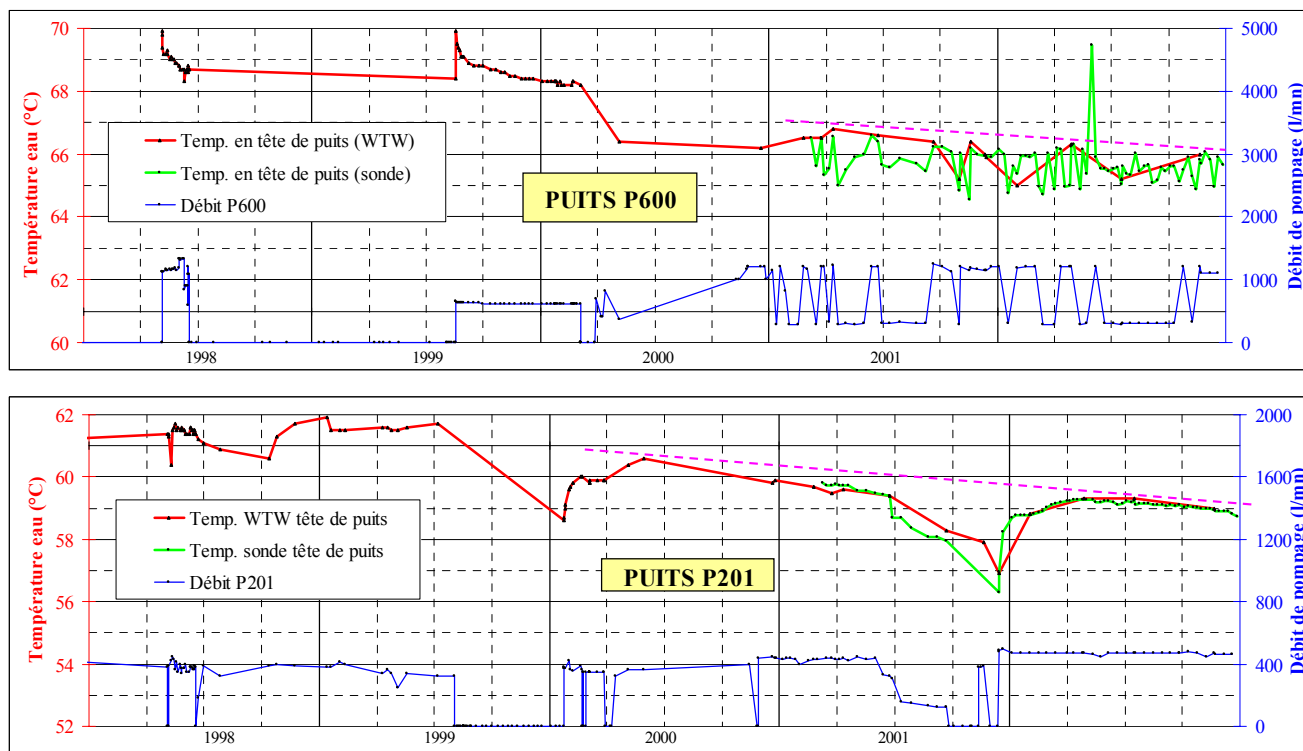


Figure 14 : Evolution de la température de l'eau pompée par les deux puits durant la période 1998 – 2002. On observe une tendance à la baisse pour l'eau des deux puits de pompage (ligne traitillée rose) qui doit être surveillée à long terme. La baisse de température de l'eau du P201 en décembre 2001 est due à l'arrêt du pompage durant plus de 2 mois.

Les **conductivités de l'eau** montrent aussi une tendance à la baisse. Depuis la mise en exploitation du P600, la conductivité n'a jamais dépassé 1'940 $\mu\text{S/cm}$ et n'a atteint qu'un maximum de 1'746 $\mu\text{S/cm}$ durant la période 2001-2002, alors qu'on mesurait un maximum de 2'050 $\mu\text{S/cm}$ lors du test de production en 1998 et même 2'580 $\mu\text{S/cm}$ en novembre 1999 lors du pompage de longue durée (annexe 31). Bien que cette dernière valeur soit probablement à considérer avec précaution, en raison probablement d'une mobilisation anormale et ponctuelle d'eaux plus minéralisées, reliques des fluides de forage salés utilisés lors de la perforation, on doit admettre que la baisse de conductivité a été de l'ordre de 280 $\mu\text{S/cm}$ depuis la fin du pompage de longue durée en mars 2000.

Les mesures effectuées en 2001-2002 montrent une évolution cyclique de la conductivité du P600, avec maxima en été et minima en hiver (annexe 31).

9.3.3 Puits de pompage P201

Concernant les **températures de l'eau thermique** de ce puits, on dispose de toute une série de mesures historiques avant la réalisation et la mise en exploitation du puits P600, qui portent sur la période novembre 1973 – juin 1997 (annexe 30). Si l'on considère les 10 années qui ont précédé la mise en service du P600, les maxima et minima sont de 63.1°C (température exceptionnellement élevée atteinte lors d'un pompage en simultané avec le puits P205), respectivement 61.3°C. Juste avant la mise en exploitation simultanée des deux puits, on mesurait une température maximale de 61.9°C en janvier 1999 (sans pompage au P600) et une valeur de 59.9°C à la fin du pompage de longue durée dans le P600, en mars 2000. On a donc déjà une baisse importante, de l'ordre de 2°C, entre ces deux mesures.

Depuis la mise en exploitation simultanée des deux puits, les maxima de température de l'eau du P201 sont passées de 60.6°C en mai 2000 à 59.3°C en juillet 2002. On a donc de nouveau une baisse de température de 1.3°C depuis la mise en service du pompage simultané. Cette tendance à la baisse semble se poursuivre. En effet, depuis avril 2002 on assiste à une diminution régulière de la température de l'eau du P201, qui a passé de 59.2°C en avril à 58.7°C en décembre 2002 (figure 14), ce qui signifie une baisse de l'ordre de 0.1°C tous les deux mois ou, par extrapolation, 0.6°C par année! Ce phénomène est actuellement étroitement surveillé pour déceler si cette tendance se poursuit à long terme ou s'il s'agit uniquement d'un effet saisonnier.

La **conductivité électrique de l'eau thermique** a été aussi modifiée de manière importante par la mise en service du P600. Les mesures historiques montrent que celle-ci a varié, si l'on considère les 10 années qui ont précédé la mise en service du P600, entre 1'987 $\mu\text{S/cm}$ en novembre 1993 et 1'692 $\mu\text{S/cm}$ en décembre 1989 (annexe 30). Depuis juillet 1999 (1'880 $\mu\text{S/cm}$, pas de pompage dans P600) la conductivité a baissé d'environ 500 $\mu\text{S/cm}$, si on considère la valeur mesurée en novembre 2002 (1'374 $\mu\text{S/cm}$, voir annexe 31).

Cette baisse de conductivité traduit une modification de la minéralisation de l'eau thermique pompée par le puits P201, qui a été confirmée par les analyses chimiques effectuées durant le test de production du P600 réalisé en 1998. En effet, la diminution de conductivité de 1'840 à 1'473 $\mu\text{S/cm}$ se traduisait par une baisse de la minéralisation de l'ordre de 250 mg/l. Toutefois, ce phénomène est réversible : dans les deux mois qui ont suivi l'arrêt du pompage au P600, la conductivité a progressivement augmenté jusqu'à 1'817 $\mu\text{S/cm}$.

Durant la période 2001 – 2002, la conductivité de l'eau du P201 a varié entre un minimum de 1'205 $\mu\text{S/cm}$ et un maximum de 1'440 $\mu\text{S/cm}$, avec en moyenne des valeurs de l'ordre de 1'320 $\mu\text{S/cm}$.

9.3.4 Considérations concernant les baisses de température et de conductivité de l'eau thermique

Même si pour l'instant on ne peut pas encore parler de surexploitation de l'aquifère thermal de Lavey-les-Bains, la baisse de température et de conductivité des eaux thermales pompées doit être surveillée de près dans les années à venir. Elle est sûrement liée à l'exploitation de l'aquifère thermal profond avec des débits élevés, qui provoque des changements dans le circuit profond des fluides thermominéraux. Deux hypothèses peuvent être évoquées pour expliquer ce phénomène :

- Les pompages à débit élevé ont mobilisé des eaux moins chaudes et moins minéralisées provenant de la nappe phréatique du Rhône. Des voies de circulations ont pu se créer entre les fissures aquifères dans les gneiss du soubassement rocheux et les terrains meubles du Quaternaire. Un pompage réalisé simultanément dans les puits P201 et P205 en décembre 1990 avait démontré qu'une partie des eaux moins chaudes et moins minéralisées étaient détournées vers le P205, provoquant ainsi une augmentation de température et de conductivité des eaux pompée au P201. Toutefois cette hypothèse semble peu probable, si on considère les diagrammes de mélange : l'importante baisse de conductivité observée notamment avec les eaux pompées par le P201 aurait dû se traduire par une diminution de température de l'eau bien plus importante de celle qui est effectivement constatée.
- Les vitesses de circulation dans l'aquifère thermal profond ont été accélérées par le pompage supplémentaire du P600. Il en résulte une modification des équilibres thermiques et chimiques, les temps de transit n'étant plus suffisants pour garantir d'atteindre les mêmes températures et de dissoudre une quantité aussi élevée de minéraux qu'avant la mise en service du P600. Ce phénomène est probablement évolutif jusqu'au moment où un nouvel équilibre sera atteint. Pour cette raison, les mesures de contrôle doivent se poursuivre à long terme pour déceler rapidement une éventuelle accélération de cette évolution, ce qui ne serait pas souhaitable, ou un éventuel ralentissement, ce qui permettrait d'extrapoler des valeurs limites de température et de conductivité propres à l'exploitation à long terme des puits de Lavey-les-Bains.

En 2003, les mesures de contrôle de température et de conductivité des eaux thermales vont s'intensifier :

- les calages avec l'appareil WTW seront effectués mensuellement;
- des échantillons d'eau seront prélevés chaque semaine pour mesurer ensuite la conductivité électrique en une seule fois sur l'ensemble des eaux collectées;
- des prélèvements pour analyses chimiques seront effectués trimestriellement;

Le débit de pompage du P201 sera en outre abaissé à 430 l/min. Au plus tard dans trois ans, mais si nécessaire déjà en 2003, des diagraphies géophysiques seront entreprises dans les deux puits lors de la révision des pompes immergées, cela afin de mettre en évidence d'éventuels changements des caractéristiques physico-chimiques des différentes venues d'eau drainées.

9.4 Productivité des puits P600 et P201

La **productivité du puits P600** ne montre pas une évolution par rapport au test de production réalisé en 1998. Si on observe les valeurs de rabattement mesuré durant la période mars 2000 – décembre 2002, on remarque que la plupart des mesures se situe en dessus de la courbe caractéristique établie pour ce puits (figure 15 et annexe 32). Il faut toutefois considérer que les valeurs mesurées correspondent à des rabattements propres à des niveaux non stabilisés, en raison des variations de débit et des courts temps de pompage à débit élevé.

Les points qui se situent en dessous de la courbe caractéristique n'indiquent pas une dégradation des crépines (colmatage), mais s'expliquent par le décalage temporaire entre la mesure du débit aux Bains et le relevé du niveau d'eau au puits de pompage. Il peut arriver par exemple qu'on mesure le débit lorsque la vanne est en train de se fermer, alors que le niveau est contrôlé plus tard lorsque la vanne est en train de s'ouvrir. On aura alors un rabattement important pour un débit faible. Dans le même registre, les rabattements anormaux mesurés avec le débit de rejet à 300 l/min résultent en fait de la période qui précédait la mesure, lorsque le puits était exploité avec un débit maximum.

La **productivité du puits P201** n'a pas été modifiée non plus par la mise en service simultanée des deux pompages. Bien que la plupart des points de la relation rabattements/débits se situent en dessous de la courbe caractéristique établie lors du test de production de 1973, cela ne signifie pas qu'il y a eu un colmatage des crépines (figure 15 et annexe 32). Ces rabattements anormaux s'expliquent par l'abaissement du niveau de l'aquifère thermal engendré par le pompage dans le P600, étant donné que pour calculer ces rabattements on a considéré un seul et unique niveau de référence de la nappe au repos depuis 1973. En réalité, après la mise en service du pompage au P600, ce niveau théorique a été abaissé d'au moins 4 m.

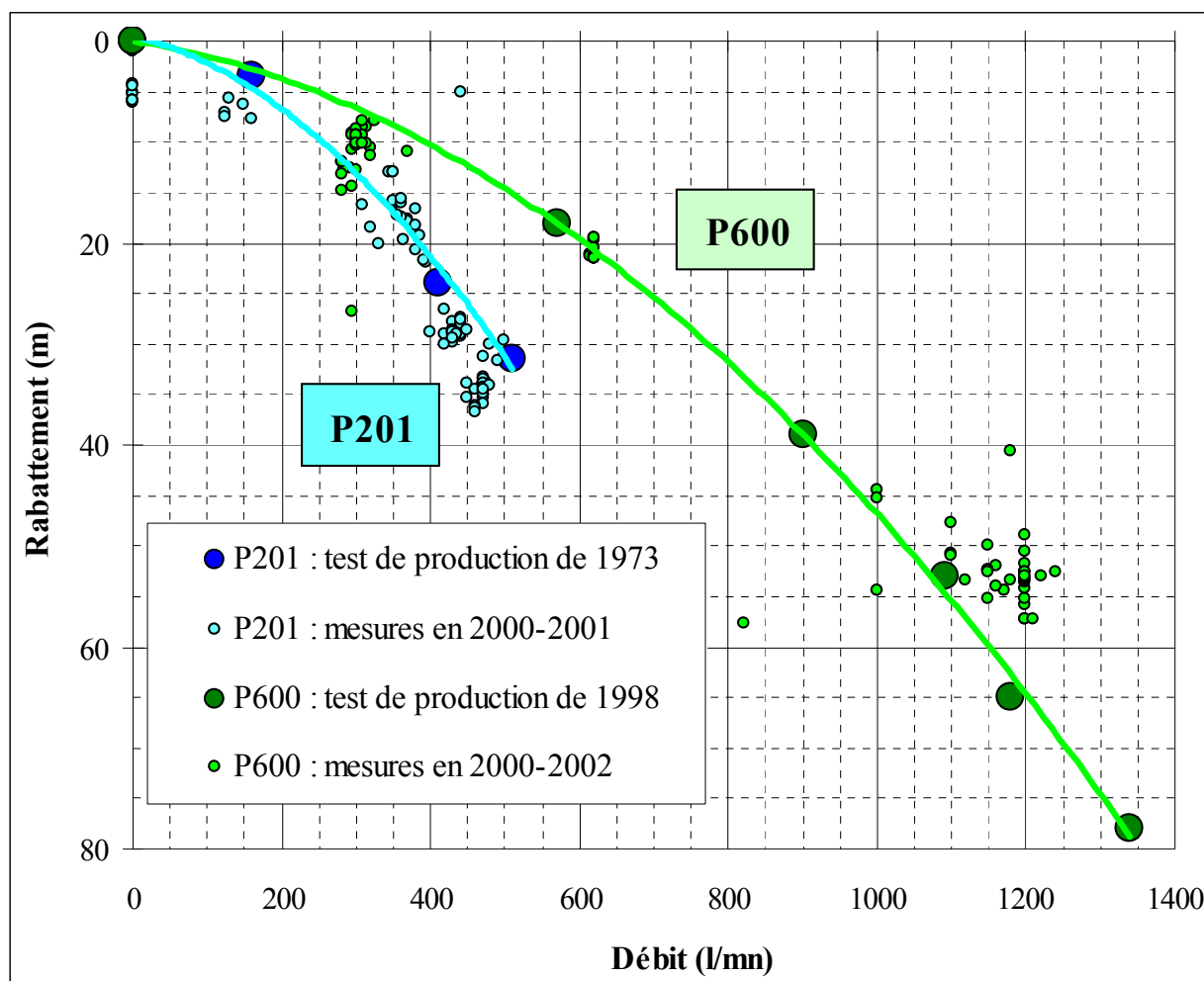


Figure 15 : Courbes caractéristiques des puits P600 et P201 et mesures effectuées depuis leur mise en exploitation simultanée.

10. VALORISATION DE LA RESSOURCE ENERGETIQUE

10.1 Besoins des Bains de Lavey SA

Le centre thermal des Bains de Lavey SA a besoin d'eau thermale "fraîche" à plusieurs niveaux de température selon leur utilisation finale. La terme "fraîche" n'a rien à voir avec la température mais avec la pureté de l'eau qui est préservée telle qu'à sa sortie du puits. Ainsi, pour les soins dispensés dans le centre médical, il est nécessaire de pouvoir alimenter des robinets mélangeurs en eau thermale fraîche à 20°C et à 63°C pour permettre par mélange d'obtenir de l'eau thermale à toutes les températures intermédiaires. Dans la partie publique, l'exploitation des bassins nécessite de l'eau à 36°C pour le renouvellement en eau et pour le nettoyage des filtres.

La production de ces différents niveaux de température est réalisée par un enchaînement hiérarchisé d'échangeurs de chaleur (figure 16). Ceux-ci permettent la fourniture de la presque totalité de l'énergie aux bâtiments du complexe des Bains pour les besoins de chauffage, ventilation, production d'eau chaude sanitaire ainsi qu'évidemment le réchauffement de l'ensemble de l'eau des bassins intérieurs et extérieurs et le remplissage des différentes piscines.



Figure 16 : *Echangeurs de chaleur à plaques utilisés par les Bains de Lavey*

10.2 Utilisation d'eau "fraîche" à 63°C

Les eaux des deux puits, soit 943 l/min en moyenne annuelle, sont introduites dans un réservoir de 300 m³ de capacité (1) dont seule une faible partie est effectivement utilisée (annexe 33). Le mélange obtenu a une température de 63 °C en moyenne. Trois types de prélèvement d'eau thermique sont effectués dans ce réservoir :

- Un premier prélèvement de 31 l/min alimente, au moyen de surpresseurs, la partie chaude des mélangeurs pour les soins du centre médical.
- Un second prélèvement de 62 l/min traverse un échangeur de chaleur (2), utilisé pour le préchauffage de l'eau sanitaire des douches, et ressort dans un réservoir d'eau thermique fraîche à 20°C (annexe 33). Cette eau alimente, au moyen de surpresseurs, la partie froide des mélangeurs pour les soins.
- Le solde de 850 l/min est utilisé pour les besoins (592 kW) en chauffage-ventilation-sanitaire (CVS), par le biais d'un premier échangeur (3) qui refroidit l'eau thermique à 53°C, puis par un second (4) qui permet le réchauffement de l'eau des quatre bassins (1007 kW) en produisant de l'eau thermique à 36°C (annexe 33).

La quantité d'eau fraîche à 36°C produite est donc dépendante de la météo. En effet, lors de situations extrêmes de froid et de vent le réglage du second échangeur de réchauffement des bassins devient prioritaire, donc est alimenté partiellement en eau à 63°C au lieu de 53°C, et le complément pour les besoins énergétiques (CVS) des bâtiments doit être alors fourni par la chaudière à mazout.

10.3 Utilisation d'eau "fraîche" à 36°C

L'eau thermique à 36°C est exclusivement utilisée pour l'exploitation des quatre bassins du complexe des Bains. Le renouvellement et l'apport en eau des bassins consomment en permanence 271 l/min. Le nettoyage des filtres à sable consomme 40 l/min et l'eau sale est directement évacuée à l'égout. Le solde de l'eau thermique, soit 539 l/min, est acheminé dans le réservoir de retenue dont la température est d'environ 34°C. Une partie de l'eau thermique de renouvellement des bassins s'évapore (20 l/min) et le solde est acheminé dans le bassin de retenue dans le cas du grand bassin extérieur (115 l/min) et dans la fosse de pompage vers la STEP dans le cas des trois autres bassins (136 l/min)

Les 654 l/min qui parviennent dans le bassin de retenue sont ensuite évacués par pompage vers le Rhône à une température comprise entre 30 et 34°C.

11. BILAN ENERGETIQUE

11.1 Données utilisées

Le calcul des puissances correspondant aux rejets a été effectué sur la base d'une température de référence de 10°C.

Le diagramme des flux (figure 17) a été établi sur la base des relevés des compteurs en tête de puits, de ceux à l'entrée des Bains ainsi que sur la base de l'analyse d'un grand nombre de relevés issus du système de gestion des Bains de Lavey SA. D'autres valeurs ont été déterminées sur la base de débits mesurés et d'horaires de fonctionnement. Enfin quelques valeurs ont été estimées faute de relevés disponibles.

Ce diagramme est valable pour l'année 2001 et devra être adapté pour l'année 2002 car certaines utilisations de l'eau thermique à 36°C ont été modifiées pour permettre une valorisation encore meilleure de son contenu énergétique. Une injection directe d'eau à 36°C a notamment été mise en place dès décembre 2001 dans le bassin extérieur.

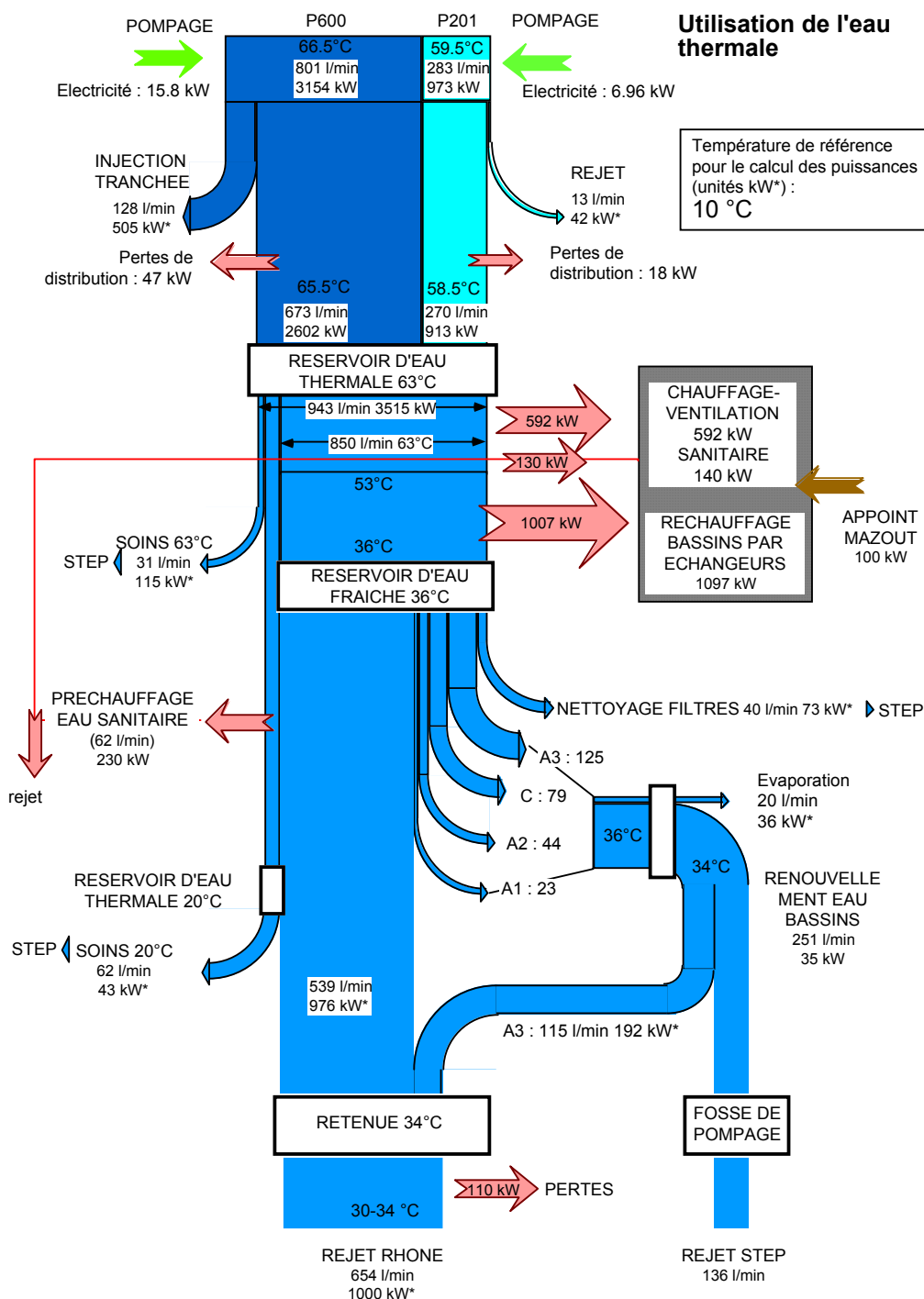


Figure 17 : Diagramme de flux d'eau thermique et des échanges d'énergie

11.2 Couverture des besoins en énergie du centre thermal

Les besoins moyens annuels en chaleur du centre thermal sont de 592 kW pour le chauffage et la ventilation, de 140 kW pour la production d'eau chaude sanitaire et de 1'097 kW pour le réchauffement de l'eau de l'ensemble des bassins. Une partie de la consommation d'eau sanitaire est rejetée pour permettre une production suffisante d'eau thermale à 20°C pour les soins. Sur ces 1'829 kW requis, 100 kW sont apportés par la chaudière à mazout, ce qui représente une part de 5.5% des besoins globaux. Cette consommation d'énergie fossile a été d'une part nécessaire pour faire face à des situations exceptionnelles de température extérieure combinée à un vent violent qui se sont produites quelques jours durant l'hiver 2001 (90 kW) et d'autre part parce que la température de l'eau chaude sanitaire de 55°C obtenue par chauffage avec l'eau thermale n'est pas suffisante pour éliminer les germes bactériens. Cette eau est donc chauffée de 55 à 60°C (10 kW) par la chaudière à mazout pour éliminer le risque lié à certaines bactéries (*Legionella*).

11.3 Eau thermale disponible et rejets thermiques valorisables

La totalité de l'eau thermale exploitable au niveau des deux puits de production P600 et P201 est consommée en hiver par le centre thermal. Par contre, à mi-saison et en été un débit moyen pouvant atteindre 200 l/min à 63°C est disponible. Une autre valorisation possible concerne les rejets du centre thermal déversés actuellement dans le Rhône. En effet plus de 650 l/min, en moyenne annuelle, sont rejetés à une température variant entre 30 et 34°C. Le débit maximum est rejeté en hiver et peut atteindre 1100 l/min à 30°C.

Une étude de valorisation de ce rejet devrait être engagée de manière à déterminer la faisabilité d'un projet de chauffage à distance vers St-Maurice. Le problème majeur sera probablement la puissance totale de la centrale, car pour valoriser 20 K de ce rejet correspondant à une puissance de 1.5 MW, il faut «injecter» environ 700 kW d'électricité dans le compresseur d'une pompe à chaleur. La quantité de chaleur obtenue atteindrait déjà 2.2 MW soit plus de 250 équivalent-appartements. Or à moins de disposer d'une microcentrale hydro-électrique dédiée à cette production d'électricité, il faudrait ajouter un groupe chaleur-force à la centrale de chauffage pour produire les 700 kW d'électricité. Le rendement ne dépassant guère 25 à 30%, la quantité de chaleur à récupérer sur le groupe chaleur-force serait de 2.5 MW supplémentaires. La puissance maximale à distribuer atteindrait alors environ 4.7 MW ou l'équivalent de plus de 500 équivalent-appartements!



Figure 18 : Centre thermal de Lavey-les-Bains : actuellement, environ 650 l/min en moyenne annuelle avec une température comprise entre 30 et 34°C sont rejetés au Rhône.

12. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La réalisation du forage géothermique profond P600 à Lavey-les-Bains a été couronnée par un franc succès! Le programme de forage, les délais de réalisation et le budget ont été parfaitement respectés. Les résultats ont largement dépassé les prévisions les plus optimistes. Le test de production réalisé en mai 1998 a montré la possibilité d'exploiter ce forage avec un débit de l'ordre de 1'300 l/min et une température d'environ 69°C, en simultané avec l'ancien puits de pompage P201. Deux puits de pompage peuvent donc être exploités pour alimenter le nouveau complexe thermal des Bains de Lavey SA, avec une puissance de l'ordre de 7 MWth pour une température de rejet de 5°C.

Depuis la mise en production des puits P600 et P201 en avril 2000, les pompages n'ont connu aucun problème majeur, tel corrosion, colmatage ou panne prolongée des pompes immergées. L'eau thermique fournie aux Bains permet d'assurer la presque totalité des besoins énergétiques pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire et pour les piscines. Toutefois, les volumes d'eau thermique utilisés par les Bains sont nettement supérieurs aux attentes : au lieu des 300'000 m³ prévus, le volume total annuel d'eau thermique consommée est de l'ordre de 500'000 m³! Ceci implique des débits d'exploitation élevés, surtout durant les saisons froides, qui sont probablement à la limite de la surexploitation de l'aquifère thermal profond.

Pour le moment, ce mode d'exploitation entraîne des changements physico-chimiques au niveau des eaux thermales pompées, avec une évolution à la baisse des températures et des conductivités. Durant la période 2000 – 2002, les températures des eaux ont diminué de 2°C pour le P600 et de ~1.3°C pour le P201, alors que les conductivités ont baissé de 300 µS/cm (P600) et de ~500 µS/cm (P201). Pour cette raison, l'impact à long terme sur l'aquifère thermal profond occasionné par les pompages à débit élevé de Lavey-les-Bains doit faire l'objet d'une surveillance attentive. Le réseau de surveillance mis en place depuis décembre 2000 avec contrôle bi-mensuel de plusieurs paramètres physico-chimiques a été progressivement amélioré et les mesures de température sont effectuées depuis janvier 2002 avec un rythme hebdomadaire. Pour 2003, les conductivités seront mesurées aussi chaque semaine et le débit du puits P201 sera légèrement réduit. Des diagraphies géophysiques devront être entreprises au plus tard lors de la prochaine révision des pompes immergées.

Les modifications techniques aux installations effectuées à fin 2001 ont permis de réduire au maximum les rejets d'eau thermique au niveau des puits et d'optimiser la consommation électrique des pompes immergées. Par contre, la valorisation énergétique des rejets d'eau thermique de l'établissement thermal, dont les températures varient entre 30 et 34°C, devrait au moins faire l'objet d'une étude préliminaire pour déterminer la faisabilité d'une utilisation de la ressource géothermique dans un but de chauffage à distance.



Gabriele Bianchetti
ALPGEO Sàrl

Géologues et Hydrogéologues Conseils

Sierre, le 31 décembre 2002

BIBLIOGRAPHIE

- BIANCHETTI G., 1994. *Hydrogéologie et géothermie de la région de Lavey-les-Bains (Vallée du Rhône, Suisse)*. Bull. d'hydrogéologie N°13, CHYN, Neuchâtel, 3-32.
- BIANCHETTI G. et HADORN J.-C., 1996. *Forage géothermique profond de Lavey-les-Bains. Requête pour l'obtention de la garantie du risque de forage*. Rapport non publié.
- BIANCHETTI, G., 1997. *Forage géothermique profond de Lavey-les-Bains (Vaud) : premiers résultats*. GEOTHERMIE CH, 3/97, 2-4.
- BIANCHETTI, G., 1998. *Forage géothermique profond de Lavey-les-Bains (Vaud) : résultats du test de production*. GEOTHERMIE CH, Nr. 22, novembre 1998, 2-4.
- BIANCHETTI G., 2000. *Forage géothermique P600 : pompage de longue durée avant mise en production (août 1999 – mars 2000)*. Rapport pour CESLA S.A., mai 2000, non publié.
- BUREAU TISSIERES, 1998. *Surveillance des travaux du forage géothermique P600. Situation du forage après équipement et tests de production*. Rapport N°3.196-3, non publié.
- FLAMM C., 1994. *Etude de la fracturation du massif des Aiguilles Rouges dans la région de St-Maurice*. Dipl. Univ. Lausanne, non publié.
- KRUMMENACHER P. et BIANCHETTI G., 1995. *Pour une énergie géothermique vraiment concurrentielle : optimisation de la cascade énergétique d'utilisation du centre thermal cantonal de Lavey-les-Bains (VD), sans pompe à chaleur et avec forage géothermique profond. Rapport final*. Projet N° 10'630 financé par l'OFEN, rapport non publié.
- VUATAZ et. Al, 1993. *Programme GEOTHERMOVAL : résultats d'une prospection des ressources géothermiques du Valais, Suisse*. Bull. d'hydrogéologie N°12, CHYN, Neuchâtel.

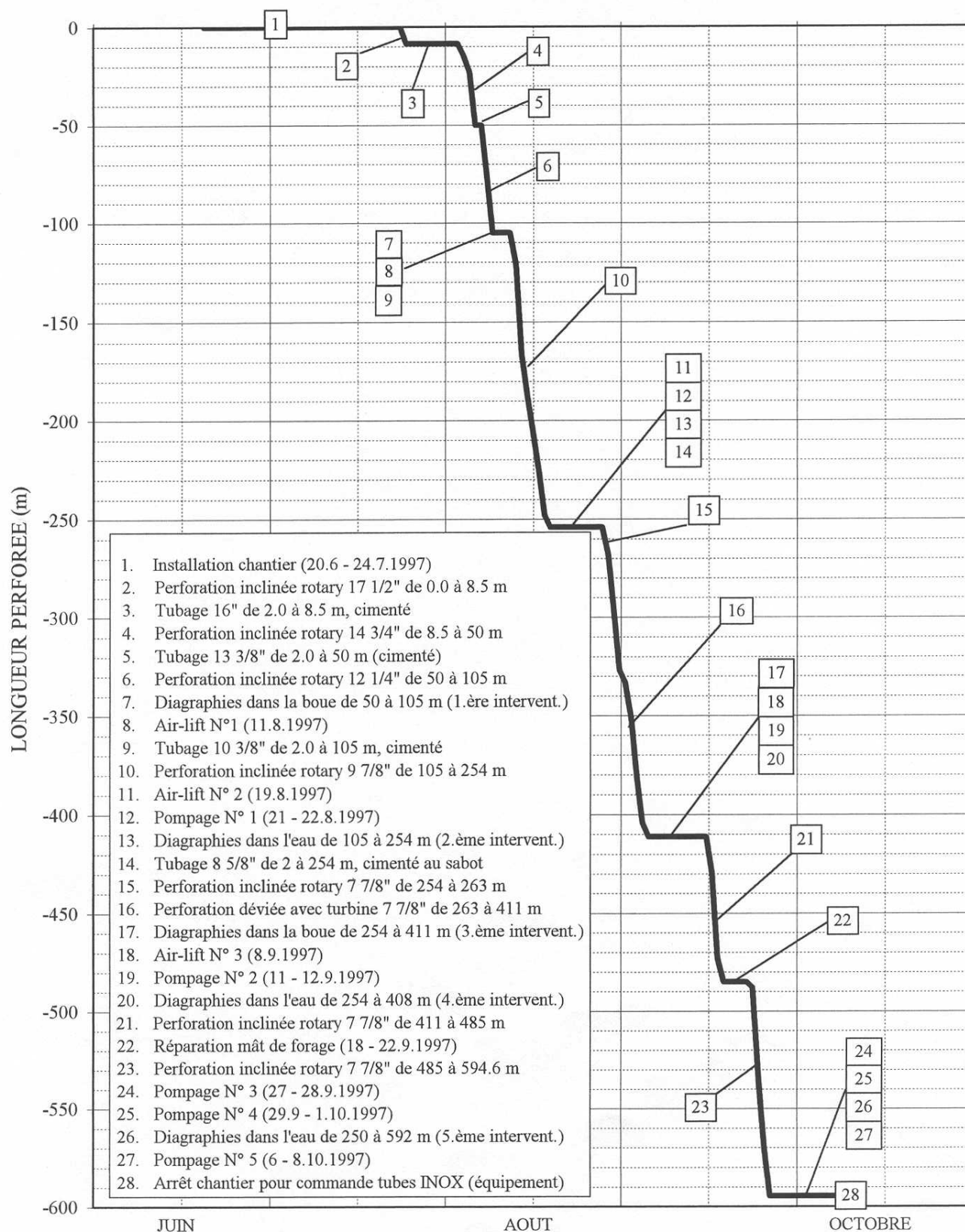
<h2>ANNEXES AU RAPPORT</h2>

ANNEXE 1 : Résumé/abstract de la publication de BIANCHETTI, 1994

Résumé - Dans la région de Lavey-les-Bains émergent des eaux thermo-minérales, dont la température en profondeur est de l'ordre de 100°C. Au cours de la remontée depuis le réservoir profond, ces eaux subissent une perte de température par conduction d'environ 30°C avant d'arriver dans la zone d'émergence. Elle témoigne de la lenteur des écoulements au sein des discontinuités du Massif cristallin des Aiguilles Rouges, dans lequel circulent les eaux thermales. Les très faibles teneurs de tritium dans les eaux les plus chaudes confirment cette hypothèse. Malgré le mode de captage (forages de l'ordre de 200 mètres) et les températures élevées (jusqu'à 63°C), toutes les eaux thermales captées sont mélangées dans la zone d'émergence avec des eaux froides et peu minéralisées. **Sans ce mélange, l'eau thermique aurait une température d'environ 70°C.** Le chimisme des eaux, de type Na ; SO₄>Cl avec de faibles teneurs en Mg, est le reflet de circulations essentiellement dans les formations fissurées gneissiques. L'origine des anions principaux, attribuée auparavant à une dissolution de roches évaporitiques, a été ré-interprétée à la lumière des connaissances récentes sur les circulations profondes dans les massifs cristallins. Le sulfate proviendrait de l'oxydation de sulfures, alors que le chlorure résulterait du lessivage de solutions saumâtres de type NaCl (inclusions fluides dans les gneiss), ou de la mise en solution de micas contenant du Cl. La distribution des fractures dans le massif gneissique est très hétérogène. Des fractures bréchiques orientées SW-NE (perpendiculaires à la vallée du Rhône), subverticales et affectant profondément le massif gneissique, drainent probablement les eaux thermales vers la surface.

Abstract - In the Lavey-les-Bains area emerged thermo-mineral groundwaters, of which the temperature at depth is about 100°C. During his ascent from the deep reservoir, the groundwater loses by conduction process about 30°C before reaching the spring area. This indicates slow circulations in the discontinuities of the crystalline massive of the Aiguilles Rouges in which transit the thermal water. The very low amount of tritium in the warmer waters confirmed the hypothesis. In spite of efficient catching systems (boreholes of about 200 meters) and the high temperature (up to 63°C), all the thermal waters are mixed, in the spring area, by cold and low mineralised water. **Without this mixing process, the thermal water would reach a temperature of about 70°C.** The water chemistry of Na ; SO₄>Cl type with low Mg concentration indicates that the groundwater flow takes place essentially in the fractured gneissic formations. The origin of the major anions, attributed before to the dissolution of the evaporitic rocks, have been reinterpreted at the light of recent knowledge on deep flow system in the crystalline massives. The sulphate would proceed of the sulfurs oxydation, whereas chlorid would result of the dissolution of briny solutions of NaCl type (fluid inclusions in the gneiss) or dissolution of micas containing Cl. The fractures distribution in the gneissic massive is very heterogenic. Brechic fractures oriented SW-NE (perpendicular at the Rhône Valley), subverticals and affected deeply the gneiss massive, drain probably the thermal groundwater to the surface.

ANNEXE 2 : Chronologie détaillée des travaux de perforation du forage P600 (20 juin – 10 octobre 1997). Les travaux de perforation ont duré exactement 2 mois.



1997

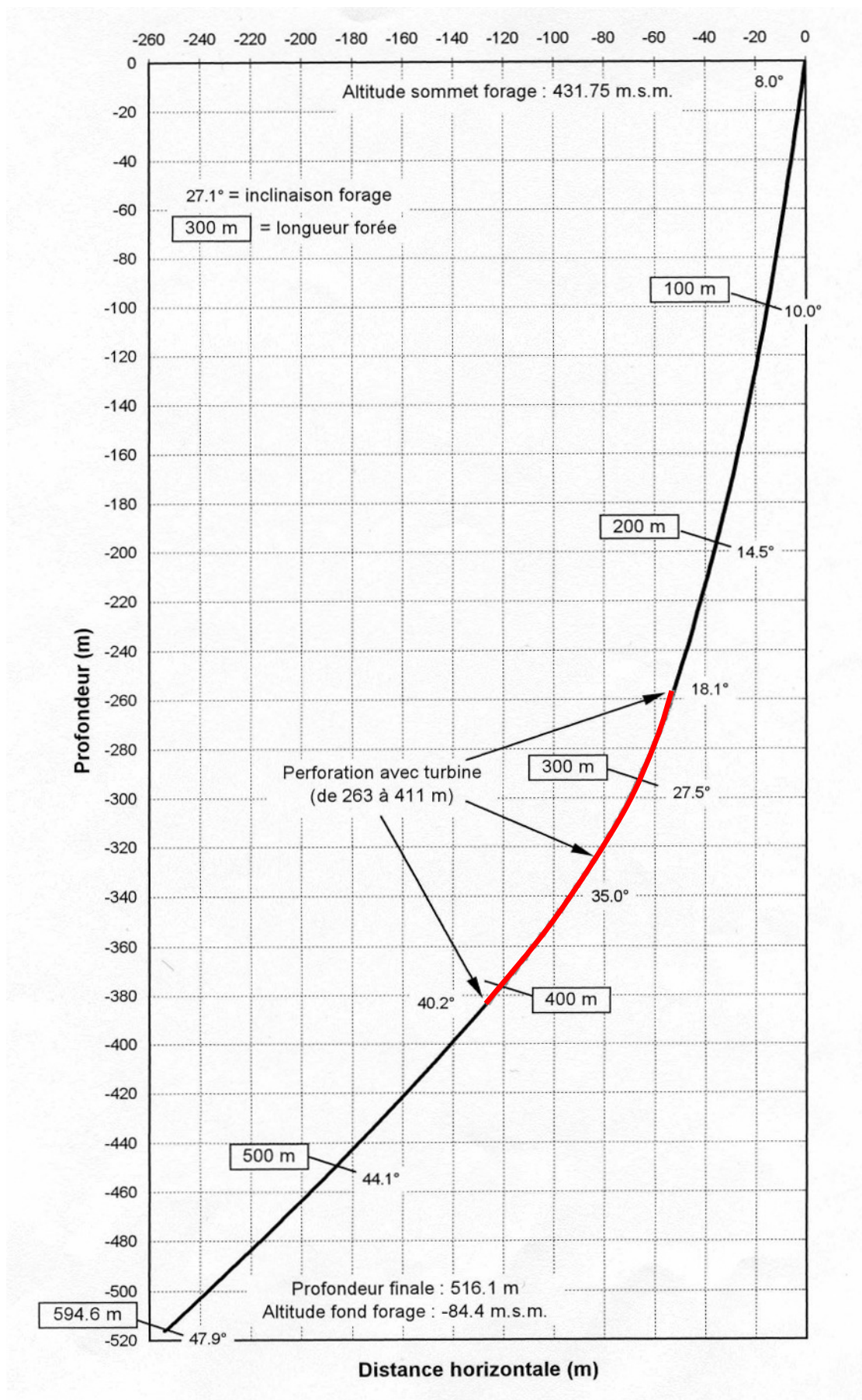
ANNEXE 3 : Liste des mesures d'inclinaison et azimut effectuées dans le forage P600. Pas moins de 50 mesures ont été effectuées.

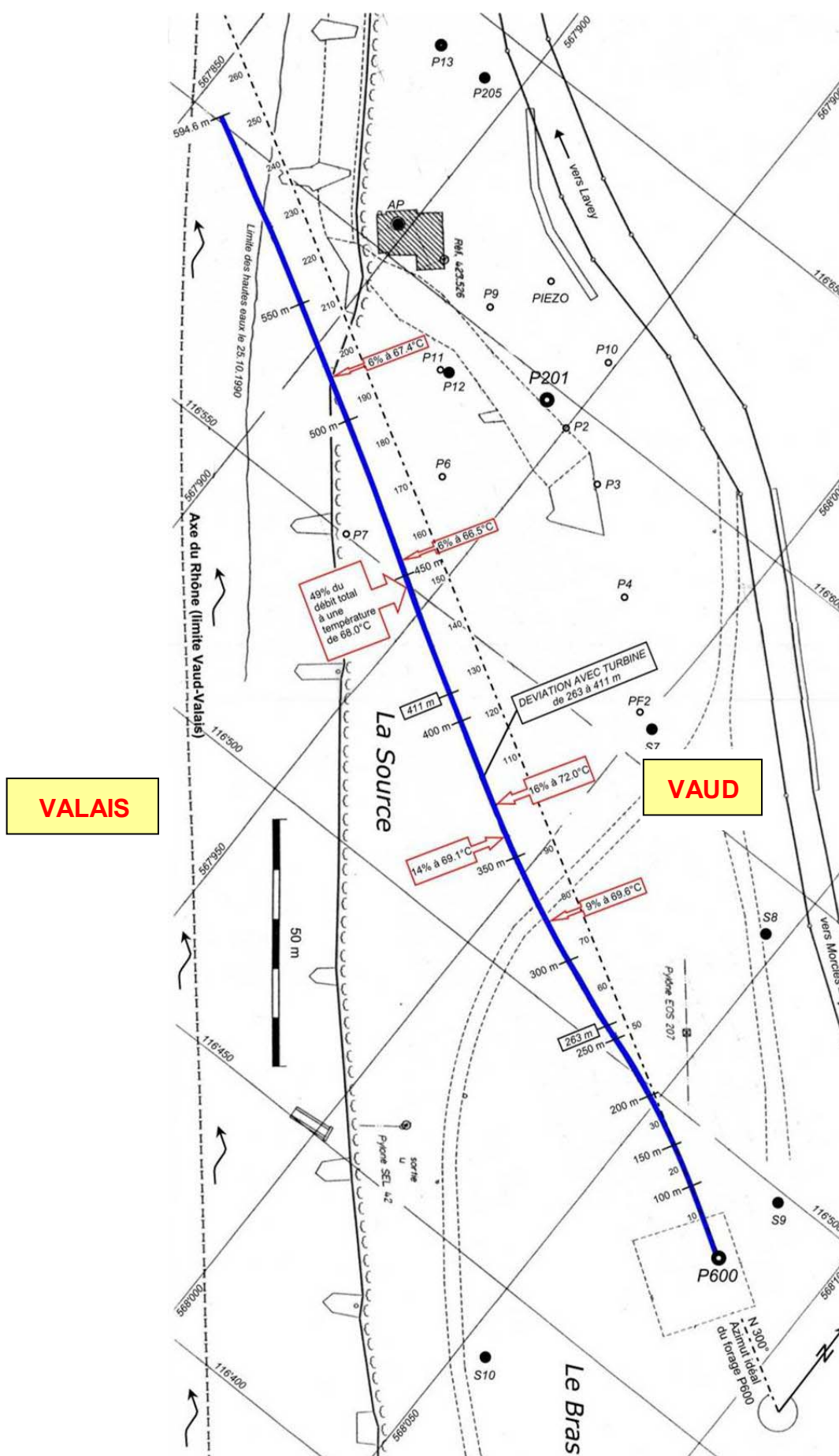
Date	Profondeur mesure (m)	Pendage/ Azimut	Remarques	Diam. perforat.
08.08.1997	60	8.5° / 302°	Single Shot STUMP	12" 1/4
09.08.1997	100	10°/299°	Single Shot STUMP	12" 1/4
16.08.1997	200	14.1°/292°	Single Shot STUMP	9" 7/8
16.08.1997	180	12.8°/293°	Single Shot STUMP	9" 7/8
16.08.1997	160	12.1°/295°	Single Shot STUMP	9" 7/8
16.08.1997	140	11.4°/298°	Single Shot STUMP	9" 7/8
16.08.1997	120	10.5°/298°	Single Shot STUMP	9" 7/8
16.08.1997	200	14.0°/292°	Single Shot STUMP	9" 7/8
18.08.1997	225	15.5°/291°	Single Shot STUMP	9" 7/8
19.08.1997	250	16.9°/289°	Single Shot STUMP	9" 7/8
29.08.1997	255	17.5°/289°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
29.08.1997	261	18.0°/288°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	267	19.0°/289°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	273	20.2°/291°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	279	21.5°/292°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	285	22.8°/292°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	291	24.0°/292°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	297	25.0°/292°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	303	26.0°/291°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	303	25.7°/293°	Single Shot STUMP	7" 7/8, turbine
31.08.1997	309	27.1°/292°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	316	28.0°/293	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
01.09.1997	320	28.8°/293°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
01.09.1997	322	29.2°/293°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	327	30.1°/294°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	333	31.3°/295°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	339	32.3°/296°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	345	33.3°/296°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	351	34.4°/297°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	357	35°/298°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	363	36°/299°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	369	37°/300°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	375	37.7°/301°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
04.09.1997	381	37.4°/301°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
04.09.1997	387	37°/300°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
04.09.1997	394	38.7°/301°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
05.09.1997	400	39.8°/301°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
05.09.1997	410	40.2°/302°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
09.09.1997	405	40.2°/302°	Single Shot STUMP	7" 7/8, turbine
23.09.1997	420	41°/303°	Single Shot STUMP	7" 7/8
23.09.1997	440	41.9°/302.7°	Single Shot STUMP	7" 7/8
23.09.1997	460	42.9°/301°	Single Shot STUMP	7" 7/8
23.09.1997	480	43.8°/301°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	500	44.1°/300°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	520	44.8°/300.5	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	540	45.8°/298.5°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	560	46.2°/297.6°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	569	46.5°/298°	Single Shot STUMP	7" 7/8
27.09.1997	580	47.2°/295.1°	Single Shot STUMP	7" 7/8
27.09.1997	593	47.8°/294.9°	Single Shot STUMP	7" 7/8

ANNEXE 4 : Liste des mesures d'inclinaison effectuées dans le forage P600. Au total, 58 mesures ont été réalisées, soit en moyenne une mesure tous les 10 mètres.

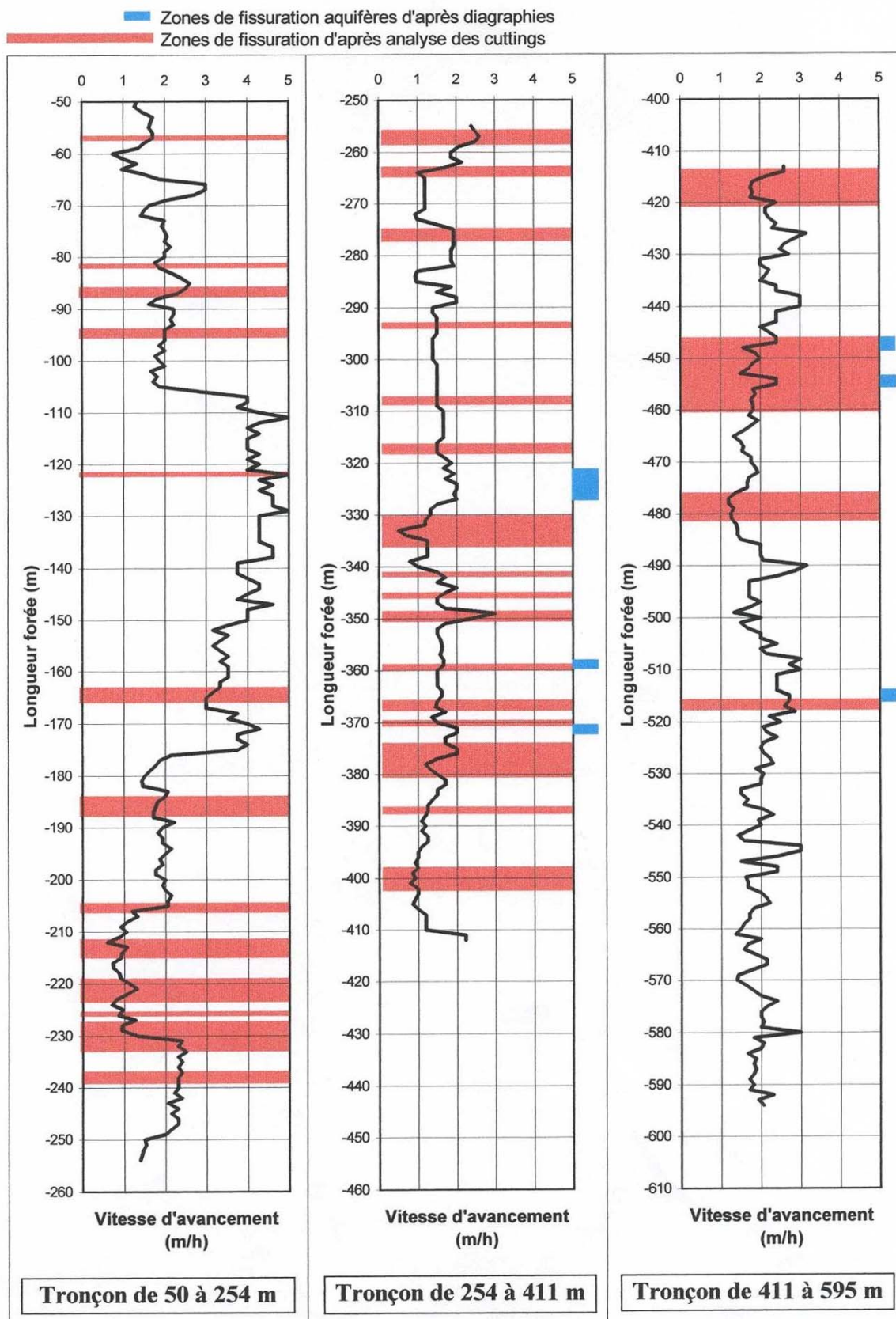
Date	Profondeur mesure (m)	Inclinaison	Remarques	Diam. perforat.
08.08.1997	20	8.3°	Single Shot STUMP , la tête de l'outil est situé	14" 3/4
08.08.1997	40	8.4°	1 m plus bas.	14" 3/4
08.08.1997	60	8.5°	Single Shot STUMP	12" 1/4
09.08.1997	80	9.2°	Single Shot STUMP	12" 1/4
09.08.1997	100	10.0°	Single Shot STUMP	12" 1/4
13.08.1997	124	10.8°	Single Shot STUMP	9" 7/8
14.08.1997	148	11.8°	Single Shot STUMP	9" 7/8
15.08.1997	172	12.7°	Single Shot STUMP	9" 7/8
15.08.1997	184	13.7°	Single Shot STUMP	9" 7/8
16.08.1997	200	14.5°	Single Shot STUMP	9" 7/8
17.08.1997	216	15.4°	Single Shot STUMP	9" 7/8
18.08.1997	223	15.7°	Single Shot STUMP	9" 7/8
19.08.1997	235	16.0°	Single Shot STUMP	9" 7/8
19.08.1997	250	16.9°	Single Shot STUMP	9" 7/8
29.08.1997	255	17.5°	Single Shot Halliburton , La tête de l'outil est	7" 7/8, turbine
29.08.1997	261	18.0°	situé 12 m plus bas.	7" 7/8, turbine
30.08.1997	267	19.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	273	20.2°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	279	21.5°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	285	22.8°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
30.08.1997	291	24.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	297	25.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	303	26.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	303	25.7°	Single Shot STUMP	7" 7/8, turbine
31.08.1997	309	27.1°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
31.08.1997	316	28.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
01.09.1997	320	28.8°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
01.09.1997	322	29.2°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	327	30.1°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	333	31.3°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	339	32.3°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
02.09.1997	345	33.3°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	351	34.4°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	357	35.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	363	36.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	369	37.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
03.09.1997	375	37.7°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
04.09.1997	381	37.4°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
04.09.1997	387	37.0°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
04.09.1997	394	38.7°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
05.09.1997	400	39.8°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
05.09.1997	410	40.2°	Single Shot Halliburton	7" 7/8, turbine
17.09.1997	405	40.2°	Single Shot STUMP	7" 7/8, turbine
17.09.1997	450	42.3°	Single Shot STUMP	7" 7/8
18.09.1997	477	43.4°	Single Shot STUMP	7" 7/8
23.09.1997	420	41.0°	Single Shot STUMP	7" 7/8
23.09.1997	440	41.9°	Single Shot STUMP	7" 7/8
23.09.1997	460	42.9°	Single Shot STUMP	7" 7/8
23.09.1997	480	43.8°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	500	44.1°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	520	44.8°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	540	45.8°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	560	46.2°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	563	46.5°	Single Shot STUMP	7" 7/8
25.09.1997	569	46.5°	Single Shot STUMP	7" 7/8
26.09.1997	590	47.4°	Single Shot STUMP,	7" 7/8
27.09.1997	580	47.2°	Single Shot STUMP,	7" 7/8
27.09.1997	593	47.4°	Single Shot STUMP,	7" 7/8

ANNEXE 5 : Profil vertical du forage P600. L'inclinaison a atteint 48° par rapport à la vertical au fond du forage!

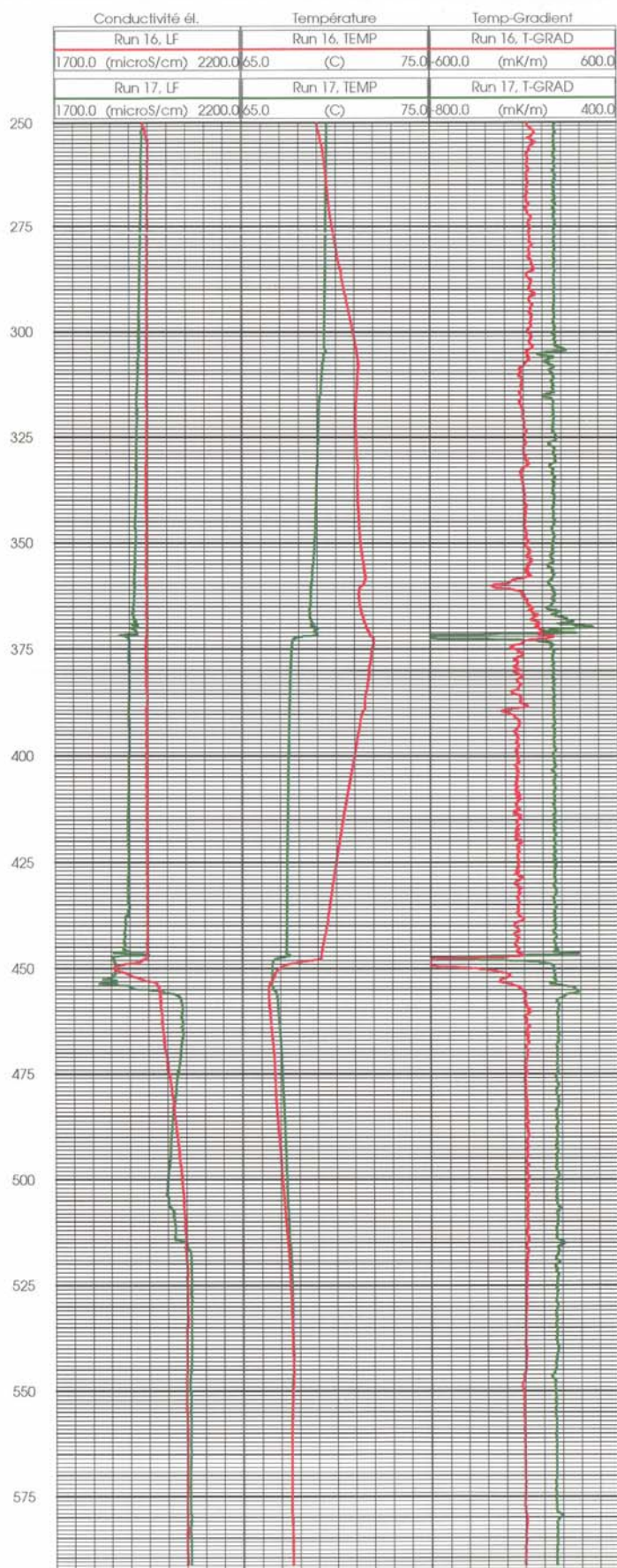
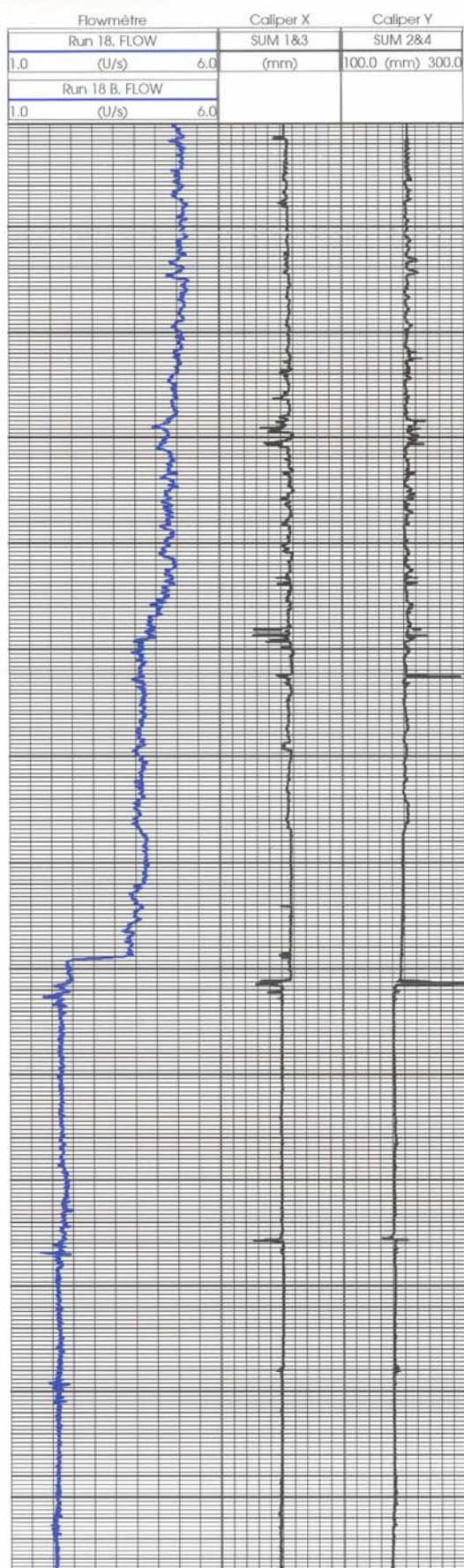




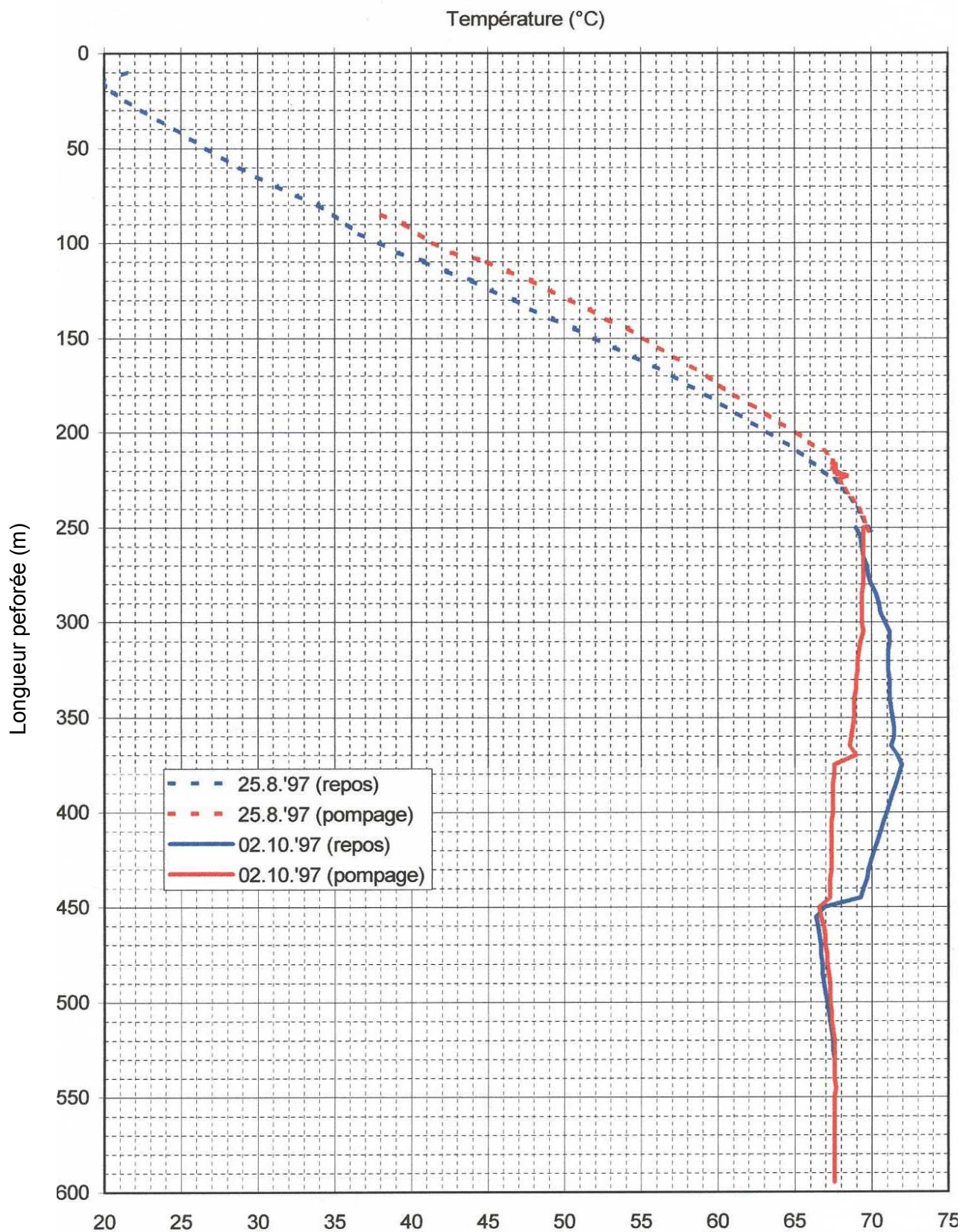
ANNEXE 7 : Vitesses de perforation du forage P600 (lignes noires), principales zones fissurées d'après l'analyse des cuttings (en rouge) et principales zones aquifères d'après les diagraphies (zones bleues). On a une bonne concordance pour la mise en évidence de la principale zone d'arrivées d'eau située à -447 m



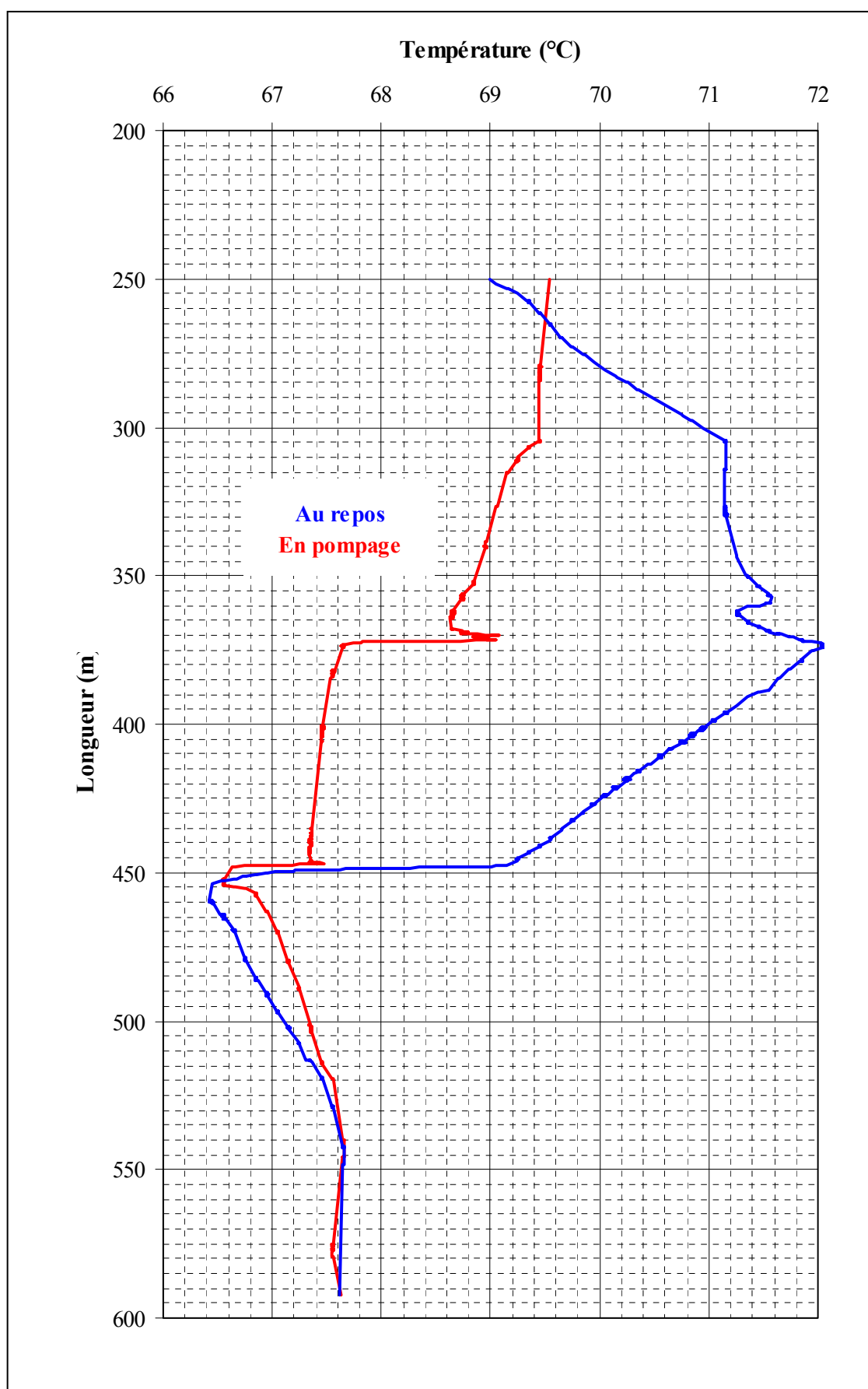
ANNEXE 8 : Diagraphies géophysiques effectuées le 2.10.1997 dans le forage P600.



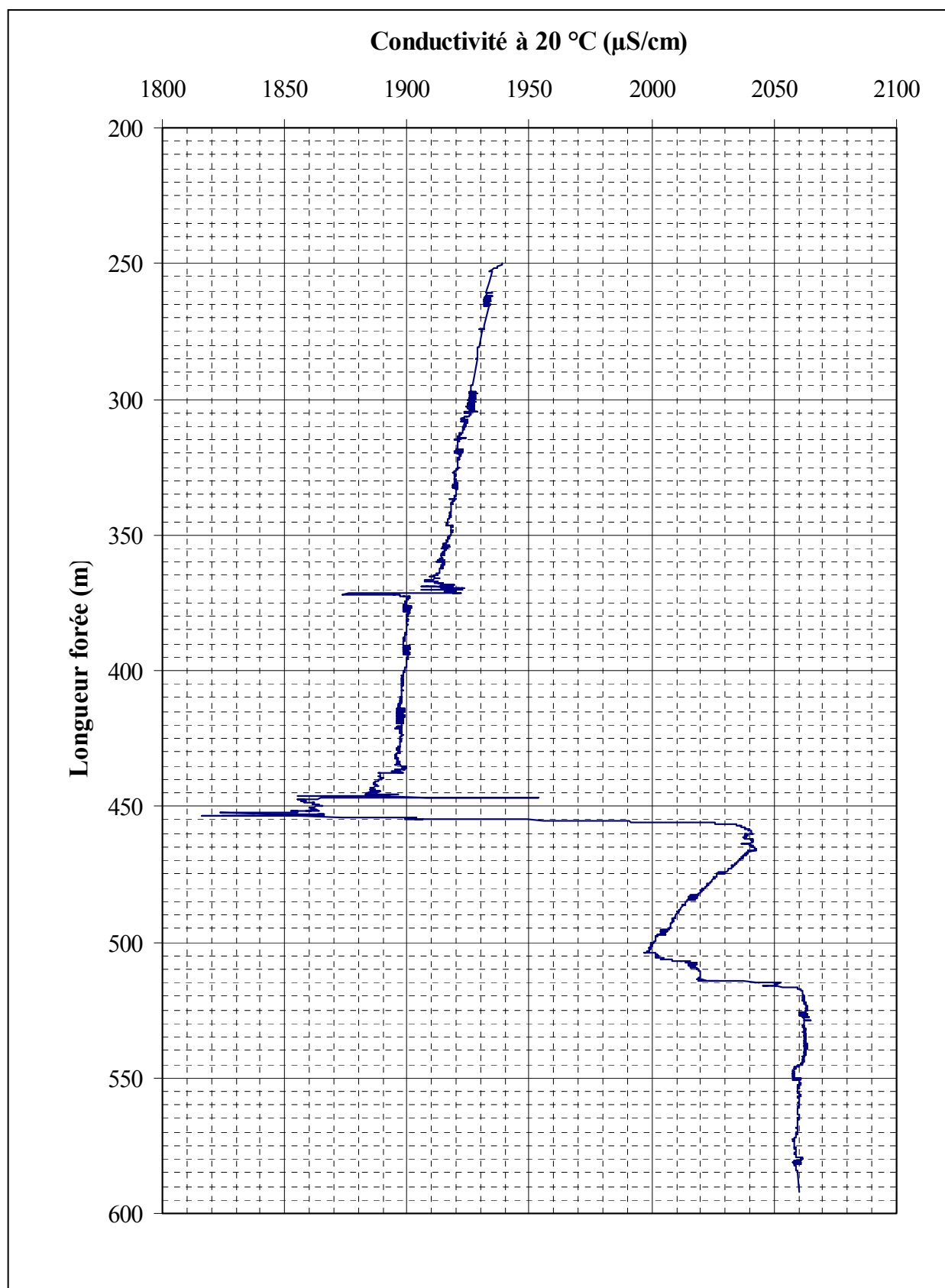
ANNEXE 9 : *Diagraphies de température dans le P600, au repos et en pompage (25.8 et 2.10.1997).*



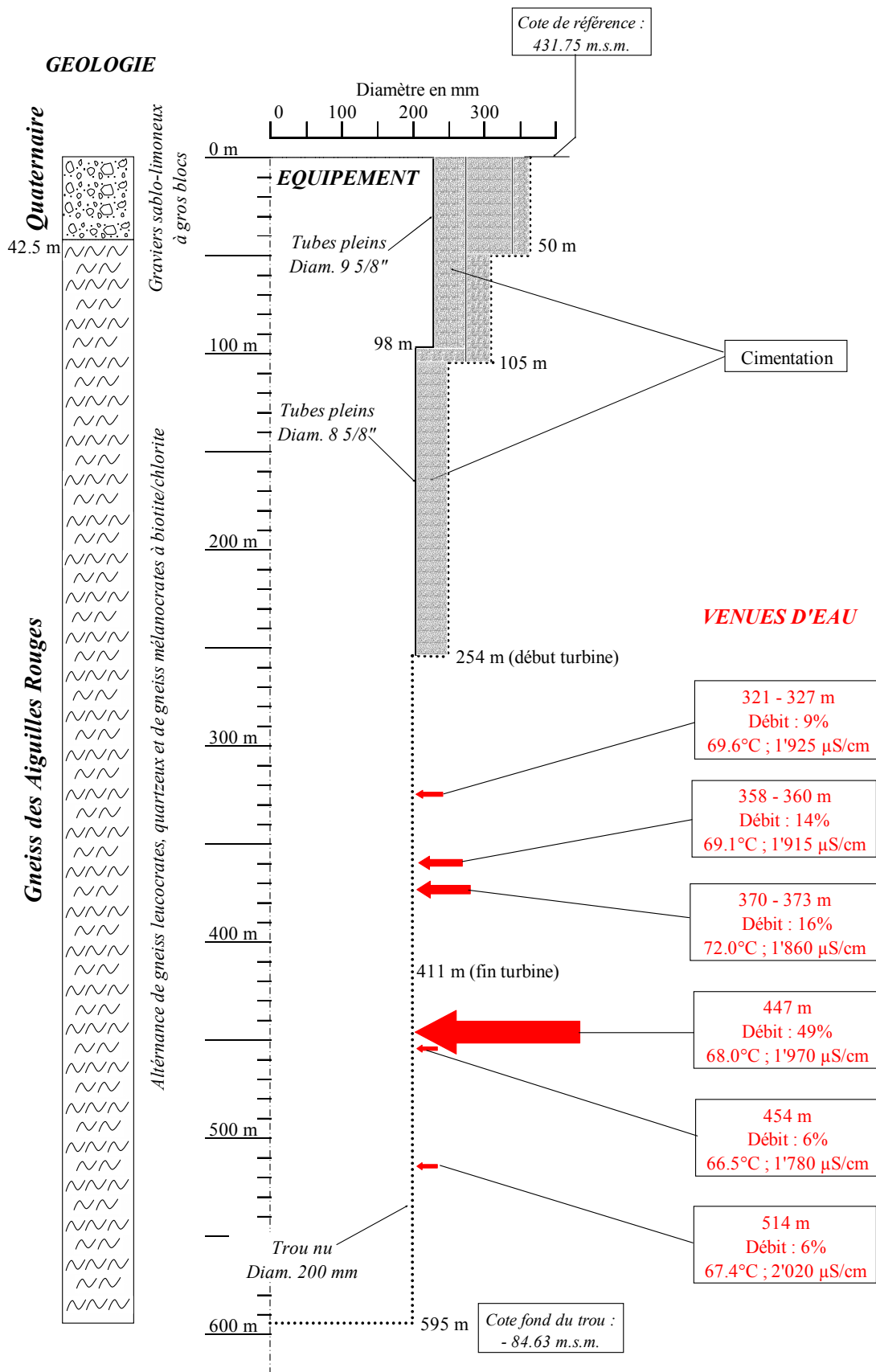
ANNEXE 10 : *Diagraphies de température dans le P600 (2 octobre 1997).*



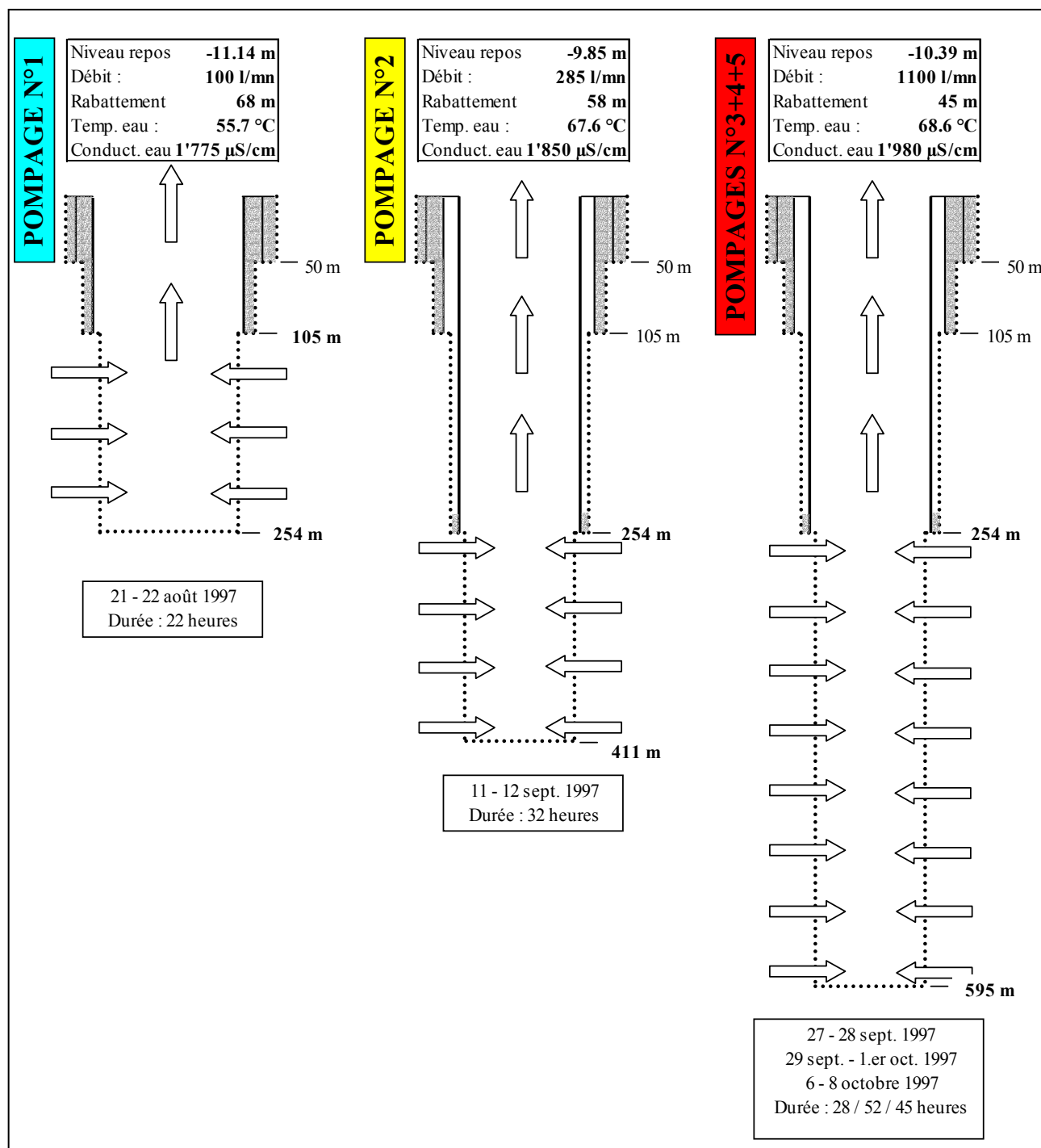
ANNEXE 11 : *Diagraphies de conductivité électrique dans le P600, au repos (2.10.1997).*



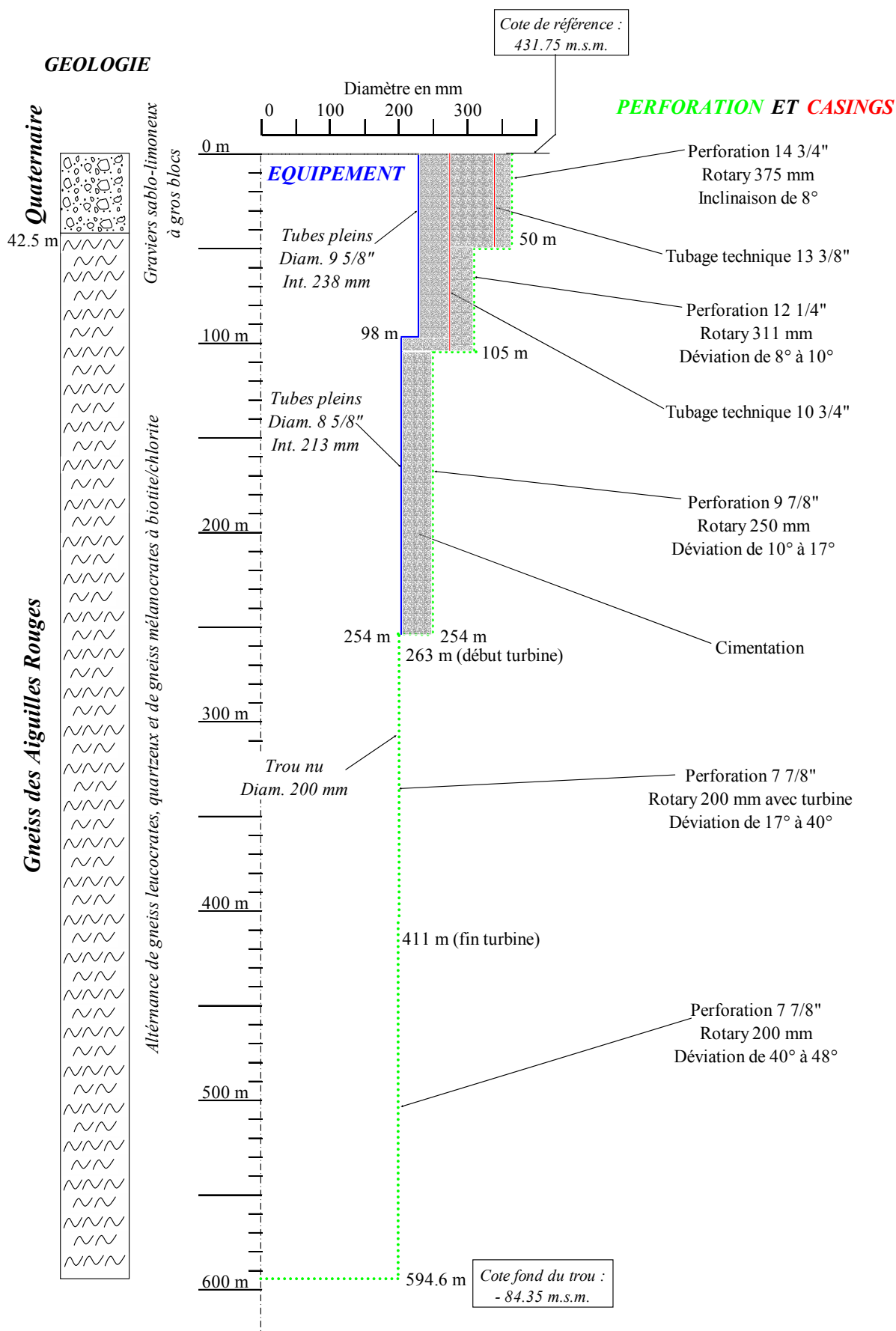
ANNEXE 12 : Localisation des principales venues d'eau dans le forage P600 d'après les diagraphies. Le principal apport se situe à 447 m.



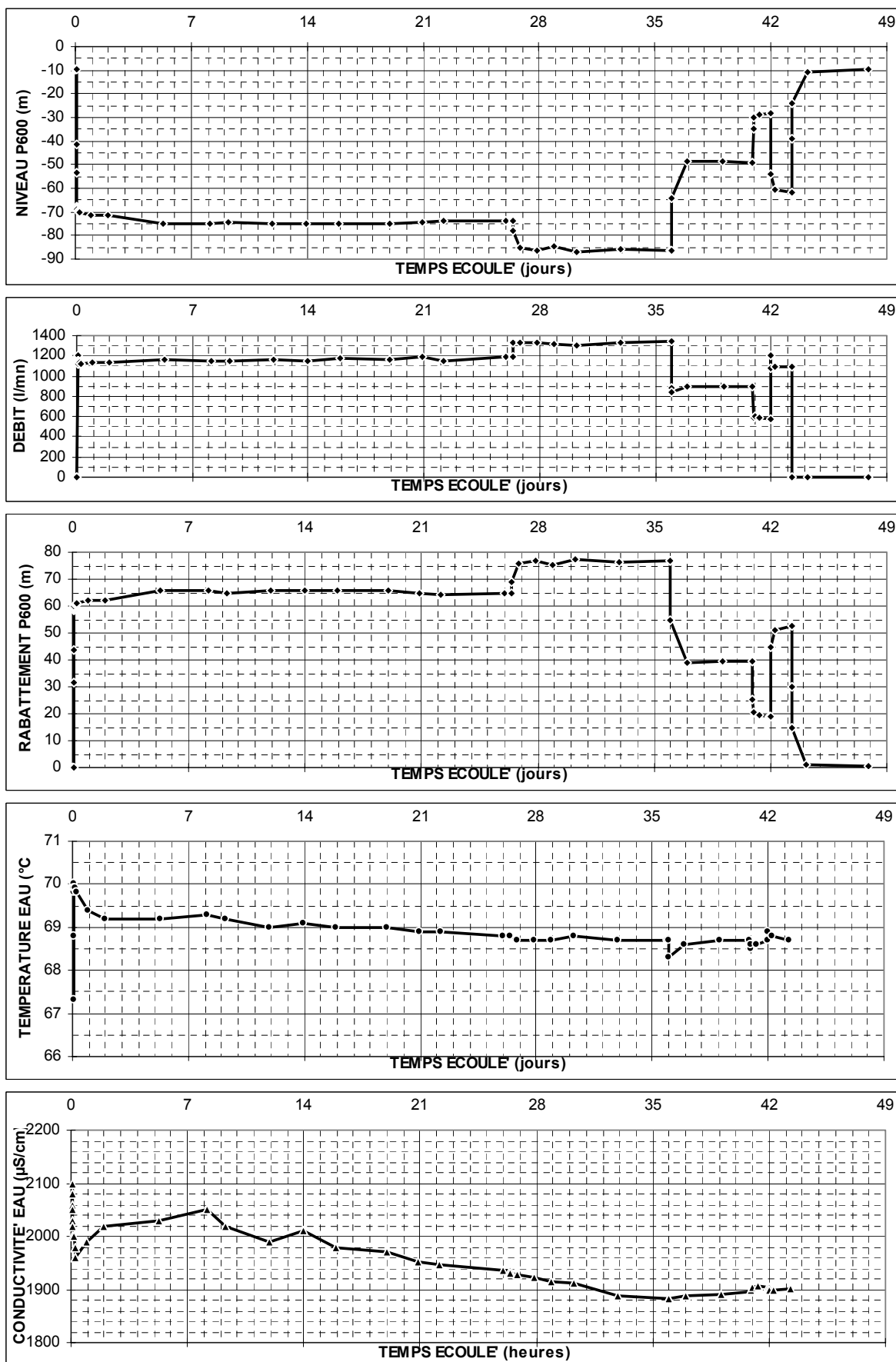
ANNEXE 13 : Tronçons testés par les pompages effectués durant la phase de perforation du P600 et principaux résultats.



ANNEXE 14 : Log géologique/technique du forage P600 et équipement.



ANNEXE 15 : Test de production dans le P600 (6.5 – 18.6.98): évolution des principaux paramètres contrôlés lors du pompage.

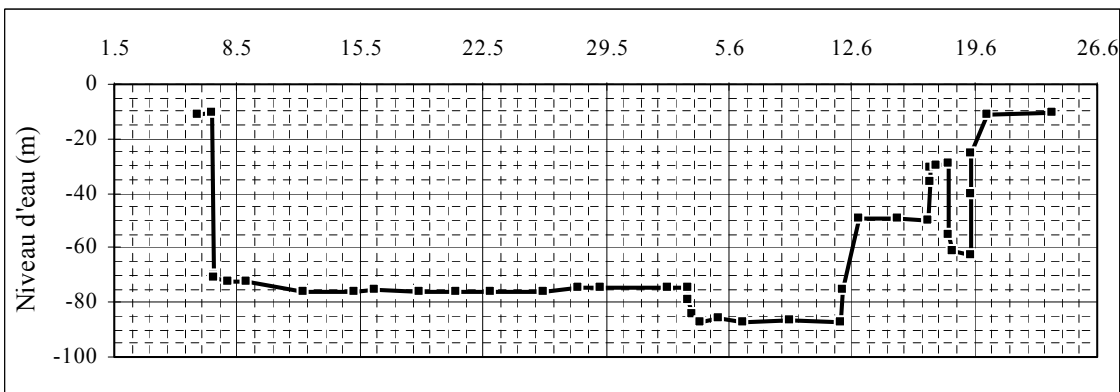


ANNEXE 16 : Analyses chimiques de l'eau du puits P600 et comparaison avec celle du puits P201.

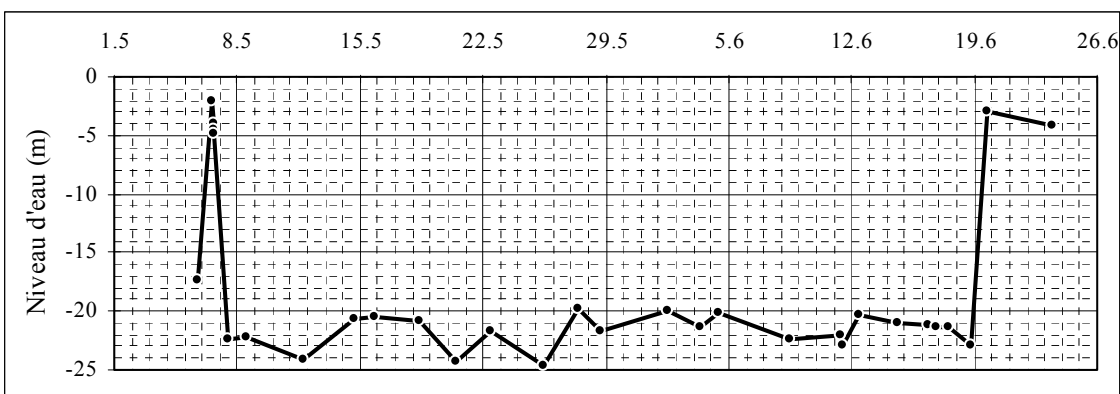
GENERALITES	P600	P600	P600	P600	P600	P600	P600	P600	P201
Forage	P600	P600	P600	P600	P600	P600	P600	P600	P201
Pompage / air-lift	Air-lift N°1	Air-lift N°2	Pomp. N°1	Pomp. N°2	Pomp. N°2	Pomp. N°3	Pomp. N°5	Production	Pompage
Date	11.08.97	19.08.97	21.08.97	12.09.97	12.09.97	27.09.97	08.10.97	11.06.98	12.08.88
MESURES IN SITU									
Température eau (°C)	28.5	45.1	54.3	67.6	64.4	67.6	68.6	68.7	61.4
Conductivité (µS/cm)	1572	1956	1798	1851	1843	1962	1983	1882	1833
Débit (l/mn)	50	105	104	295	100	910	1100	1340	250
Niveau d'eau (m)	-64.40	-90.00	-87.95	-67.40	-19.02	-36.92	-54.35	-86.25	-10.55
Rabatement (m)	64.40	87.29	76.81	58.30	9.92	26.97	44.96	76.88	9.25
pH	7.9	7.2	8.3	6.6	7.7	7.7	7.7	7.5	8.0
ANALYSE CHIMIQUE									
TSD (mg/l)	982	1425	1340	1392	1374	1342	1350	1340	1274
CATIONS	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Li			3.200	3.300	3.300	3.200	3.500	3.500	3.200
Na	286.2	422.9	382.1	389.1	380.5	353.7	371.8	359.0	331.0
K	13.0	17.2	12.7	10.5	10.4	9.9	9.6	11.5	15.0
Mg	6.1	0.6	0.6	0.3	0.2	1.8	1.8	1.6	2.5
Ca	50.8	50.8	42.6	47.8	48.5	53.4	51.6	54.0	53.0
Sr			1.6	1.9	1.9	2.0	2.2	0.9	1.1
ANIONS	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
F			7.7	7.1	7.0	6.3	6.8	5.9	6.6
Cl	171.1	252.3	222.5	241.3	240.3	218.9	223.1	204.0	221.0
SO4	281	541	527	552	558	559	535	560	490
HCO3	174	140	92	85	70	85	82	79	82
NON DISSOCIES	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
SiO2			49.0	53.3	53.7	47.7	62.0	60.0	69.0
BALANCE IONIQUE									
Somme cations (méq/l)	15.82	21.42	19.62	20.12	19.77	18.96	19.70	19.26	18.12
Somme anions (méq/l)	13.53	20.68	19.15	20.08	19.91	19.56	19.14	19.02	18.13

ANNEXE 17 : Test de production dans le P600 (6.5 – 18.6.98): évolution des principaux paramètres contrôlés au puits P201.

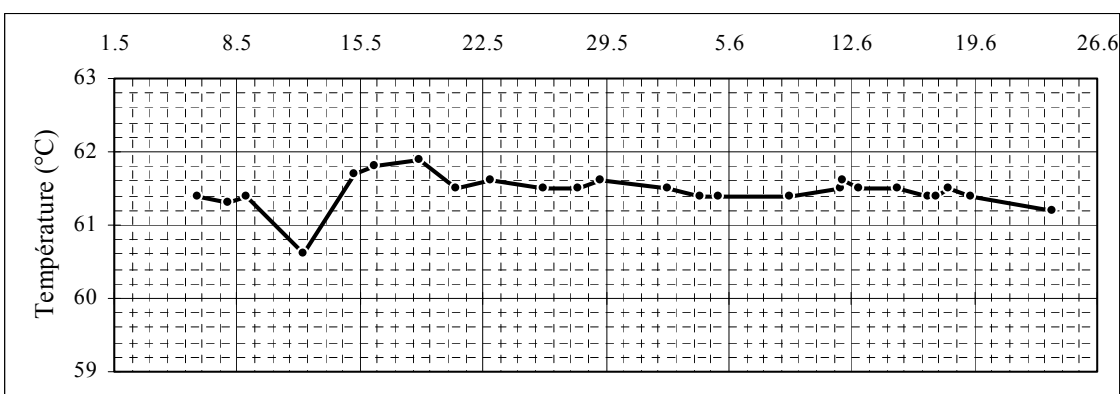
**FORAGE
P600**



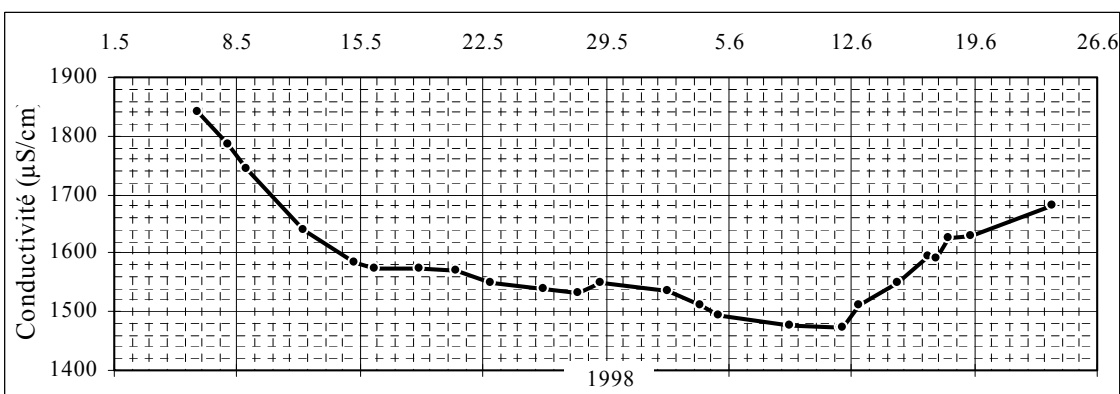
**FORAGE
P201**



**FORAGE
P201**



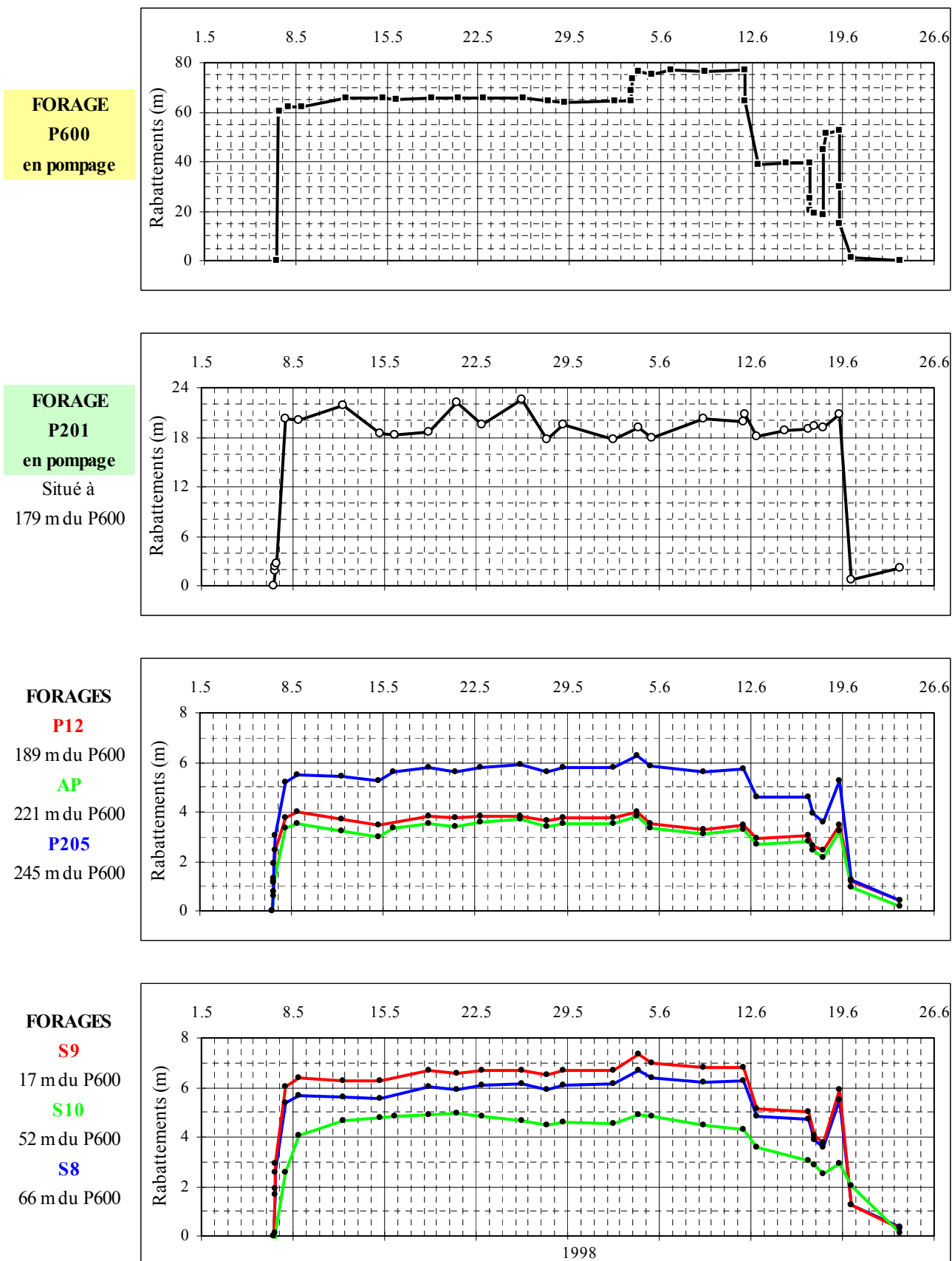
**FORAGE
P201**



ANNEXE 18 : Analyses chimiques de l'eau du puits P201 et comparaison avec celle du puits P600.

GENERALITES									
Forage	P201	P201	P201	P201	P201	P201	P201	P201	P600
Situation	Analyse Högl	Analyse Senften	10 mois avant perforation P600	3 mois avant perforation P600	2 mois après perforation P600	Pendant test de production dans P600	A la fin du 2.ème palier du test de production	2 mois après test de production	A la fin du 2.ème palier du test de production
Date prélèvement	28.08.73	12.08.88	08.10.96	14.05.97	18.11.97	12.05.98	11.06.98	28.07.98	11.06.98
MESURES IN SITU									
Température eau (°C)	62.0	61.4	61.8	62.0	58.8	61.5	61.6	60.9	68.7
Conductivité (µS/cm)	1720	1833	1749	1693	1766	1559	1473	1817	1882
Débit (l/mn)		250					380	320	1340
Niveau d'eau (m)		-10.55					-22.90	-16.60	-86.25
Rabatement (m)		9.25					21.60	15.30	76.88
pH	7.8	8.0	8.0	7.9	7.7	7.8	7.6	7.5	7.5
ANALYSE CHIMIQUE									
TSD (mg/l)	1282	1274	1291	1240	1212	1148	1091	1335	1339
CATIONS	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Li	3.200	3.200					3.000	4.800	3.500
Na	335.0	331.0	337.0	350.0	321.0	330.0	272.0	362.0	359.0
K	13.3	15.0	10.3	10.5	10.5	10.1	9.4	11.1	11.5
Mg	3.0	2.5	2.0	2.1	3.4	2.5	3.7	3.9	1.6
Ca	52.1	53.0	54.0	54.0	53.0	49.0	56.0	64.0	54.0
Sr	2.0	1.1					1.1	1.3	0.9
ANIONS	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
F	6.7	6.6					4.9	5.6	5.9
Cl	222.0	221.0	232.0	221.0	227.0	193.0	154.0	206.0	204.0
SO4	490	490	568	519	513	476	436	540	560
HCO3	89	82	88	83	84	88	100	81	79
NON DISSOCIES	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
SiO2	66.2	69.0					51.0	56.0	60.0
BALANCE IONIQUE									
Somme cations (méq/l)	18.27	18.12	17.78	18.36	17.16	17.26	15.63	20.27	19.26
Somme anions (méq/l)	18.27	18.13	19.81	18.40	18.46	16.79	15.32	18.67	19.02

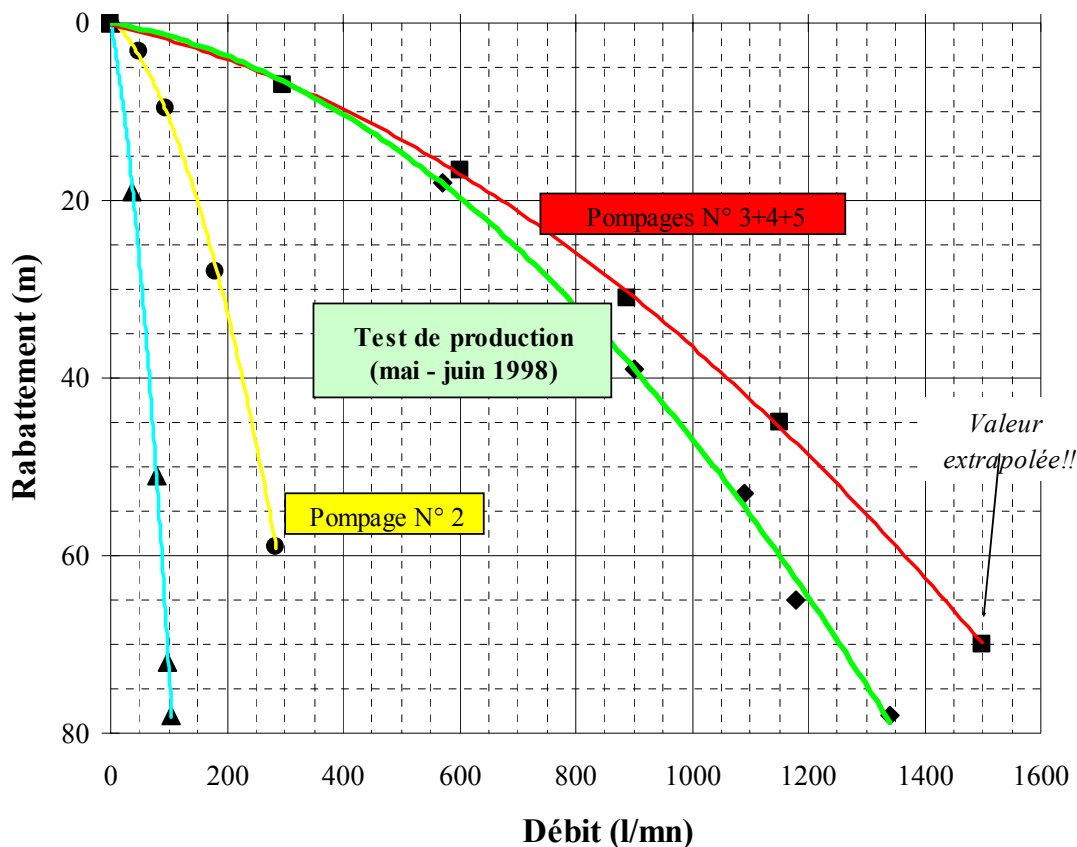
ANNEXE 19 : Test de production dans le P600 (6.5 – 18.6.98): évolution des rabattements dans les deux puits de pompage et dans les forages profonds environnants.



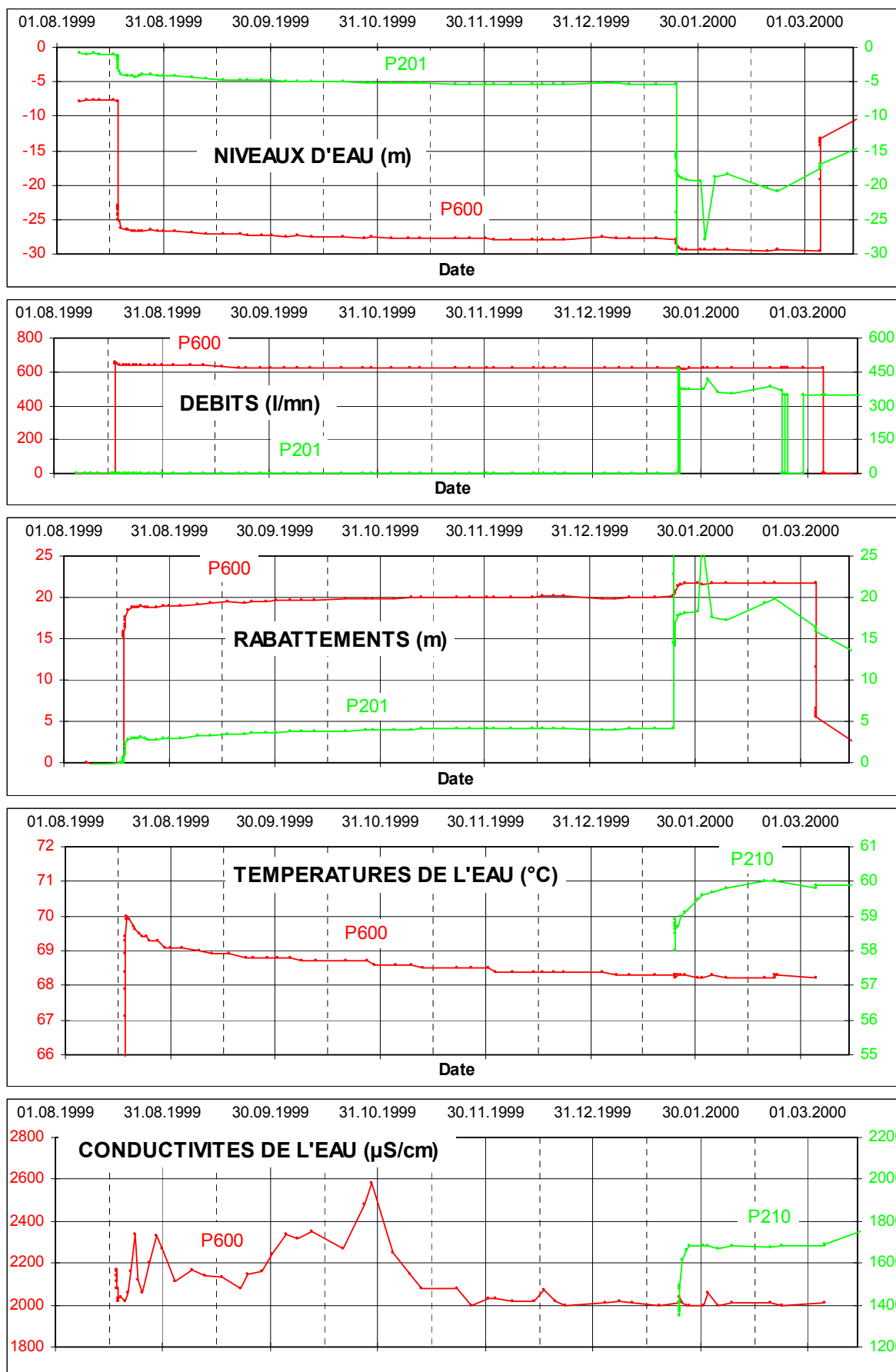
ANNEXE 20 : Courbes caractéristiques obtenues à partir des tests de pompage (avant équipement) et du test de production réalisé après l'équipement du forage P600. A remarquer la baisse de productivité intervenue entre octobre 1997 (avant équipement) et juin 1998 (après équipement).

Pompage N°1		Pompage N°2		Pompages N°3+4+5		TEST DE PRODUCTION	
Avant équipement 21 - 22 août 1997 Durée : 22 heures Passe de 105 à 254 m		Avant équipement 11 - 12 sept. 1997 Durée : 32 heures Passe de 254 à 411 m		Avant équipement du 29 sept. au 8 oct. 1997 Durée totale : 125 heures Passe de 254 à 595 m		Après équipement 6 mai - 18 juin 1998 Durée : 43 jours Passe de 105 à 254 m	
Débit (l/mn)	Rabatt. (m)	Débit (l/mn)	Rabatt. (m)	Débit (l/mn)	Rabatt. (m)	Débit (l/mn)	Rabatt. (m)
0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
38	19.0	50	3.2	297	7.0	570	18.0
79	51.0	95	9.5	600	16.5	900	39.0
99	72.0	180	28.0	890	31.0	1090	53.0
105	78.0	285	59.0	1150	45.0	1180	65.0
				1500	70.0	1340	78.0
Température : 55.7 °C Conduct. : 1'775 µS/cm		Température : 67.6 °C Conduct. : 1'850 µS/cm		Température : 68.9 °C Conduct. : 2'000 µS/cm		Température : 68.7 °C Conduct. : 1'950 µS/cm	

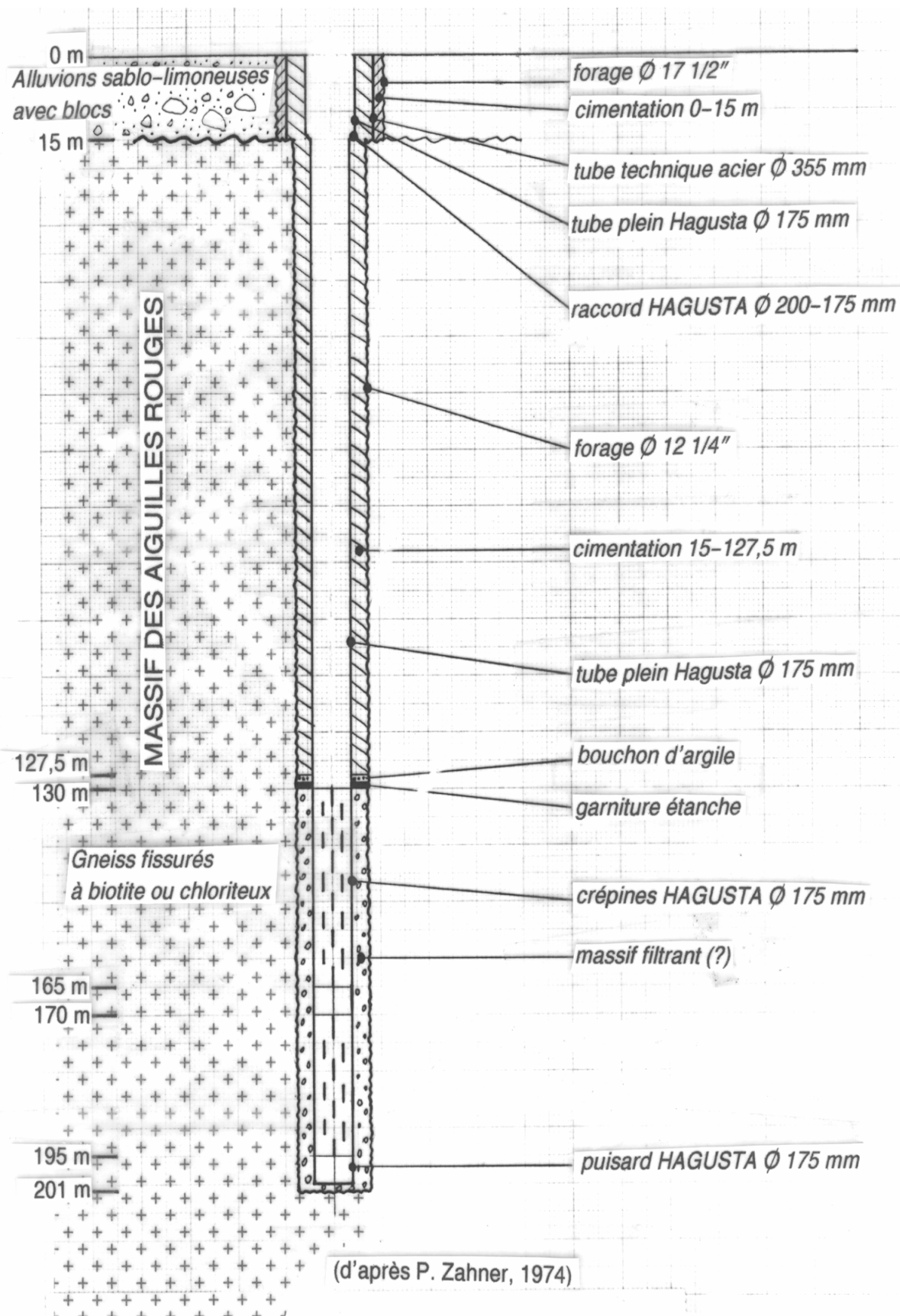
COURBE CARACTERISTIQUE DU FORAGE P600



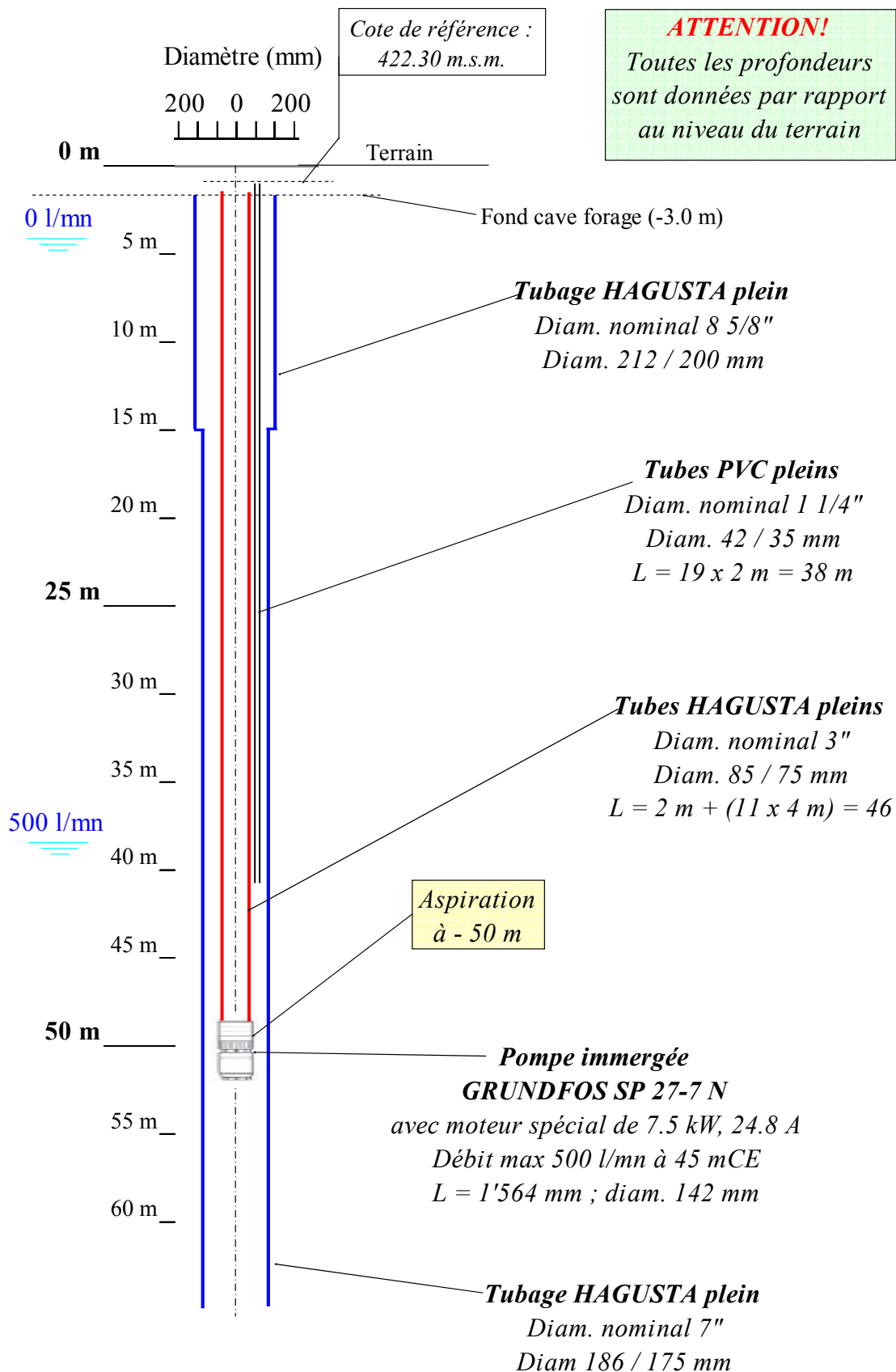
ANNEXE 21 : Pompage de longue durée dans le P600 (18.8.99 – 5.3.00) : évolution des paramètres mesurés dans les puits P600 et P201.



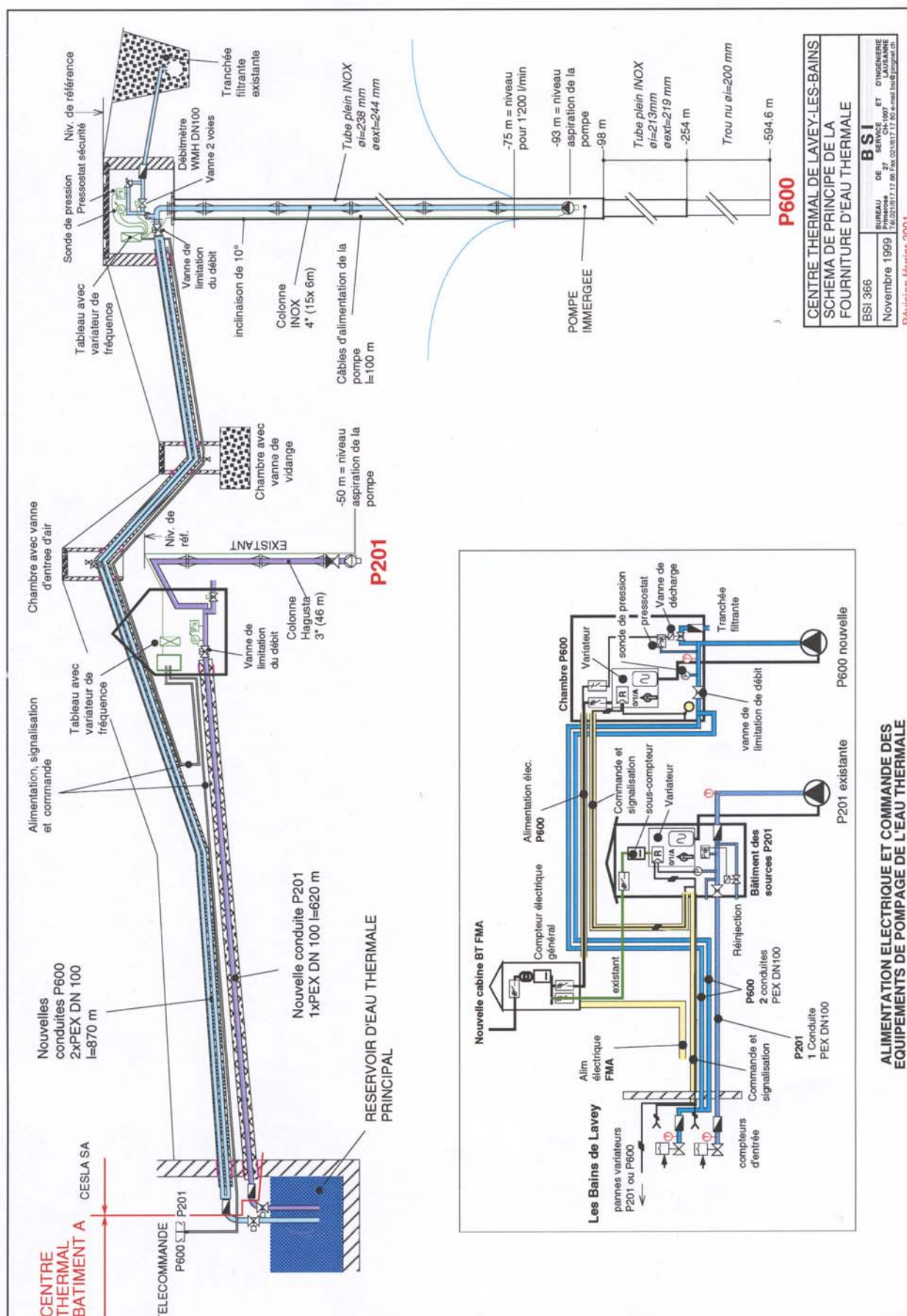
ANNEXE 22 : Log géologique/technique du forage P201 (réalisé en 1973) et équipement.



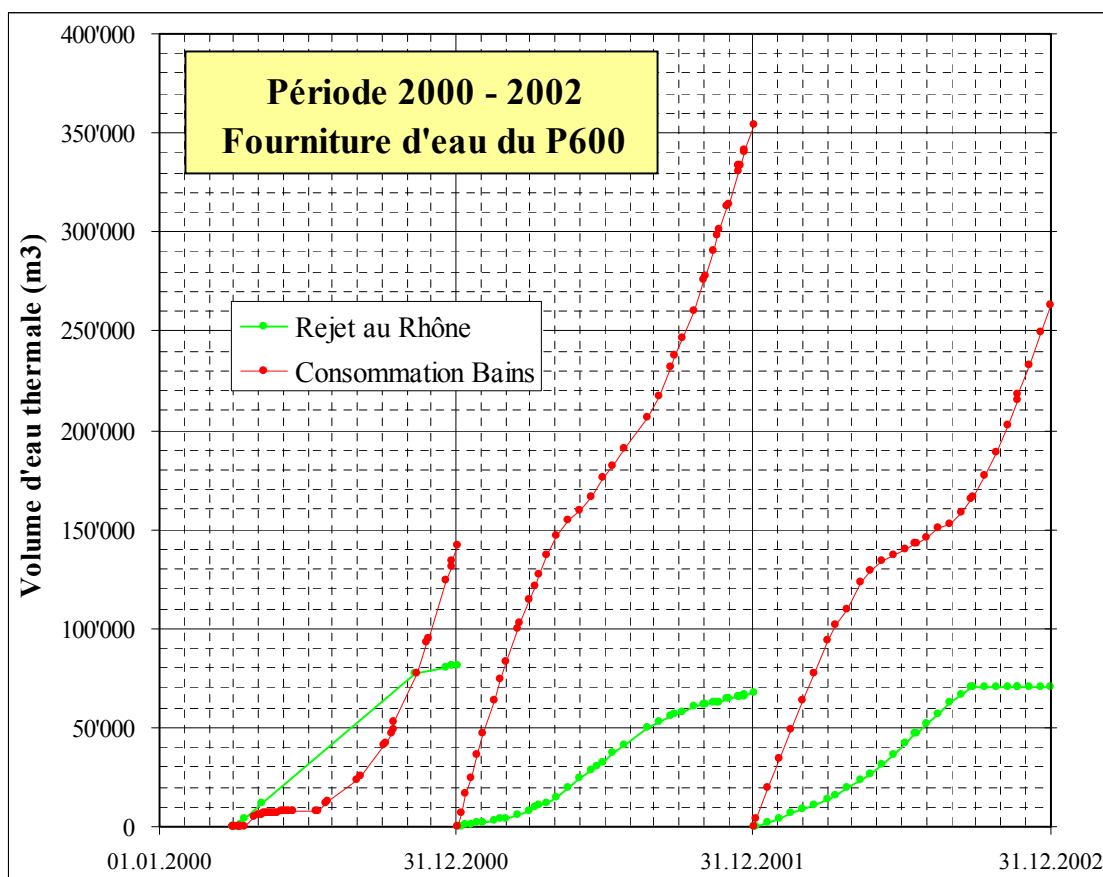
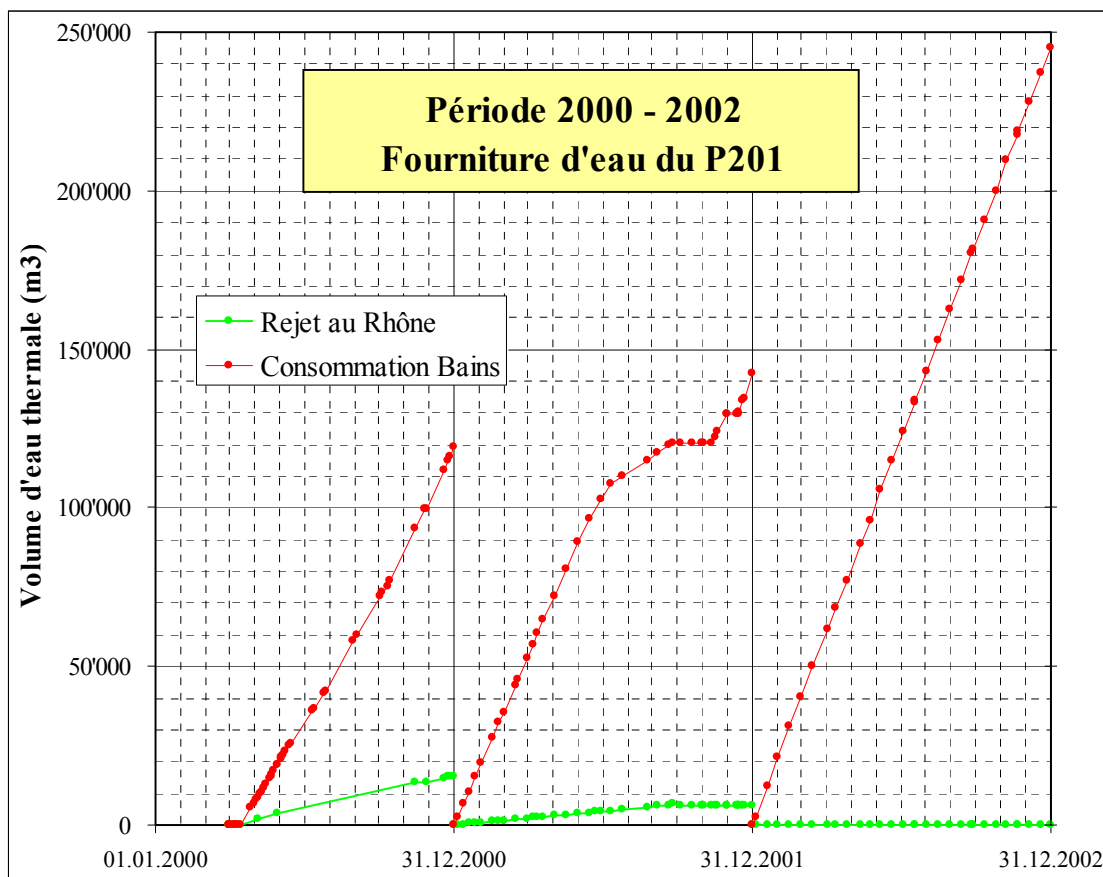
ANNEXE 23 : Détail de la chambre de pompage et de l'emplacement de la pompe immergée dans le forage P201.



ANNEXE 24 : Schéma des conduites pour le transport de l'eau thermique (BSI, 1999).



ANNEXE 25 : Fourniture d'eau thermique et rejets avant consommation par les Bains durant la période mars 2000 – décembre 2002. Environ 1.5 Mio. de m³ d'eau ont été pompés!



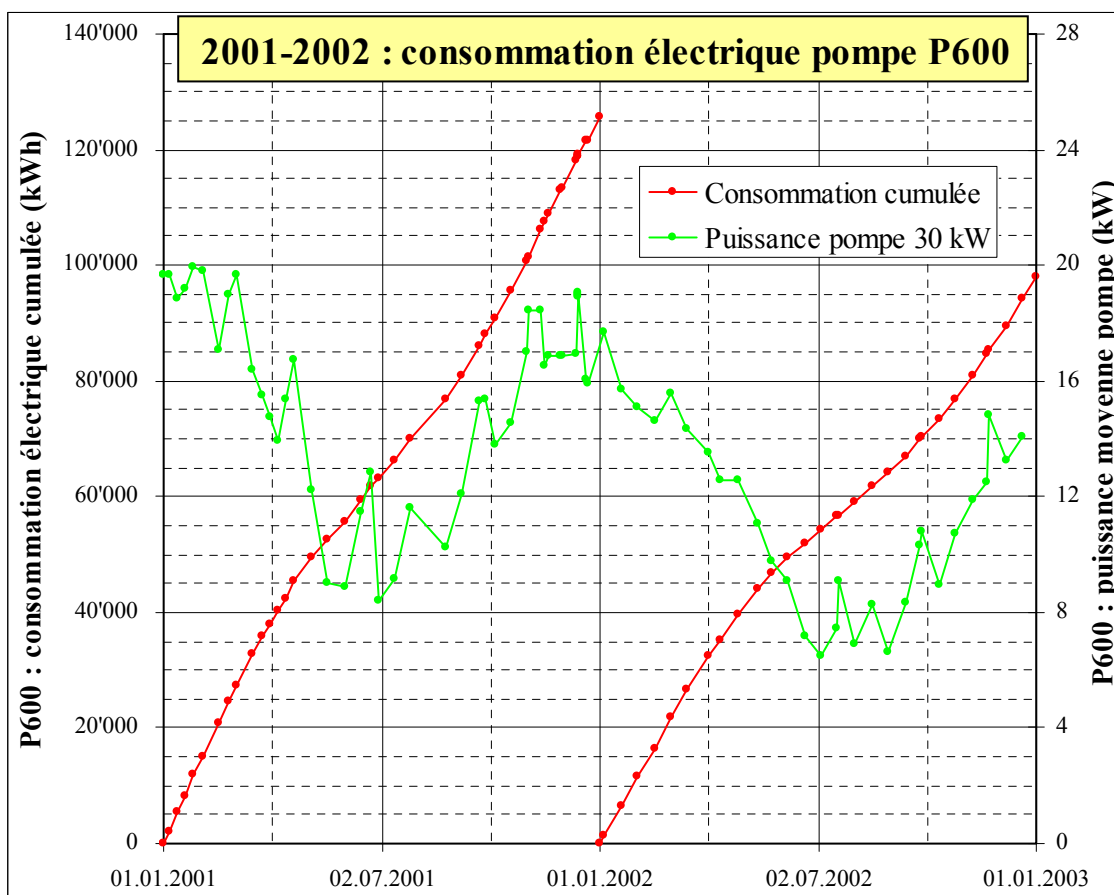
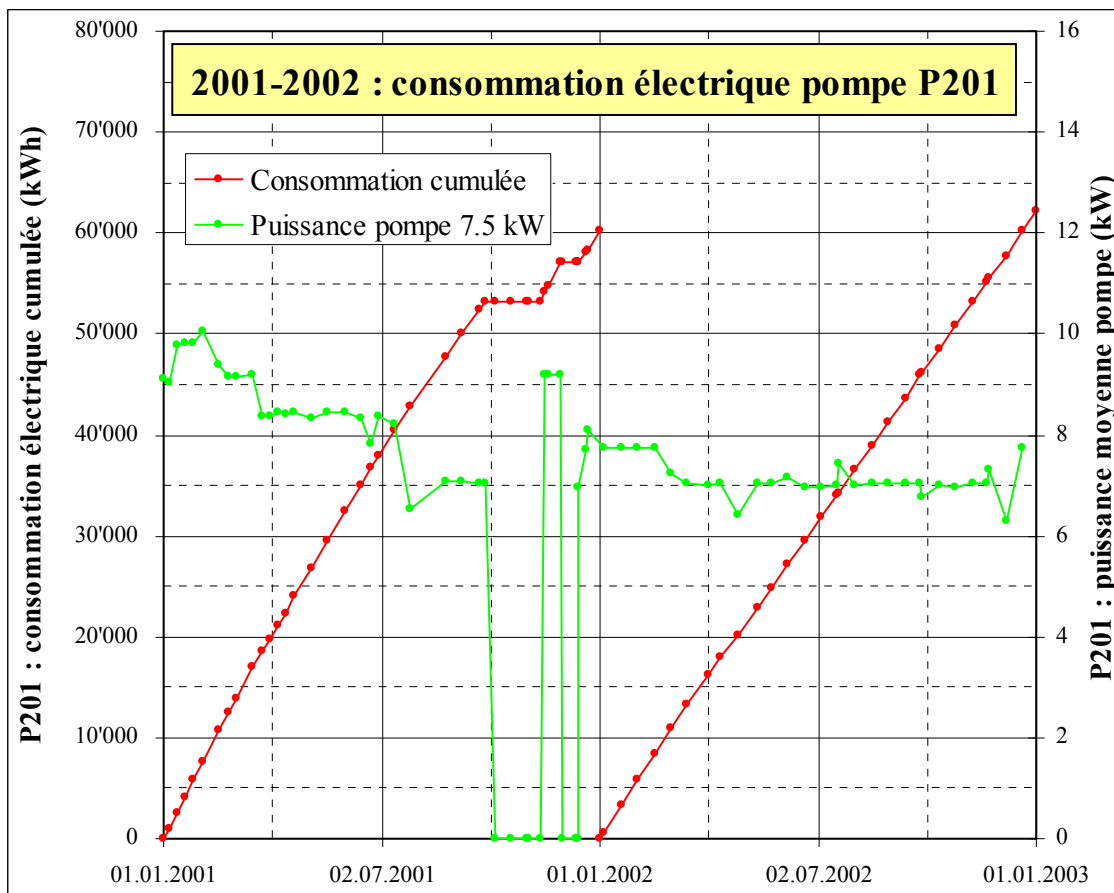
ANNEXE 26 : Gestion du pompage au P600 : synthèse des valeurs mesurées durant la période 2000 – 2002..

P600 : VOLUMES D'EAU THERMALE POMPEE, FOURNIE ET REJETEE			
Année	2000	2001	2002
Volume fourni au Bains	141'464 m3	353'844 m3	262'729 m3
Débit moyen annuel fourni	356 l/mn	679 l/mn	500 l/mn
Volume rejeté	81'236 m3	67'390 m3	70'516 m3
Débit moyen annuel rejeté	205 l/mn	129 l/mn	134 l/mn
Volume total pompé	222'700 m3	421'234 m3	333'245 m3
Débit moyen annuel pompé	561 l/mn	809 l/mn	634 l/mn
P600 : CONSOMMATION ELECTRIQUE POMPES IMMERGEES + PARAMETRES VARIATEUR			
Année	2000	2001	2002
Puissance pompe	30.0 kW	30.0 kW	30.0 kW
Consommation électrique	57'332 kWh	125'742 kWh	98'087 kWh
Consommation spécifique	0.26 kWh/m3	0.30 kWh/m3	0.29 kWh/m3
Puissance calculée (max / min)	-	19.9 / 8.4 kW	17.7 / 6.5 kW
Fonctionnement (heures)	6'617 h	8'680 h	8'760 h
Fonctionnement (jours)	276 j	362 j	365 j
Fréquence (max / min)	---	47.4 / 30.0 Hz	47.3 / 30.0 Hz
Ampérage (max / min)	---	43.7 / 18.8 A	43.5 / 19.9 A
Pression (max / min)	---	3.0 / 0.0 bars	2.8 / 1.0 bars
P600 : PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES			
Année	2000	2001	2002
Débit (max / min)	1'210 / 0 l/mn	1'240 / 280 l/mn	1'200 / 280 l/mn
Niveau d'eau (max / min)	-65.0 / -9.8 m	-65.4 / -15.6 m	-61.4 / -16.5 m
Débit spécifique (max / min)	34 / 18 l/mn.m	41 / 11 l/mn.m	34 / 21 l/mn.m
Temp. eau tête puits (max / min) ¹	68.3 - 66.2 °C	66.8 - 65.2 °C	66.3 - 65.0 °C
Temp. eau entrée Bains (max / min)	-	66.2 - 63.4 °C	65.8 - 62.2 °C
Conductivité eau thermique	2'060 / 1'694 µS/cm	1'746 / 1'599 µS/cm	1'727 / 1'632 µS/cm

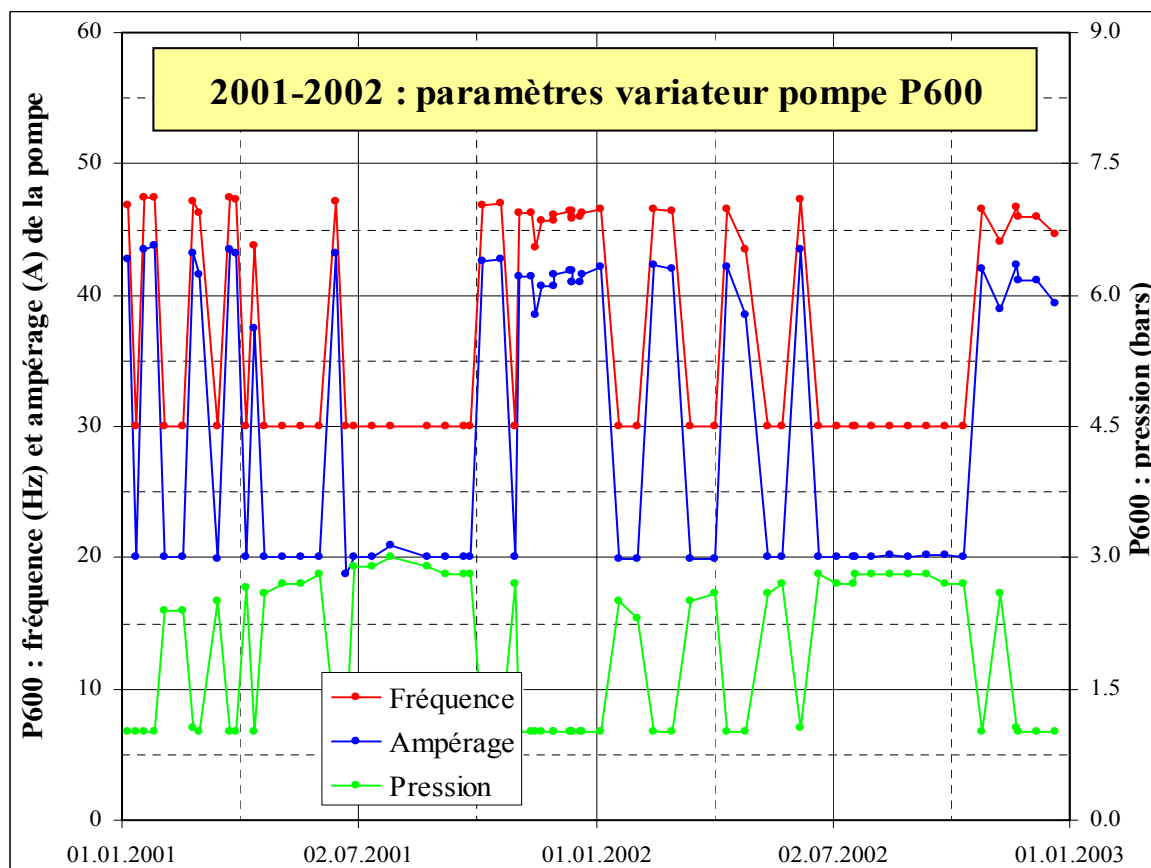
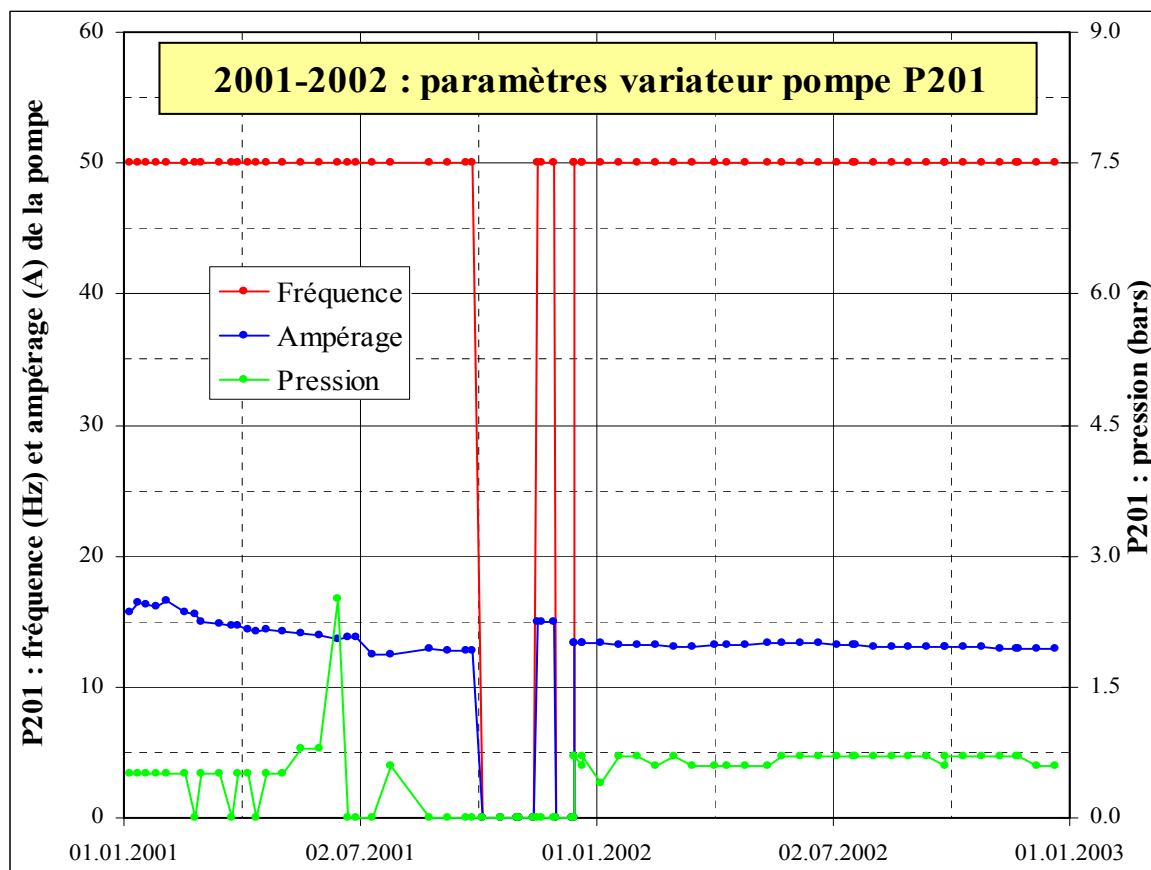
ANNEXE 27 : Gestion du pompage au P201 : synthèse des valeurs mesurées durant la période 2000 – 2002..

P201 : VOLUMES D'EAU THERMALE POMPEE, FOURNIE ET REJETEE			
Année	2000	2001	2002
Volume fourni au Bains	119'415 m3	142'501 m3	245'122 m3
Débit moyen annuel fourni	319 l/mn	325 l/mn	466 l/mn
Volume rejeté	15'235 m3	6'408 m3	280 m3
Débit moyen annuel rejeté	41 l/mn	15 l/mn	1 l/mn
Volume total pompé	134'650 m3	148'909 m3	245'402 m3
Débit moyen annuel pompé	360 l/mn	340 l/mn	467 l/mn
P201 : CONSOMMATION ELECTRIQUE POMPES IMMERGEES + PARAMETRES VARIATEUR			
Année	2000	2001	2002
Puissance pompe	7.5 kW	7.5 kW	7.5 kW
Consommation électrique	52'720 kWh	60'261 kWh	62'189 kWh
Consommation spécifique	0.39 kWh/m3	0.40 kWh/m3	0.25 kWh/m3
Puissance calculée (max / min)	-	10.0 / 6.5 kW	7.7 / 6.3 kW
Fonctionnement (heures)	6'240 h	7'298 h	8'760 h
Fonctionnement (jours)	260 j	304 j	365 j
Fréquence (max / min)	---	50.0 / 50.0 Hz	50.0 / 50.0 Hz
Ampérage (max / min)	---	16.6 / 12.4 A	13.4 / 12.9 A
Pression (max / min)	---	2.5 / 0.0 bars	0.7 / 0.4 bars
P201 : PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES			
Année	2000	2001	2002
Débit (max / min)	445 / 0 l/mn	500 / 0 l/mn	480 / 450 l/mn
Niveau d'eau (max / min)	-30.5 / -2.3 m	-32.9 / -5.6 m	-38.1 / -32.6 m
Débit spécifique (max / min)	27 / 15 l/mn.m	24 / 14 l/mn.m	15 / 13 l/mn.m
Temp. eau tête puits (max / min) ¹	60.6 - 58.6 °C	59.7 - 56.9 °C	59.3 - 58.8 °C
Temp. eau entrée Bains (max / min)	-	58.3 - 55.0 °C	58.3 - 57.5 °C
Conductivité eau thermique	1'789 / 1'304 µS/cm	1'432 / 1'205 µS/cm	1'444 / 1'236 µS/cm

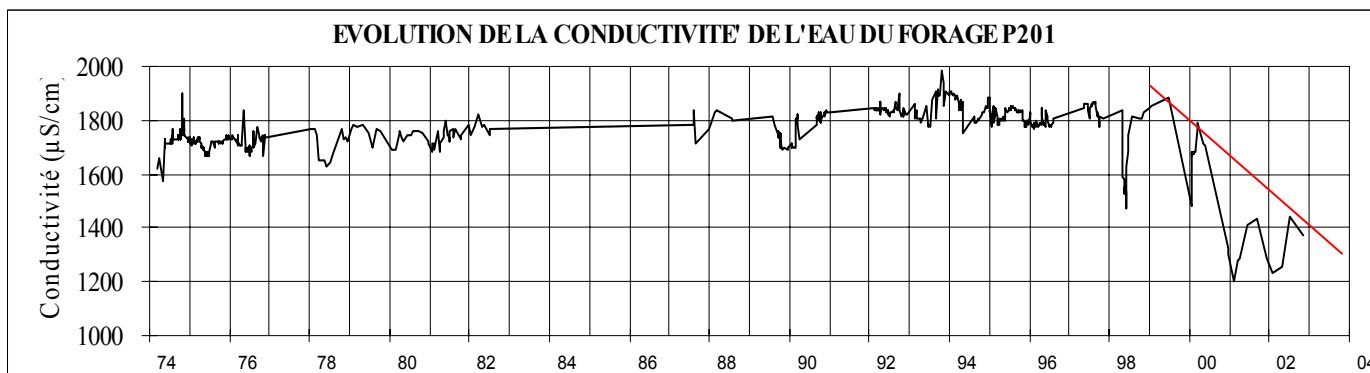
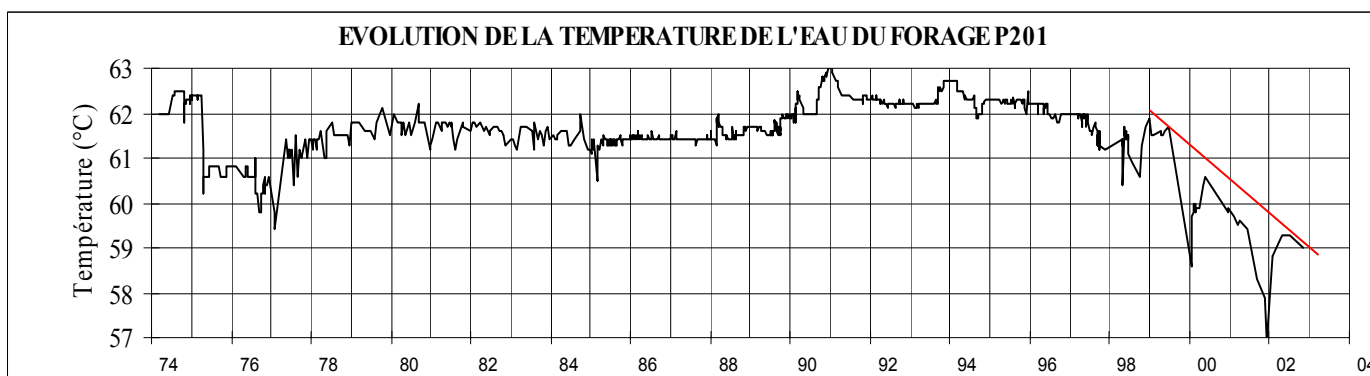
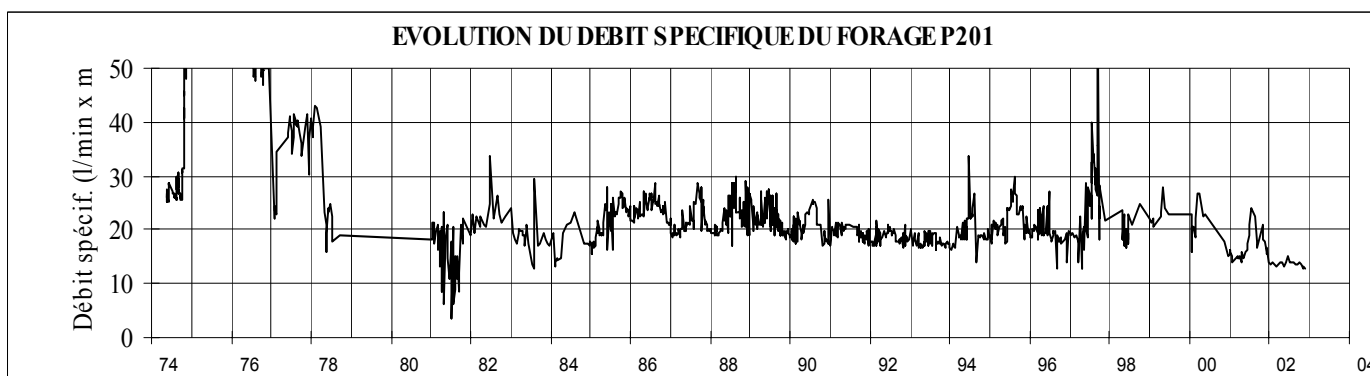
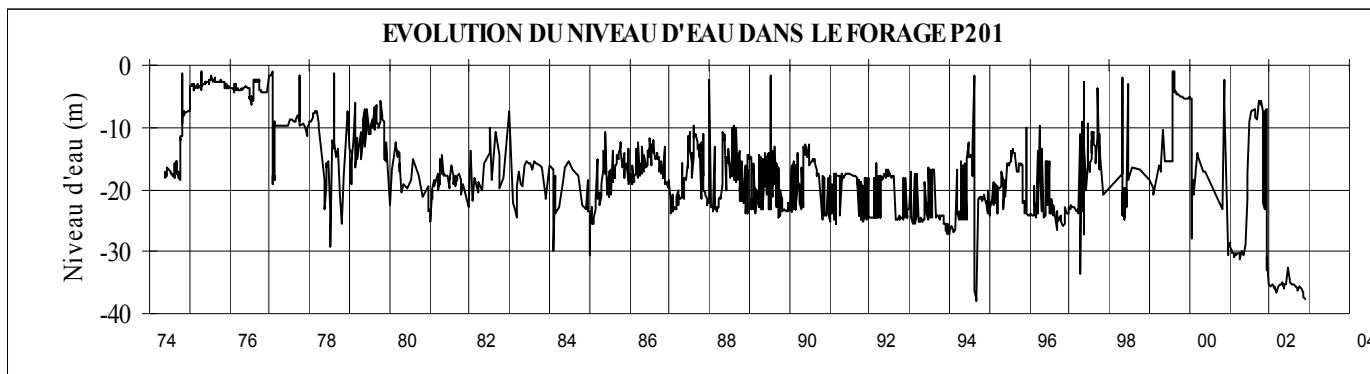
ANNEXE 28 : Consommation électrique pour chacune des pompes immergées et puissances calculées.



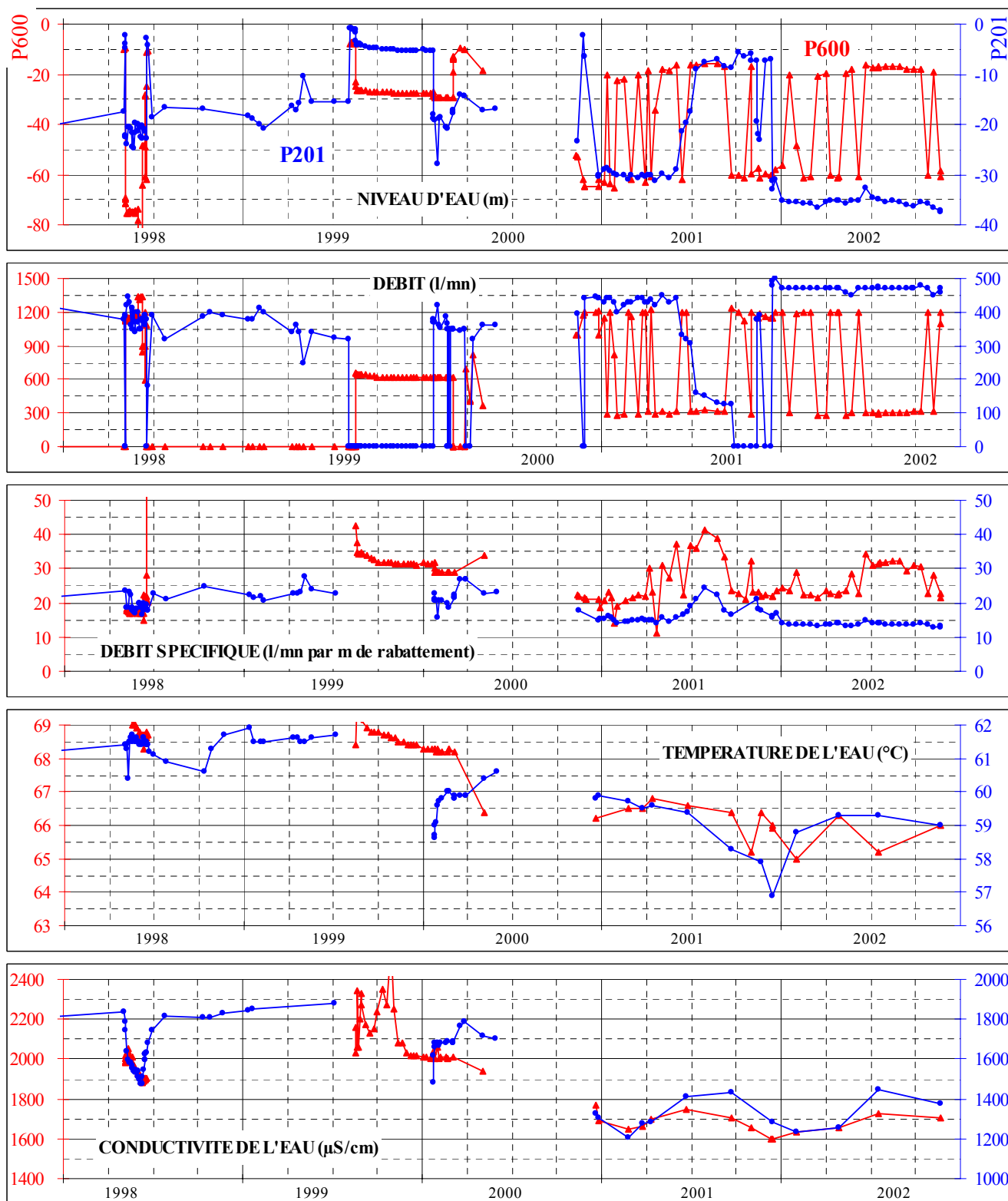
ANNEXE 29 : Pression en tête de puits, fréquence des pompes et ampérage relevés aux variateurs de fréquence. Les fortes variations pour le P600 sont dues au mode d'exploitation à débit variable.



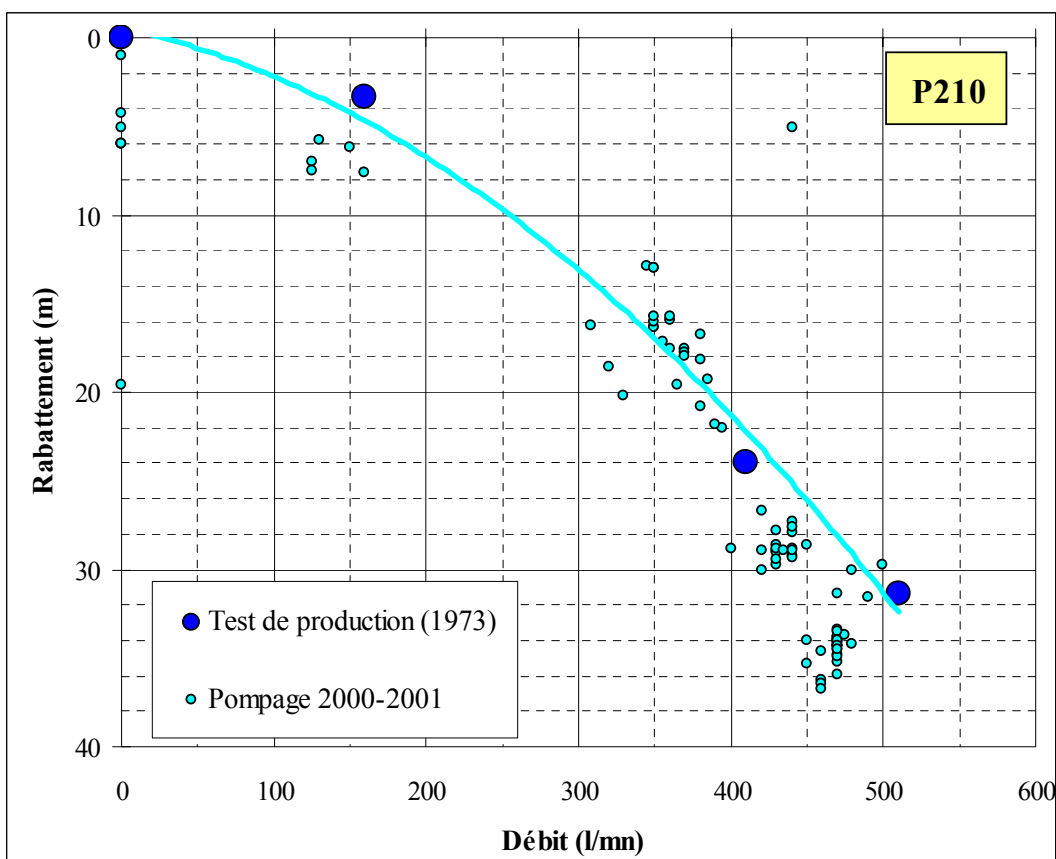
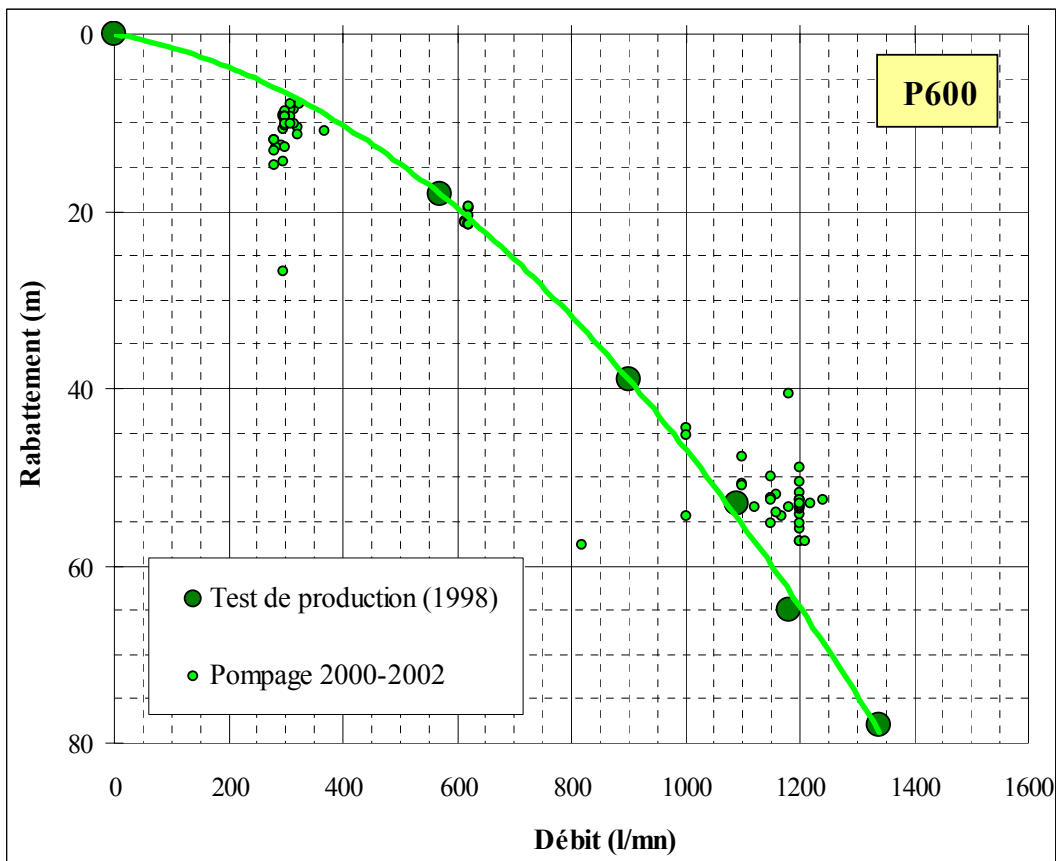
ANNEXE 30 : Evolution des principaux paramètres hydrauliques et physico-chimiques du puits P201, qui est exploité depuis 1973. On remarque l'influence des pompages réalisés depuis 1998 au P600, toutefois les changements restent contenus en ce qui concerne les niveaux. Par contre, on observe depuis janvier 1999 une baisse de la température de l'eau de 3.2°C, qui se poursuit actuellement, et une diminution de la conductivité électrique de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



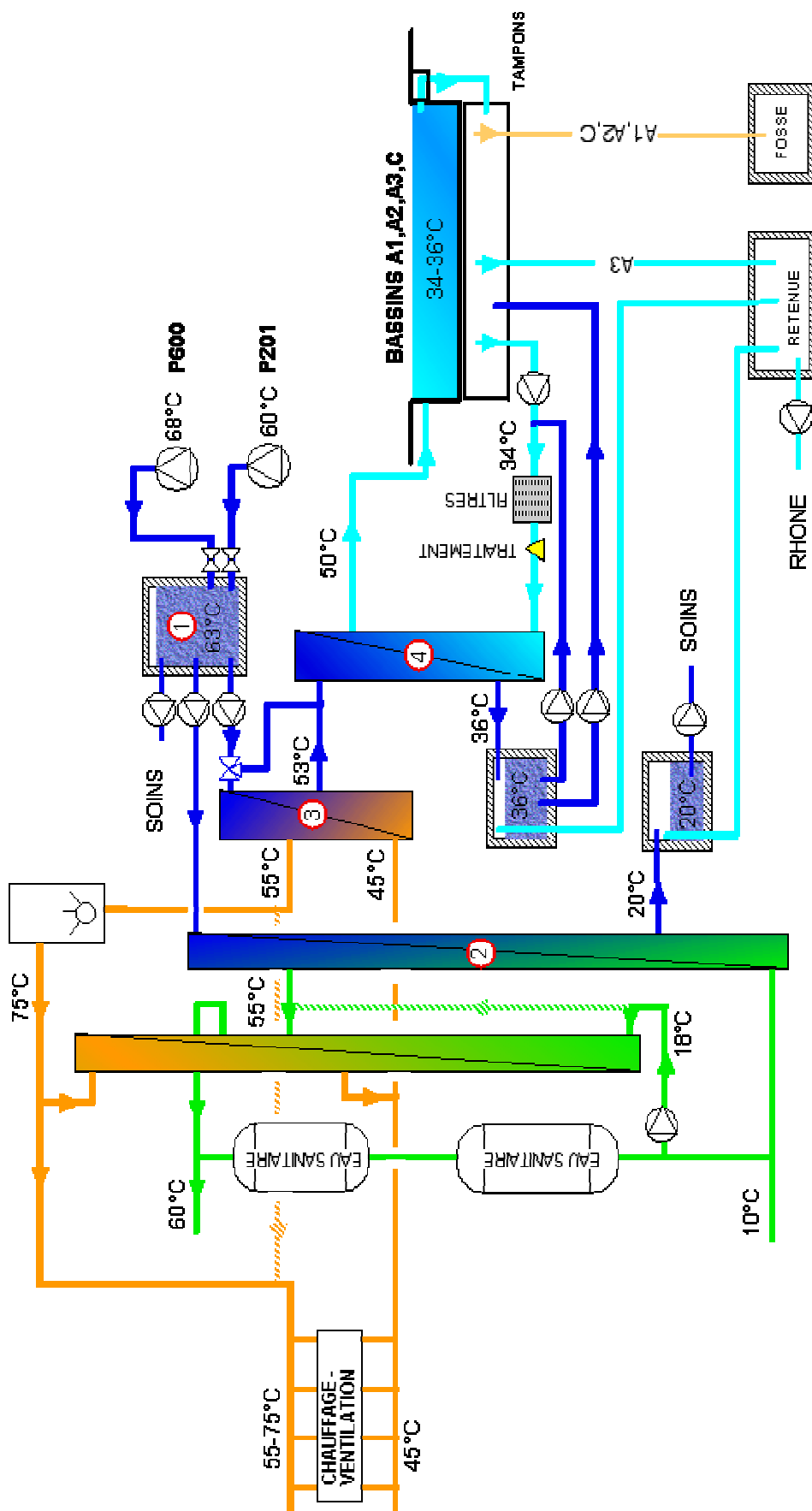
ANNEXE 31 : Evolution des principaux paramètres hydrauliques et physico-chimiques des puits P201 et P600, durant la période 1998 – 2002 (mesures manuelles). On remarque la dérive à la baisse des températures et des conductivités de l'eau thermique, qui témoigne de l'impact des pompages à forts débits sur le chimisme des eaux souterraines.



ANNEXE 32 : *Courbes caractéristiques des puits de pompage et représentation des mesures de niveaux effectuées en 2000-2002. La productivité du P201 n'a pas été affectée, hormis un faible rabattement supplémentaire, par la mise en service du pompage dans le P600.*



ANNEXE 31 : Schéma de principe simplifié des installations du centre thermal (BSI, 2001).



DOSSIER PHOTOGRAPHIQUE

PHOTO 1 : Tête du puits géothermique P600.

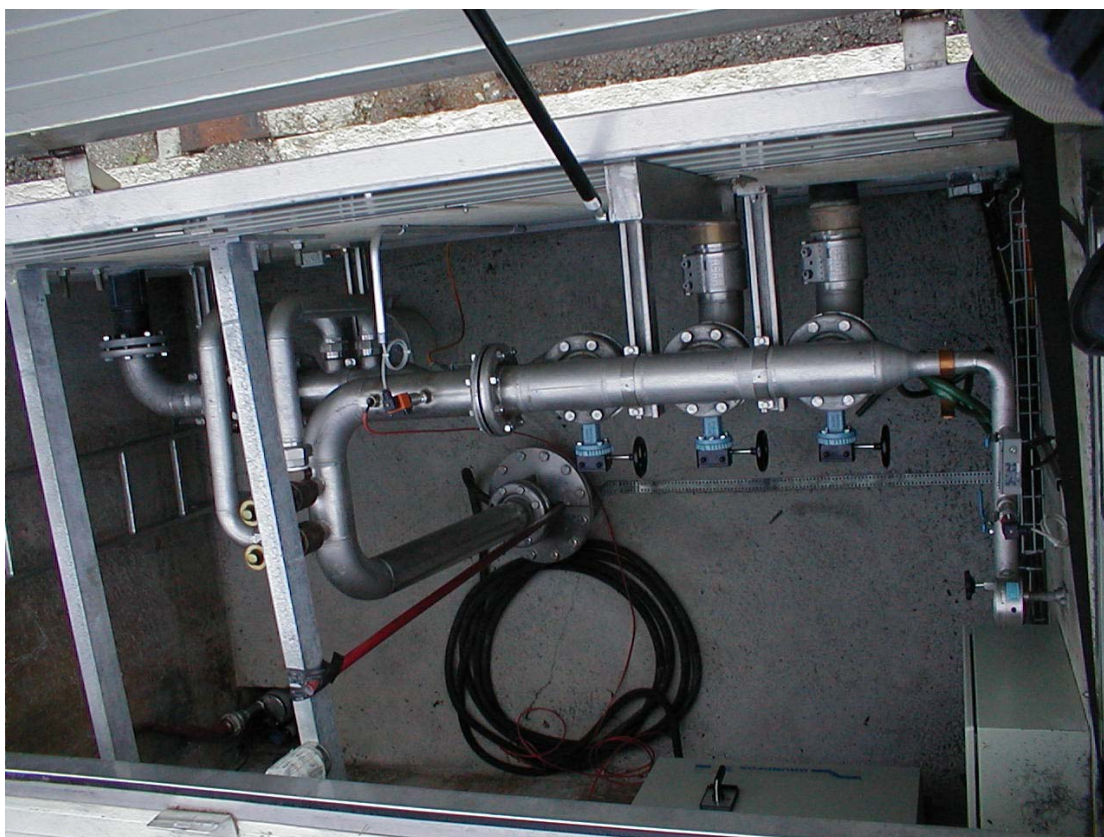
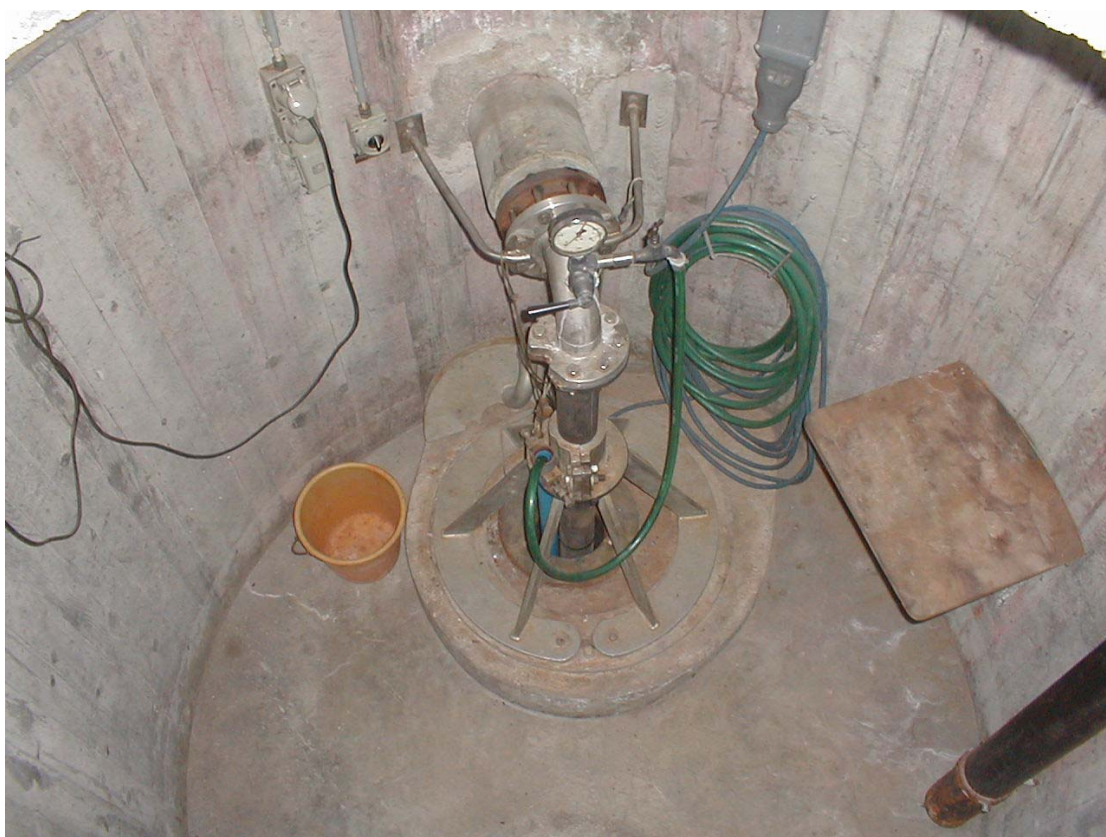


PHOTO 2 : Tête du puits géothermique P201.



PHOTOS 3 : Chantier du forage P600. En bas une vue actuelle de la place du forage après remise en état. Un treuil spécial a été fabriqué pour ressortir la pompe sans faire intervenir une entreprise de forage.



PHOTOS 4 : Forage P600 : un air de champ géothermique néozélandais ...



PHOTOS 5 : Outils de forage utilisés pour la perforation du forage P600.



Masses-tiges pour la perforation du Quaternaire (premiers 50 m)



Tricônes pour perforation au rotary



Turbine 7" utilisée par Halliburton

PHOTOS 6 : Courts essais de pompage et test de production du forage P600 (mai - juin 1998). L'eau est tellement chaude que le revêtement bitumineux du bac à boue a littéralement fondu. Les grenouilles ont vite appris que cette mare n'était pas l'idéal pour faire de la "trempe".



PHOTOS 7 : Salle des machines du centre thermal de Lavey-les-Bains. Aucune pompe à chaleur n'est nécessaire, tout le travail est effectué par des échangeurs à plaque. Un vrai bonheur énergétique!



PHOTO 8 : Une équipe gagnante! (cherchez le géologue ...)



... il est tout à droite! Au centre, c'est le chef foreur, M. Winantz, un géant belge non seulement très compétent, mais d'une gentillesse exquise comme tous les autres foreurs de STUMP Sondages SA.

Un grand merci du fond du cœur à tous ceux qui ont participé à cette fabuleuse aventure!

- au Prof. François Zwahlen et au Dr. François Vuataz du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, pour leur appui scientifique et les précieux conseils;
- à MM. René Vuilleumier, Chef de la division Energie du Canton de Vaud et Président de CESLA SA, qui a lutté pour garder la ressource géothermale en mains vaudoises;
- à MM. Nicolas Herkommer, Alain Guidetti, Jacques Falconnier, Jacques-Victor Pitteloud et D.J. Z'Graggen, architectes et ingénieurs auprès du Service des Hospices cantonaux et du Service des Bâtiments de l'Etat de Vaud, pour la confiance qu'ils m'ont accordé;
- à M. Rüfenacht, grand manitou des forages profonds chez STUMP;
- à MM. Didier Cavalli, Laurent Pardigon Christian Flamm, Ketes Ouedraogo, Michel Marrel, Jean-Paul Burri, Denis Blant, Christian Flamm et Manuel Riond, tous géologues, pour leur aide dans divers domaines du projet;
- à MM. Olivier Graf, Pierre Krummenacher et Jean-Christophe Hadorn, ingénieurs
- aux Professeurs Henri Masson, Felice Jaffé, Daniel Favrat et Ladislaus Rybach, pour le support scientifique;
- à M. Winantz, chef foreur et à tous les foreurs et aide-foreurs de STUMP, pour leur disponibilité et savoir-faire;
- à MM. Michel Aymon, José Rodriguez, Henri Freymond, Gilbert Michaud, du service technique des Bains de Lavey, pour leur aide précieuse
- à M. Rouiller, Géologue cantonal du Valais, qui m'a permis de m'initier à la géothermie;
- à MM. Rolando Schrämml et Gérard André, respectivement ancien Directeur du Grand Hôtel des Bains et actuel Directeur des Bains de Lavey pour l'accueil fabuleux sur leur terres,
- à M. Harald Gorhan, représentant de l'OFEN;
- à Malika, Patricia, Elisa, Luca et Matilda, pour avoir supporté mes absences pour suivre le chantier;
- ... et à tous ceux que j'aurai malencontreusement oublié (si c'est vrai, je vous paie un souper!)