BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

VILLE DE DIGNE
(ALPES DE HAUTE PROVENCE)

—

ÉTUDE DE DÉVELOPPEMENT DU GÎTE THERMO-MINÉRAL

PAR

JJ. COLLIN - G. DUROZOY - JL. GARNIER - A. MARCÉ

Service géologique régional PROVENCE – CORSE
Domaine de Luminy – route Léon-Lachamp, 13009 Marseille
Tél.: (91) 41.26.04 et 41.24.46

78 **SGN** 202 **PRC**

MARSEILLE, AVRIL 1978

VILLE DE DIGNE LES BAINS
(ALPES DE HAUTE PROVENCE)

ETUDE DE DEVELOPPEMENT DU GÎTE THERMO-MINERAL

PAR

JJ. COLLIN - G. DUROZOY - JL. GARNIER - A. MARCÉ

78 SGN 202PRC MARSEILLE, AVRIL 1978

R E S U M E

La ville de DIGNE LES BAINS (ALPES DE HAUTE PROVENCE) a confié une étude de développement de son potentiel thermal à trois organismes: Le Cabinet Marc MERLIN de LYON, l'Institut PASTEUR deLYON et SGR PROVENCE CORSE du B. R. G. M. Ces trois établissements ont été chargés respectivement des missions de :

- Métrologie et étude des conditions d'exploitation des eaux (transfert -stockage) pour le Cabinet MERLIN ;
- Analyse physico-chimique pour l'Institut PASTEUR ;
- Etude hydrogéologique (caractérisation du gîte thermo-minéral, possibilités de captage de débit supplémentaire) pour le B.R.G.M.

La complémentarité de ces trois missions est évidente, aussi le présent rapport fait-il largement appel aux données acquises par nos partenaires pour établir une proposition synthétique de développement du captage thermal.

Le présent rapport est organisé en quatre parties :

1ère Partie : "Analyse géologique du gîte thermo-minéral" par G. DUROZOY, Cette première partie définit, à partir des connaissances géologiques les plus récentes, le gisement souterrain de l'eau thermale et ses possibilités d'atteindre la surface. (cheminement à une cote négative le long du plan de chevauchement de la nappe de DIGNE et remontée le long d'un flanc anticlinal affectant la série autochtone et entraînant la fracturation de la base de la série chevauchante).

2ème Partie : "Etude physico-chimique des eaux, recherche d'éléments de descrimination des origines" par JJ. COLLIN, JL.GARNIER, A. MARCE. Cette partie met en évidence l'origine profonde et ancienne des eaux chaudes et confirme le modèle géologique. On montre également l'importance des venues froides récentes qui viennent se mélanger à l'eau thermale, par un circuit descendant plus local.

.../...

.../...

La Troisième Partie : "Essai de Synthèse", par JJ. COLLIN, JL GARNIER précise et rassemble les éléments acquis précédemment et évalue le débit réel d'eau thermale disponible : il serait à l'ordre de 5 à 7 l/s dans les griffons, plus 1,4 l qui se perd actuellement au ruisseau des eaux chaudes.

La Quatrième Partie : "Conclusions et Recommandations", par JJ.COLLIN, G. DUROZOY et JL. GARNIER, analyse les modalités d'isolation des deux types d'eau et préconise une technique de captage qui ne rompe pas le fragile équilibre eaux chaudes - eaux froides ; l'action serait double : décharge modérée de la pression des eaux froides, captage de l'eau chaude par forages inclinés dans le massif rocheux. Une évaluation du coût de sondagesde reconnaissance et d'essai est proposée.

Ce rapport contient 52 pages, 6 annexes.

Il a été réalisé avec la collaboration de :

D. THIERY	Ingénieur Département Hydrologie.	
P. CHABALIER	Technicien)	Métrologie Hydrométrie
H. PIREDDU	Technicien)	
G. CAMUS (SGR/JAL)	Technicien)	

E. BRUNET. - L. FORMENT. Secrétariat.

D. FERLAY	Dessinateur
J. ABDILLA	Dessinateur

TABLE DES MATIERES

Résumé page 3

PREMIERE PARTIE: Analyse géologique du gîte thermo-minéral 7

1 - Situation 11

1.1. - Caractéristiques générales des émergences 11

2 - Conditions locales d'émergence 12

3 - Contexte structural 13

4 - Hydrogéologie 15

4.1. - Localisation des griffons thermaux 15
4.2. - Circuit thermo minéral 16
4.3. - Conclusion: schéma géologique de l'alimentation des sources thermales 19

Documents consultés 21

DEUXIEME PARTIE: Etude physico-chimique des eaux - recherche d'éléments de discrimitation des origines 23

1 - Etude des températures 25

2 - Caractérisation chimique et isotopique des eaux des différentes émergences 25

2.1. - Analyses chimiques des eaux de sources 25

2.1.1. - analyses complètes 25
2.1.2. - enregistrement de la résistivité 27

2.2. - Analyses de l'eau du ruisseau des eaux chaudes 27
2.3. - Interprétation géothermale des résultats 29
2.4. - Analyse isotopique des eaux 29

2.4.1. - Rappel sommaire des indications attendues de ces méthodes 29

3 - Régime hydraulique des sources 31

3.1. - Evolution des débits retrouvés dans la documentation ancienne 32
3.2. - Profil piézométrique 33

Annexe à la deuxième partie: discussion sur les analyses isotopiques 37

TROISIEME PARTIE: Essai de synthèse 41

1 - Le gîte thermal au sens large 42

2 - Conditions locales d'émergence 43

2.1. - Les sources 43
2.2. - Débit réel d'eau de type thermal aux sources 43
2.3. - Emergences dans le ruisseau des eaux chaudes 47

QUATRIEME PARTIE: Conclusions et recommandations 49

1 - Captage et dérivation d'eau froide 51

2 - Captage de l'eau chaude 52

LISTE DES FIGURES

I.1 - Site de l'établissement thermal de Digne 8
I.43 - Origine des eaux thermales de Digne - schéma hypothétique 18
II.21 a - Tableau de l'analyse chimique complète 24
II.21 b - Diagramme d'analyse d'eau des sources 26
II.23 - Profil en long des teneurs en chlorures et sulfate 28
II.32 - Profil piézométrique 34

LISTE DES ANNEXES

1 - Plan de situation
2 - Esquisse géologique - échelle 1/80 000
3 - Coupes géologiques (A - B - C - D - E)
4 - Dispositif et résultats des mesures thermiques
5 - Enregistrement des températures à l'Etablissement thermal de Digne
6 - Evolution du débit des émergences
7 - Recherche de corrélations avec des précipitations

PREMIERE PARTIE

—

ANALYSE GÉOLOGIQUE

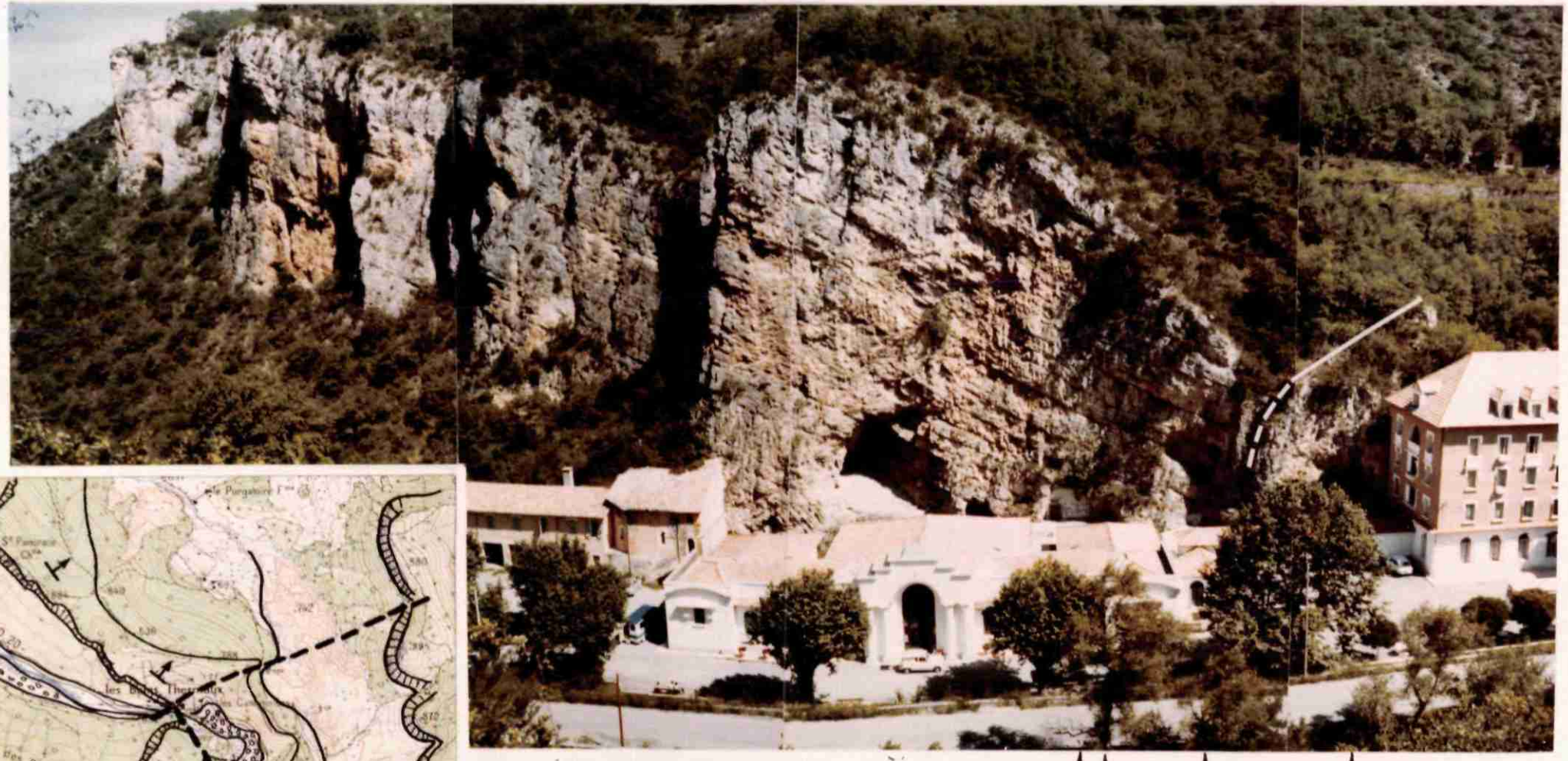
DU GÎTE THERMO-MINÉRAL

PAR

G. DUROZOY

SITE DE L'ETABLISSEMENT THERMAL DE DIGNE (04)

(la barre calcaire carixienne)



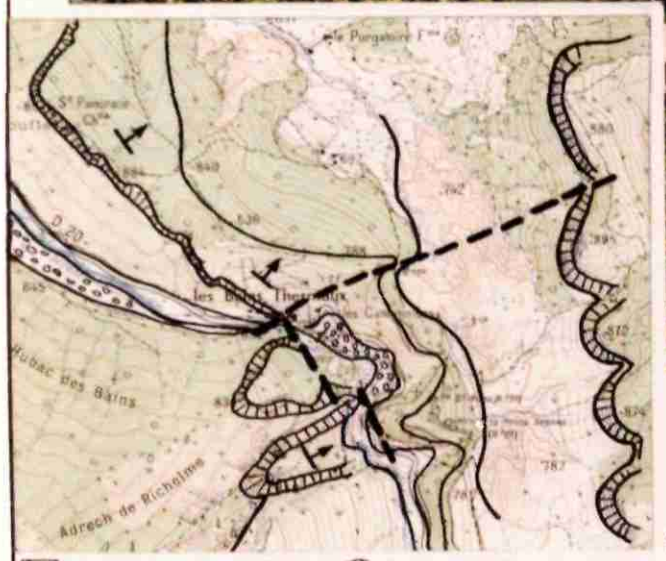


Schéma structural

(cf. Annexe)

1 - SITUATION

Les émergences thermales sont situées à 3 km au NE de la ville de Digne, dans le ravin des Eaux Chaudes, vallée descendant du col de la Pierre Basse, au pied de la montagne de Coûpe.

Les coordonnées Lambert sont: X 914,52 - Y 205,31 - Z 656,6.

Ces émergences sont localisées au pied d'une falaise calcaire en rive droite du torrent, sur 60 mètres (cf. photo figure I.1).

1.1. - CARACTERISTIQUES GENERALES DES EMERGENCES

(les paramètres physico-chimiques seront développés dans les pages ultérieures)

L'émergence principale est celle des Grandes Etuves et de part et d'autre se localisent[1] les sources Saint Etienne, Saint Augustin et Saint Henri à l'Ouest (actuellement arrêtées) et Saint Gilles à l'Est. Les températures sont élevées (35 à 45° C).

Plus à l'Est existent des sources intermédiaires (en température) et enfin une source tiède (25°) où ont été individualisées deux venues, l'une tiède et très variable (source D), l'autre "chaude" et plus constante (source C).

Le débit des sources chaudes est voisin de 5 l/s, celui des sources intermédiaires et tièdes de l'ordre de 20 l/s feront l'objet d'une étude interprétative (cf. § 3, 2°partie). Les eaux sont chlorurées sodiques et sulfatées calciques et faiblement magnésiennes.

---

(1) Certaines sources sont aujourd'hui taries ou condamnées.

2 - *CONDITIONS LOCALES D'EMERGENCE*

Les sources se situent au pied d'une falaise calcaire dont l'épaisseur est un peu inférieure à 100 m. Les calcaires sont intercalés dans une série d'âge secondaire, très épaisse, à pendage général de 20 à 25° Est, apparemment non tectonisée et comprenant des alternances de séquences calcaires et séquences marneuses. L'âge va du Lias inférieur au Jurassique supérieur; ce dernier constituant la falaise de la Montagne de Coûpe qui barre l'horizon à l'Est. La coupe synthétique (annexe 3 E) montre la succession lithologique des terrains et la coupe A leur disposition structurale (annexe 3).

Les calcaires constituant la falaise au pied de laquelle se trouvent les sources thermales (calcaires à silex du "Carixien") sont massifs, fissurés. Le levé au 1/20 000 montre l'existence de petites failles de décrochement à faible rejet de direction SW-NE (orthogonale aux assises) et la présence d'une faille plus importante de direction NNW-SSE de 15 à 20 m de rejet. La photographie de la figure I.1. fait apparaître cette structure relativement simple. On remarque (F) la faille dont le rôle hydrogéologique (venue d'eau froide) sera exploité ultérieurement.

L'examen de la série subordonnée à la falaise calcaire et affleurant le long de la route menant de Digne à l'établissement thermal montre que les calcaires et marno-calcaires en petits bancs qui la constituent, tout en étant moins perméables par fissures que les calcaires massifs, ne sont cependant pas imperméables. La série est d'ailleurs affectée d'ondulations et de cassures.

Le plan (cf. annexe 1) précise la disposition et la nomenclature des différentes venues étudiées dans le présent rapport.

Un examen du contexte structural de la région permet d'apporter quelques précisions (cf. annexe 2).

3 - CONTEXTE STRUCTURAL

La paléogéographie (examen des conditions de dépôt de la série de terrains appartenant à la couverture sédimentaire du socle ancien et allant du Trias au Mio Pliocène) et la tectonique (décomposition des efforts orogéniques auxquels a été soumise cette couverture) amène à admettre dans la région de Digne la structure suivante:

- existence d'un front continu de chevauchement des sédiments mio pliocènes du PLateau de Valensole par la série secondaire et tertiaire (chevauchement de l'Arc subalpin).
- le chevauchement a une amplitude maximale au Nord de Digne à hauteur de la Robine.
- le long du chevauchement la série secondaire, très plissée, est réduite à une série d'écailles alors que plus à l'Est cette série, pourtant chevauchante, apparaît parfaitement tranquille.
- sous le front de chevauchement la série mio pliocène de Valensole (et la série secondaire partiellement existante) est rebroussée.
- au Sud de Châteauredon, la série secondaire a une amplitude de chevauchement bien plus réduite, mais est affectée par un écaillage complexe par suite de l'existence d'un bombement anticlinal affectant la série de Valensole et la série secondaire sous jacente (dôme de Saint Pierre).
- ce bombement paraît correspondre à une remontée du socle sous la couverture secondaire (axe Maures - Remollon - Pelvoux).
- la zone d'écaillage de la série secondaire paraît se poursuivre vers le Nord sous le chevauchement général de la couverture secondaire dans la région de Digne.
- le chevauchement de Digne s'enracine sur le méridien Chaudon-Norante au Sud (vallée de l'Asse), Tanaron - Esclanger au Nord (vallée du Bez au Nord du Brusquet).
- la série mio-pliocène de Valensole est affectée par des plissements - et des failles - de direction NW - SE.

Les coupes A - B - C - D (cf. annexe 3) explicitent cette interprétation de la structure.

Chronologiquement la succession des mouvements orogéniques ayant abouti à la structure actuelle, est la suivante:

- Après les plissements hercyniens affectant le socle puis le dépôt de la couverture secondaire: plis Pyrénéo Provençaux ante Oligocène.
- Pendant l'Oligocène, formation de deux bassins de subsidence l'un à l'Est de Digne (Barrême - Taulanne), l'autre à l'Ouest de la Durance (Manosque - Forcalquier). Entre les deux horst de Valensole (limité à l'Ouest par une faille NNE - SSW, importante, dite faille de la Durance).
- Mouvements probables à l'Aquitanien
- Au Miocène dépôts de sédiments marins sur la région Digne Valensole.
- Plissement des dépôts miocènes
- Au Miocène supérieur: retrait de la mer, les dépôts continentaux étant localisés sur le bassin de Digne-Valensole. Les Poudingues de Valensole se déposent sur une molasse marine miocène déjà plissée. Formation de plis EW et NNW-SSE. Rejeu de l'accident Durancien.
- Fin du Pliocène: mise en place de la nappe de Digne (chevauchement de l'Arc subalpin).
- Quaternaire: plissement de la surface de contact de la base de la nappe.

Les directions structurales principales sont les suivantes:

- NNW-SSE, ou NW-SE: orientation des plis et failles perpendiculaires à la direction de chevauchement. C'est sensiblement l'orientation des accidents importants affectant le socle. Cette direction correspond aux mouvements récents (fin du Pliocène).
- SW-NE: failles postérieures à la mise en place du chevauchement
- WNW-ESE ou EW: orientation des accidents et des plis affectant la formation de Valensole (ante Pliocène).
- N-S: direction du bombement anticlinal Maures - Remollon - Pelvoux (plissements hercyniens).

4 - HYDROGEOLOGIE

4.1. - LOCALISATION DES GRIFFONS THERMAUX

L'étude structurale permet d'entrevoir (annexe 3 B et figure I.43) le processus d'ascension des eaux vers les griffons thermaux: il s'agit de circulations ayant suivi la base du chevauchement de la nappe de Digne, soit dans le Trias très tectonisé à la base du chevauchement (argiles, gypses, cargneules mais aussi calcaires), soit dans des lambeaux d'écailles à matériel secondaire à dominante calcaire (prolongement vers le Nord des écailles existant entre Asse et Estoublaisse).

Le prolongement vers le Nord du bombement anticlinal de Saint Pierre provoque une remontée de la surface de chevauchement de la nappe de Digne, un blocage des écailles et corrélativement une fracturation dans la base de la série secondaire chevauchante.

Il y a mélange au voisinage des griffons d'eaux chaudes ascendantes et d'eaux froides infiltrées sur les calcaires carixiens formant la crête de Saint Pancrace et s'étendant au-dessus des griffons thermaux (en rive droite et en rive gauche du ravin des Eaux Chaudes).

La localisation des griffons thermaux à la base de la falaise carixiennes s'explique par la présence en profondeur, au droit de ce point, d'une remontée de la surface de chevauchement et d'une fracturation maximale réalisée en cet endroit dans le Lias inférieur (Hettangien - Sinémurien); sinon les griffons thermaux devraient se trouver plus à l'aval dans le ruisseau des Eaux Chaudes [1] en direction de Digne, au point le plus bas d'affleurement de la série marno-calcaire - qu'on a décrite comme fracturée - du Lias inférieur.

---

(1) Il est à noter que de tels griffons existent à proximité immédiate de l'établissement (cf. 3° partie) où on a pu mettre en évidence que de l'eau de type thermal vient se mélanger à l'eau du ruisseau, à laquelle elle donne son nom: ruisseau des Eaux Chaudes.

4.2. - CIRCUIT THERMO-MINERAL

Celui-ci est difficile à définir avec exactitude. On a vu qu'il y avait mélange d'eau ascendante chaude et d'eau froide remontant sous une faible charge dans les mêmes griffons mais ayant une origine proche (calcaires carixiens). On est réduit aux hypothèses en ce qui concerne l'origine des eaux chaudes.

On notera d'abord que le débit propre des émergences chaudes est peu élevé ≈ 2 l/s, mais nous verrons que ce débit est à augmenter de la "part chaude" des eaux tièdes et des pertes dans le ruisseau.

Les coupes structurales et la carte géologique (annexes 3 B,C,D et 2) suggèrent trois origines possibles:

a) - Ecailles au front de la nappe de chevauchement à l'Ouest des sources thermales.

Le Lias (Hettangien à Carixien) est aquifère mais il affleure peu (hauteur entre le sommet de Cousson et le ravin de la chapelle Saint Jean) et alimente une série de petites émergences du Sud au Nord:

- source haute du ravin de Richelme vers 1 210 m au Sud du sommet de Cousson, sur le tracé d'un axe synclinal aigu affectant les calcaires liasiques. Débit en fin février inférieur au l/s; se réinfiltre 100 m à l'aval.
- source basse du ravin de Richelme (ancienne pépinière des Eaux et Forêts) vers 1 125 m sur le tracé d'un grand accident NS. Débit 2 l/s en fin février (en partie résurgence du débit infiltré de la source haute de Richelme) T° 6°. L'eau se réinfiltre 200 m à l'aval.
- captage alimentant l'établissement thermal dans le ravin de Richelme vers 870 m. Débit le 12 mars 1977: 4 à 5 l/s à la source. T° 7°5. L'eau sourd des alluvions de fond de ravin, à l'amont du passage de la barre des calcaires carixiens et représente en grande partie la réapparition du débit infiltré de la source basse du ravin de Richelme.
- source de l'Oratoire Saint Michel au Nord du sommet de Cousson (1 070 et 1 100 m). Contact faillé Hettangien-Rhétien. Très faible débit.
- source des Hautes Bâties de Cousson 1 085 m. Débit 0,3 l/s le 12 mars 1977 . T° 6°.
- source de la Chapelle Saint Jean, sur le tracé d'un important accident, 2 à 3 l/s le 8 avril 1977.

Il existe également deux sources au Sud de la chapelle Saint Michel de Cousson, sur le plan de chevauchement, à l'ancienne ferme de Suyes; altitude 970 et 980 m. Le débit est très faible. L'alimentation ne provient vraisemblablement pas des calcaires de Cousson.

L'impluvium calcaire des écailles de Cousson est de l'ordre de 2 km^2. Le débit des exutoires serait de l'ordre de 5 l/s en hautes eaux. Il ne semble pas que l'origine du débit thermal soit à rechercher dans ce secteur.

b) - Ecailles entre Asse et Estoublaisse

L'hydrogéologie n'en a été étudiée que sommairement. Cependant il existe deux sources importantes dans le bassin du torrent de Saint Pierre: l'Adoux, exutoire des calcaires jurassiques de la crête de Beynes (débit supérieur à 50 l/s) et la source de la chapelle Saint Etienne drainant les crêtes du Jurassique calcaire qui constituent les deux flancs du synclinal faillé du haut vallon de Saint Etienne (débit du même ordre). Les autres sources existant dans les ubacs en rive gauche de l'Asse n'ont que des débits très faibles (Le Jouvert, Le Creisset).

Il n'existe pas de sources importantes le long du chevauchement (sources issues du Miocène à Beynes, une source sortant du Muschelkalk au Sud de Beynes au-dessus de Veriscle et une autre au NE de Beynes, petites sources issues du Mio Pliocène au village abandonné de Trevans).

Une émergence très chargée en sulfates et de débit non négligeable (supérieure au l/s) existe sur le front de chevauchement entre Trevans et le col de la Croix.

Par ailleurs les écailles entre Estoublaisse et Asse sont recoupées par l'Asse entre Chaudon-Norante et les clues de Chabrières. Un drainage doit donc s'effectuer dans ce secteur (où il ne paraît pas y avoir de perte de la rivière); en définitive l'origine des sources thermales ne paraît pas devoir être recherchée dans ce secteur.

c) - Série chevauchante

La "barre calcaire" (Jurassique supérieur) de la montagne de Coûpe paraît exclue car elle repose sur la très épaisse série marneuse (Callavo-Oxfordien) des Dourbes et d'autre part n'est pas en contact dans la zone des racines (Norante, au Sud) avec le plan de chevauchement. On notera cependant:

. qu'elle ne présente pas d'importants exutoires connus[1] (mais qu'elle est recoupée par l'Asse entre Norante et Barrême).

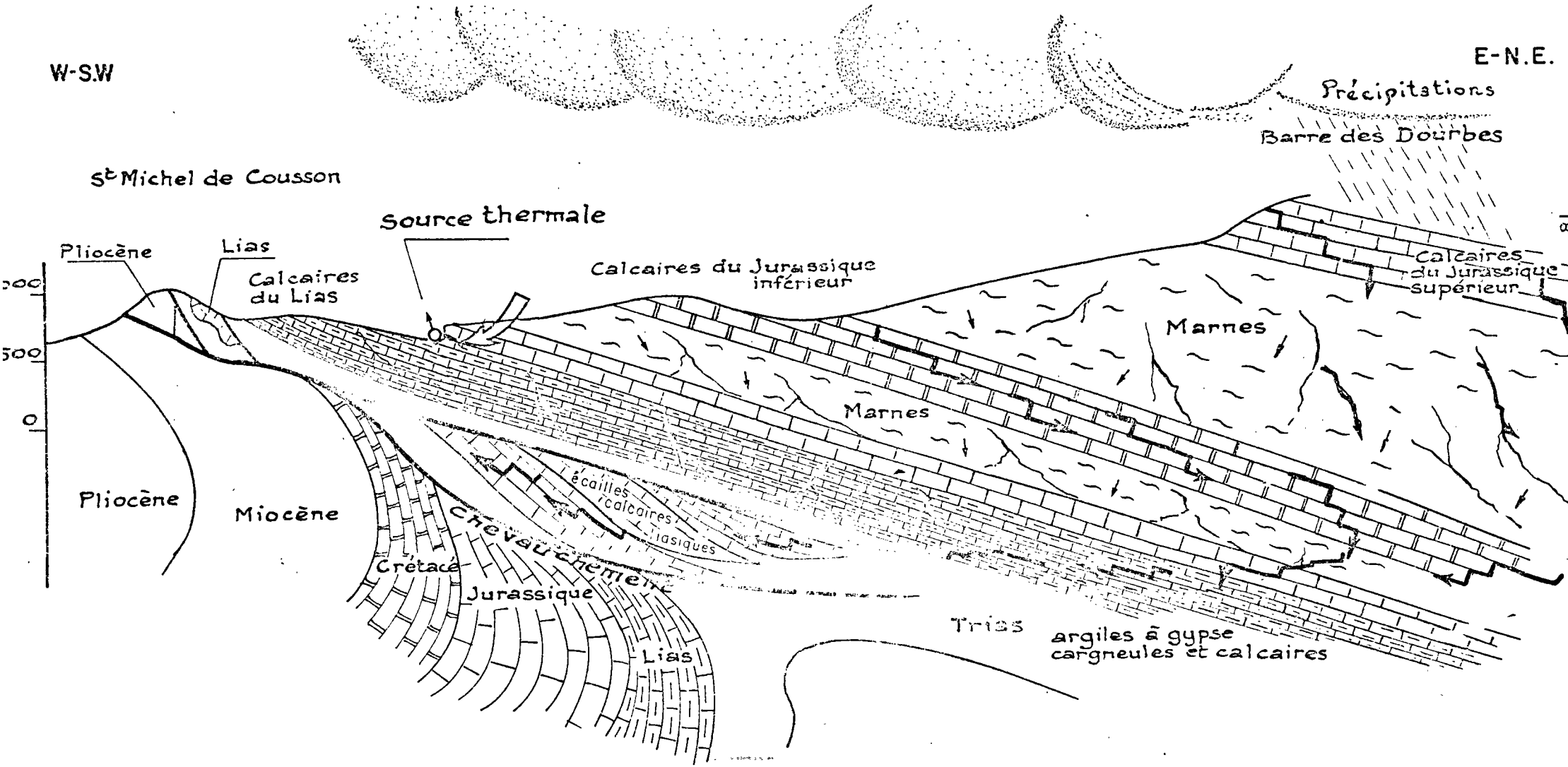
---

(1) La source "Cascade" de la Maison Forestière de la montagne de Coûpe sur la commune de Tartonne, altitude 1 275, au Sud du sommet du Couard, émerge dans le Crétacé inférieur.

Figure I 43

ORIGINE DES EAUX THERMALES DE DIGNE

Schéma hypothétique



. que le synclinal de Tartonne est bordé à l'Est par un important accident de direction NNW-SSE sur laquelle se situe une source salée, ce qui suppose la remontée du Trias, le long de cet accident (cf. annexe 3 C).

Par contre la "barre bathonienne" fait affleurer largement les calcaires entre Asse et Bléone et est en contact avec la surface de chevauchement dans la zone des racines (Norante) vers la cote 800, or elle ne présente qu'un seul exutoire probable, la source des Ronchaires au Brusquet (débit 6 à 7 l/s altitude 760) qui émerge dans les marnes noires schisteuses inférieures (Toarcien-Aalénien) vraisemblablement à la faveur d'un accident affectant la série Toarcien-Bathonien, la base de la falaise calcaire se trouvant vers la cote 900.
La série calcaire bathonienne est recoupée vers le cote 650 m entre Marcoux et Digne par un affluent de la Bléone, le Mardaric, mais il peut y avoir répartition du drainage entre ce dernier point au Nord et le contact en profondeur avec le plan de chevauchement dans la zone des racines au Sud (vers la cote 0 - cf. annexe 3 D).

La "barre carixienne" au Nord de l'Etablissement thermal est recoupé par le torrent des Dourbes, à une cote inférieure de près de 20 m à celle des sources thermales, il y a drainage (et d'ailleurs présence d'émergences tièdes).

Au Sud, à Entrages, deux émergences de faible débit (0,25 l/s chacune) existent au toit de l'assise (La Servie, cote 1 110 - L'Arabé, cote 1 130). Plus au Sud dans la vallée du Fuby et celui de Couinier vers les cotes 890 et 750, il semble qu'il y ait drainage, au moins pour le ravin sud (Le Couinier).

4.3. - *CONCLUSION: SCHEMA GEOLOGIQUE DE L'ALIMENTATION DES SOURCES THERMALES*

L'analyse de la structure géologique permet d'émettre une hypothèse raisonnable sur le mode d'ascension des eaux chaudes vers les griffons thermaux: cheminement à une cote négative le long du plan de chevauchement de la nappe de Digne et remontée le long d'un flanc anticlinal affectant la série autochtone et entrainant la fracturation de la base de la série chevauchante. (cf. figure I.43).

Les eaux chaudes ascendantes se mélangent à des eaux froides issues d'infiltration d'eaux météoriques sur la barre calcaire de la série chevauchante surplombant les griffons (calcaires carixiens).

L'hypothèse la plus vraisemblable est de localiser l'alimentation dans l'un des ensembles calcaires de la série chevauchante (soit le Bajo-Bathonien, soit le Carixien, soit les deux) avec circulation au contact du plan de chevauchement dans la zone des racines (secteur de Norante).

DOCUMENTS CONSULTES

R. MOUTERDE et al.- Le Lias et le Bajocien de la Javie (04). Serv. carte géol. France. 25 mai 1966

J. DEBELMAS - Guides géologiques régionaux. Alpes

E.N.P.C. - Excursion géologique dans les Alpes méridionales 1951

E.N.P.C. - Excursion géologique dans le Dévoluy, Le Bochaine et les Préalpes de Digne 1966.

J. GOGUEL - Tectonique des chaînons subalpins entre la Bléone et la Durance. BSCGF, T.XLI, 1939.

J. GOGUEL - Les Alpes de Provence. Géologie régionale de la France 1953.

G. THOMEL - Le Crétacé des environs de Chabrières. BSCGF, 7°5, t.v., p. 333-334, 1963.

P. GIGOT et al.- Evolution tectono-sédimentaire de la bordure septentrionale du bassin tertiaire de Digne depuis l'Eocène BSCGF (71 XVI.1974.N°2)

G. ONALAN - Etude géologique de la bordure ouest de l'Arc de Castellane. Thèse. Fac. de Sc. de Grenoble. 1970

G. THOMEL - Nouvelles précisions sur le rôle et l'importance paléographique de l'axe Maures-Pelvoux dans la région de Digne. C.R.A.S. Paris, t. 266, p. 1914-1917, 6 mai 1968.

P. GIGOT - Y. GUBLER - C. HACCARD - Relation entre sédimentation et tectonique (en compression et extension); exemples pris dans les bassins tertiaires des Alpes du Sud et de Haute Provence. IX° Congrés internat. de sédimentologie. Nice 1975.

M. ROUX - Etude tectonique des chaînons subalpins entre Majastres et Castellane (04). Géologie alpine, t. 48, 1972; p. 187-199

J.M. DEBATS et al.- Un exemple de superposition de deux phases de plissement dans les chaînes subalpines de la région de Digne. Géologie alpine, t. 48, 1972. p.179-185.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE PHYSICO CHIMIQUE DES EAUX

RECHERCHE D'ELEMENTS DE DISCRIMINATION DES ORIGINES

PAR

JJ.COLLIN* - JL. GARNIER* - A.MARCÉ **

* SRG/PROVENCE -CORSE - MARSEILLE
** Laboratoire isotopique du département Minérologie
Géochimie, Analyses - ORLEANS

ETABLISSEMENT THERMAL DE DIGNE

ANALYSE CHIMIQUE COMPLETE

TABLEAU II 21 a

INSTITUT PASTEUR – LYON

	R 20°	σ	pH	$RS_{180°}$	TH°f	Ca	Mg	Na	K	CO3H	Cl	SO_4	NO_3
Sources des Etuves	175		7.20	5 008	104.5	276	87	1 097	39	244	1 550	1 550	< 1
Saint Gilles	175		7.25	4 949	104	276	85	1 081	39	244	1 400	1 200	< 1
Source C	180		7.20	4 838	104	270	83	1 081	37.8	250	1 395	1 250	< 1
Source Petites Etuves	180		7.20	4 947	104.5	272	88	1 081	39	250	1 400	1 250	< 1
Source D	390		7.35	2 065	58	164.4	41	460	14.4	238	550	575	< 1
Torrent amont (15.01.1976)	2 700		8.15	278	24	73.3	13.5	5.75	0.78	201	5.5	70	< 1
Torrent aval	1 650		8.10	463	26.4	83.8	13.2	48.8	2.3	213	55	112	< 1
Les Etuves (18.02.1977)						273	77.5	1 300	39.7	247	1 622	1 400	52

L'étude géologique nous livre un modèle interprétatif plausible de l'origine de l'eau thermale... nous allons le confronter avec les données physico chimqiues susceptibles de compléter ou d'infirmer ce schéma.

1 - ETUDE DES TEMPERATURES (cf. annexe 4)

La surveillance permanente des températures des sources pendant la campagne d'étude permet de dégager quelques indications précieuses.

- la température de l'eau des Grandes Etuves est constante tout au long de l'année et n'est pas influencée par les variations de débit; cette température est de 42°5 C $\pm$ 0,5°C.
- la température de Saint Gilles est légèrement variable mais il faut tenir compte ici de refroidissements liés à la disposition des lieux: émergence plus proche de la paroi externe, ouverture, mobilisation par pompage. Suivant les saisons la température oscille entre 35°3 C et 38°5 C.
- les Petites Etuves ne fournissent pas de température significative car le très faible débit d'eau thermale ne provoque pas un apport calorique assez puissant pour compenser les pertes par l'air (surtout ouverture des portes).
- les seules variations significatives sont obtenues aux sources C et D qui sont l'émergence d'un mélange (cf. étude chimique et isotopique).
  La source C qui est un mélange riche en eau thermale voit sa température osciller de 36 à 39°3 C tandis que la source D où l'eau froide prédomine, voit sa température osciller de 21° C à 25°2 C.
  La température de la source C ne peut toutefois être considérée comme significative car la grotte où sourd cette émergence n'est pas isolée et s'y produit d'importantes variations thermiques, journalières et annuelles.

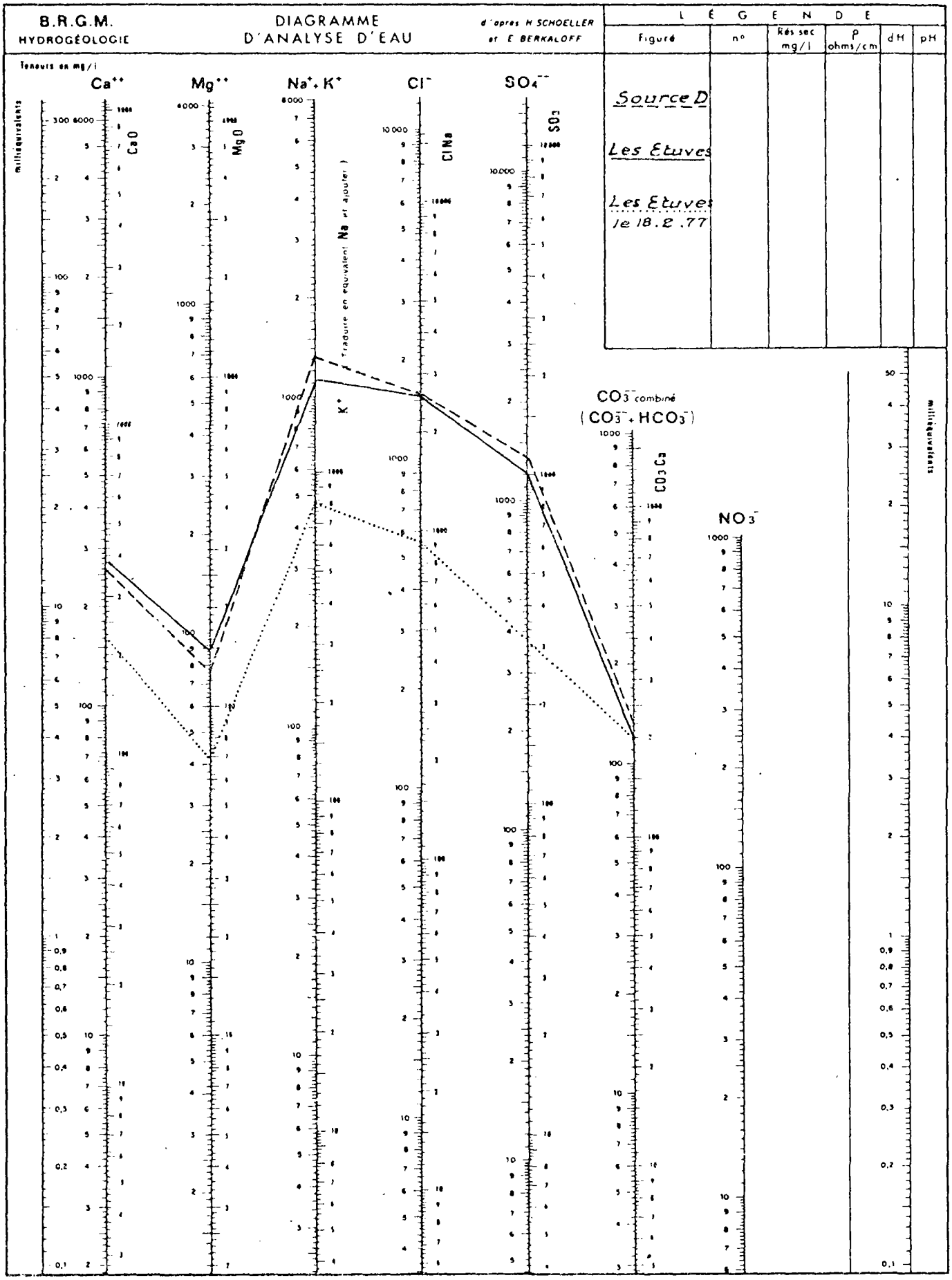
2 - CARACTERISATION CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES EAUX DES DIFFERENTES EMERGENCES

2.1. - ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX DES SOURCES

2.1.1. - Analyses complètes

Les analyses chimiques complètes pratiquées par l'Institut PASTEUR de Lyon le 15.01.1976 (cf. tableau II.21a) font apparaître une eau à dominance chlorurée et sulfatée sodique, légèrement bicarbonatée calcique et magnésienne.

Figure II 21 b



Les sources Grandes Etuves, Saint Gilles, Petites Etuves et source C présentent une grande similitude de composition; les petits écarts entre les valeurs numériques des diverses teneurs ne sont significatifs. La source D présente des teneurs inférieures au moins de moitié en pratiquement tous les éléments, à l'exclusion des bicarbonates. La figure II 21 b montre bien que le diagramme représentatif est translaté entre ces deux courbes, mais que les bicarbonates sont présents à la même teneur. Ceci peut laisseur supposer qu'à un fond bicarbonaté calcique banal et commun à toutes les eaux de la région s'est superposé une minéralisation chloro-sulfatée.

2.1.2. - *Enregistrement de la résistivité*[1]

La résistivité des eaux des sources a été contrôlée et enregistrée en continu par le Cabinet MERLIN.[2]

Les courbes enveloppes représentatives de ce paramètre (à l'exclusion de quelques pics ou crénaux fortuits et d'origine vraisemblablement instrumentales) sont remarquablement constantes pour les Etuves, Saint Gilles, très légèrement variable pour la source C et sensiblement variable pour la source D.

2.2. - *ANALYSES DE L'EAU DU RUISSEAU DES EAUX CHAUDES (cf. tableau II.21 a)*

Ces analyses réalisées entre l'amont et l'aval de la zone de l'établissement thermal, mais avant que les eaux thermales usagées ne retournent à ce ruisseau, montrent une nette différence de minéralisation dans les éléments les plus caractéristiques: multiplication par dix de la teneur en Cl et Na, augmentation de 70 à 112 de la teneur en SO_4.

Cette évolution sur une courte distance confirme bien les observations visuelles faites à l'étiage, à savoir l'existence dans le lit même du ruisseau de venues thermales qui échappent à la zone de drainage des sources actuellement captées.

---

(1) La résistivité d'une eau renseigne sur sa teneur globale en sels dissous ionisés: plus la minéralisation est forte, plus la résistivité est faible.

(2) Cf. rapport de ce Cabinet.

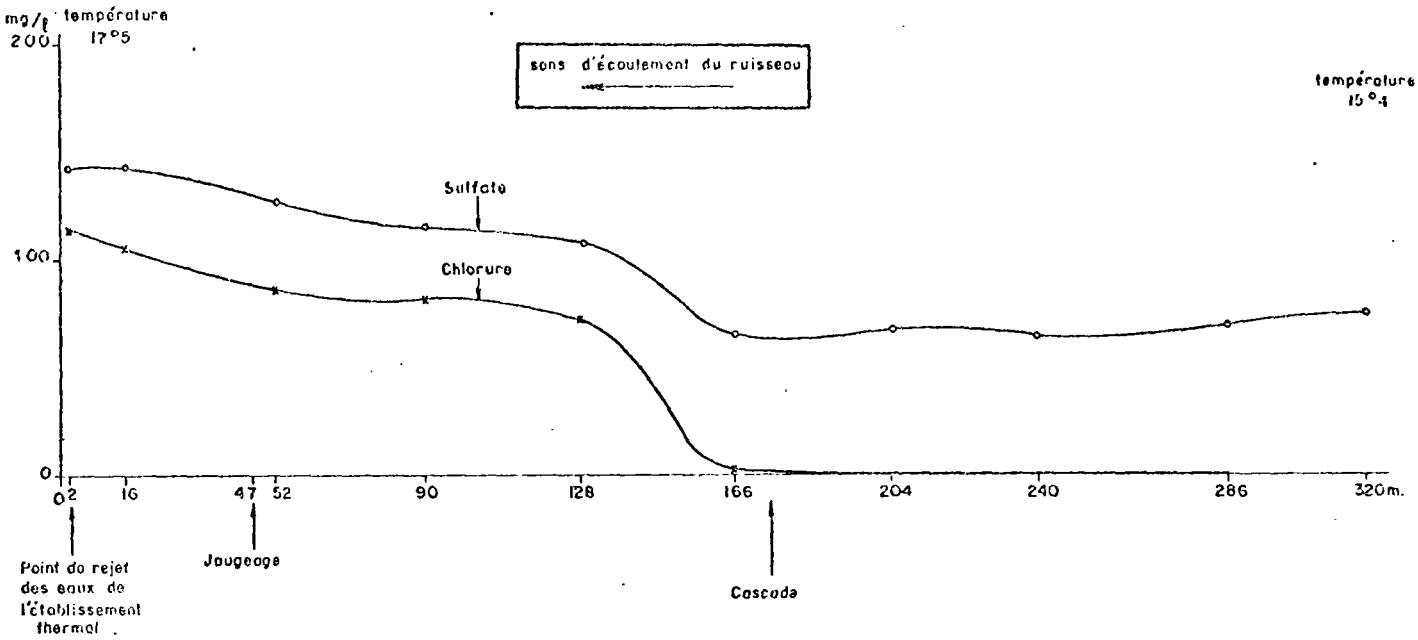
Profil en long des teneurs en Chlorures et Sulfates

(ruisseau des eaux chaudes le 9/8/76)

Débit au pm 47 = 19,4 l/s (mesuré)

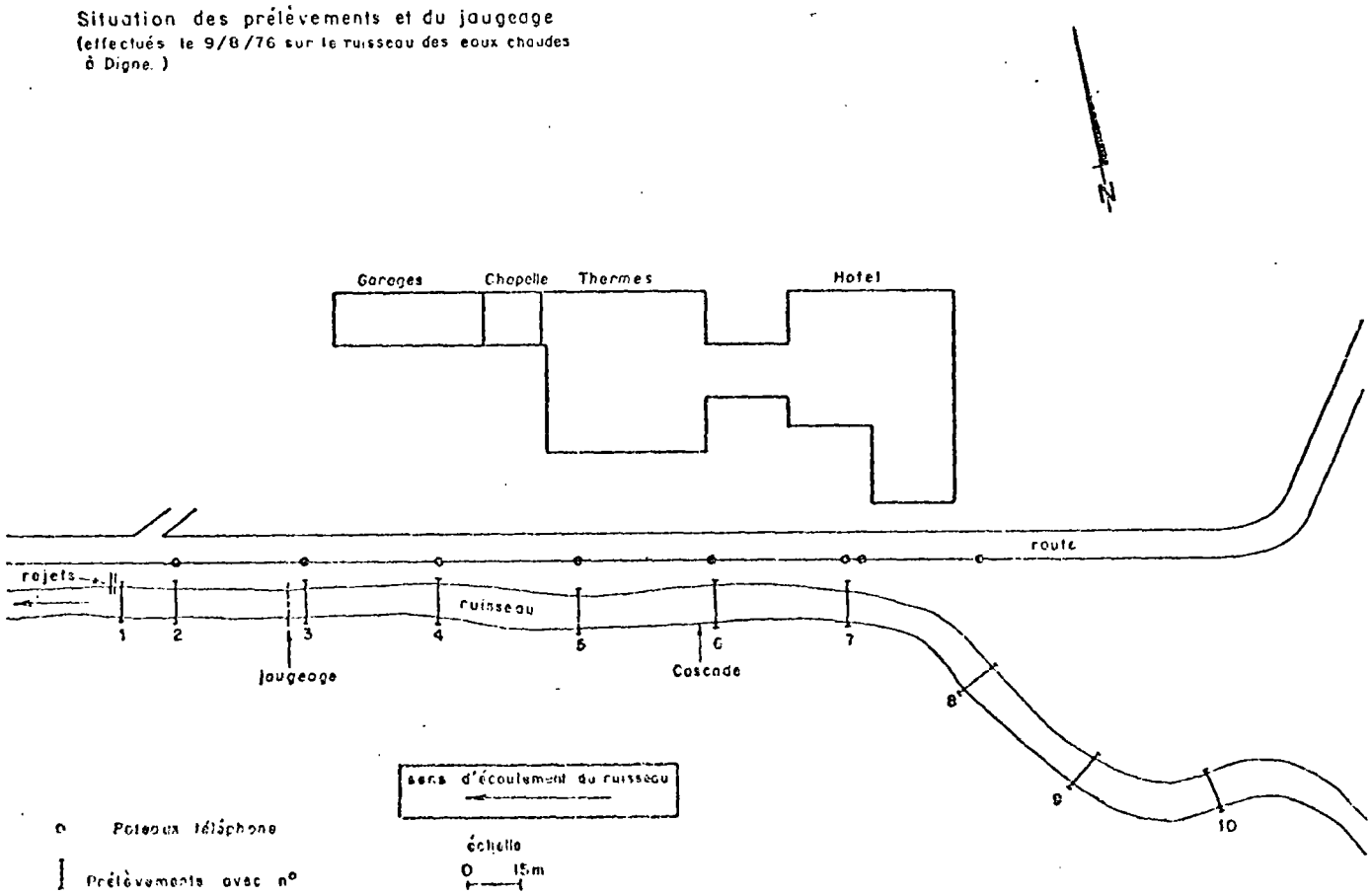
Débit amont de la cascade = 8 à 10 l/s (estimé)

Débit aval de la cascade (pm 2) = 18 à 20 l/s



Situation des prélèvements et du jaugeage

(effectués le 9/8/76 sur le ruisseau des eaux chaudes à Digne.)



Un autre profil chimique a été effectué le 9.08.1976 à 10 h 30, les résultats sont figurés sur le diagramme II.22.Ces éléments nous permettrons ultérieurement une évaluation des quantités d'eau de type thermal "perdue" à la rivière.

2.3. - INTERPRETATION GEOTHERMALE DES RESULTATS

Diverses études récentes (cf. bibliographie) ont permis de mettre au point des méthodes d'évaluation de la température à laquelle a été portée une eau thermale lors de son circuit souterrain. Ces méthodes sont fondées sur les équilibres thermo-dynamiques qui régissent la solubilité relative de certaines substances. On concevra donc que ces méthodes ne puissent être d'une rigueur absolue et il n'en faudra retenir que des ordres de grandeur indicatifs de la température profonde.

Deux "géothermomètres" peuvent être utilisés ici avec une bonne fiabilité[1]

- le géothermomètre "Silice" indique une température de 60° C
- le géothermomètre Na/K indique une température de 50°C

Nous en retiendrons deux indications qui seront confrontées lors de la synthèse, aux autres données.

- il ne semble pas y avoir d'origine très profonde (magmatique) de l'eau, mais plutôt un enfouissement de l'ordre de 1 000 à 1 500 m selon le gradient géothermique local
- l'eau ne subit qu'un refroidissement modéré au cours de son ascencion.

2.4. - ANALYSE ISOTOPIQUE DES EAUX (prélèvements 18.02.1977)

2.4.1. - Rappel sommaire des indications attendues de ces méthodes

Les teneurs en isotopes de différents constituants de l'eau (oxygène et hydrogène) ou de substances dissoutes peuvent être comparées à des standards de référence mondiaux et les méthodes interprétatives portent sur les écarts entre les valeurs mesurées et ces standards ou σ.

---

(1) Une troisième méthode le géothermomètre Na/(K - Ca) ne peut être appliquée à ces eaux fortement chlorurées sodiques.

- Isotopes du soufre (^{34}S) (Les Etuves)

Le $\sigma^{34}S$ ‰ est de 15,1 cette valeur indique que le soufre dissout dans les sulfates de l'eau thermale est bien d'origine triasique, c'est-à-dire que l'eau a été en contact avec les gypses du chevauchement de la nappe de Digne (cf. coupes géologiques, annexe III).

- Isotopes stables des constituants de l'eau (Les Etuves)

Deuterium $\sigma D‰$ v.s. SMOW [1] = 68,0 $\pm$ 0,5

Cette valeur d'écart (σ) par rapport au standard international indique que l'eau n'a pas subi de choc thermique important, ce qui confirme l'interprétation des géothermomètres chimiques.

Oxygène 18 $^{18}_{o}$ les résultats du laboratoire sont indiqués ci-après

	n° DE PRELEVEMENT	TEMPERATURE DE PRELEVEMENT	$\sigma\ ^{18}O$ ‰ v.s. SMOW
Source Honorat [2]	1	19°3	- 9 $\pm$ 0,1
Les Etuves	2	41°3	- 9,8 $\pm$ 0,1
Saint Gilles	3	38°5	- 9,8 $\pm$ 0,1
Petites Etuves	4	36°5	- 9,6 $\pm$ 0,1
Petites Etuves	5	33°6	- 9,6 $\pm$ 0,1
Source C	6	38°4	- 9,6 $\pm$ 0,1
Source D	7	22°1	- 9,6 $\pm$ 0,1

Ces résultats indiquent des altitudes de précipitation pour les Eaux Chaudes relativement élevées, de 1 150 à 1 300 m, bien supérieures à la cote des sources (660 m), mais une discussion de ces valeurs est nécessaire en regard de la teneur en Tritium qui permettra d'expliciter les notions de mélange: cette discussion est présentée en annexe à la 2ème partie.

---

(1) Standard Mean Ocean Water

(2) La source Honorat (X 913,530 - Y 206,250 - Z = 620 m) est une source située sur l'autre versant de la colline, côté Nord, dans le vallon adossé à celui des Eaux Chaudes.

Tritium ^3H

Les résultats analytiques sont les suivants:

SOURCE	n° DE PRELEVEMENT	^3H UT (unité Tritium)
Honorat	1	38 ± 4
Etuves	2	2 ± 1
Saint Gilles	3	2 ± 1
Petites Etuves	4	< 1
Petites Etuves	5	< 1
Source C	6	4 ± 1
Source D	7	49 ± 5

Ces résultats indiquent des âges très différents pour les eaux chaudes et les eaux tièdes.

Les eaux chaudes qui ne contiennent que des teneurs infimes en ^3H sont antérieures aux explosions thermonucléaires qui ont rechargé l'atmosphère en cet isotope: il s'agit donc au moins d'eau antérieure à 1952; mais si cet isotope était exclusivement naturel sa période de décroissance l'aurait également totalement fait disparaître: l'eau serait donc antérieure à 1925 environ. Par contre les sources "tièdes" Honorat et source D présentent des teneurs assez élevées révélatrices d'un mélange avec de l'eau sub- actuelle dont la teneur est de l'ordre de 80 UT.

Cette indication donnerait donc un ordre de grandeur de la proportion du mélange eau froide - eau chaude de 50 % pour la source D.

3 - *REGIME HYDRAULIQUE DES SOURCES*

A l'examen du graphique annuel des débits le régime des sources est également significatif (cf.annexe 5).

Les deux sources thermales, en dehors des périodes de fonctionnement de l'établissement, présentent un débit assez peu variable (Saint Gilles) et

quasiment constant pendant 5 mois (Les Etuves). Cette longue période de variation assez faible correspond pourtant à la période de recharge annuelle des nappes par les précipitations hivernales. Réciproquement, la source tiède D présente pendant cette période hivernale des fluctuations sensibles[1] que l'on peut attribuer à des recharges.

Inversement, la longue période de décroissance du débit de la source D (tarissement estival) coïncide avec les fluctuations enregistrées sur Saint Gilles et les Etuves.

Il est donc curieux de voir la "source froide" la plus influencée directement par les agents extérieurs adopter un régime de tarissement lent alors que les sources chaudes fluctueraient de manière importante. Il paraît donc douteux de penser que les eaux chaudes, dont le circuit est profond, complexe et lent, reçoivent tantôt une influence des recharges externes plus directe qu'un aquifère "en prise" avec l'alimentation et tantôt ne réagissent pratiquement pas à des précipitations considérables. Une tentative de corrélation a été effecutée, les résultats sont présentés en annexe 6.

Les fluctuations importantes observées en été sur Saint Gilles et Les Etuves sont donc très probablement influencées par le prélèvement qui n'est pas purement gravitaire. Parmi les autres causes de fluctuation on peut citer les variations barométriques qui ont un effet parfois sensible sur les "nappes"captives et les marées terrestres, rythme régulier de type lunaire : les effets parasites sont donc nombreux.

3.1. - *EVOLUTION DES DEBITS RETROUVES DANS LA DOCUMENTATION ANCIENNE*

On ne peut faire de comparaison valable car ces débits correspondent à des périodes où les sources satellites étaient en service et où Saint Gillles n'était pas encore équipée de pompe.

Par ailleurs, la cimentation de certaines sources satellites n'a pas pour autant reporté le débit sur les sources exploitées mais probablement également accru les pertes vers le cours d'eau.

---

(1) Fluctuations qui demeurent bien faibles pour une source de type karstique : le débit varie du simple au double, alors que dans les émergences de karts à alimentation directe la variation est souvent du centuple.

3.2. - *PROFIL PIEZOMETRIQUE* (*cf. figure II.32*)

Il est intéressant de considérer le profil des cotes piézométriques des Etuves aux sources D et C et à la venue de la base du lit du torrent des "Eaux Chaudes".

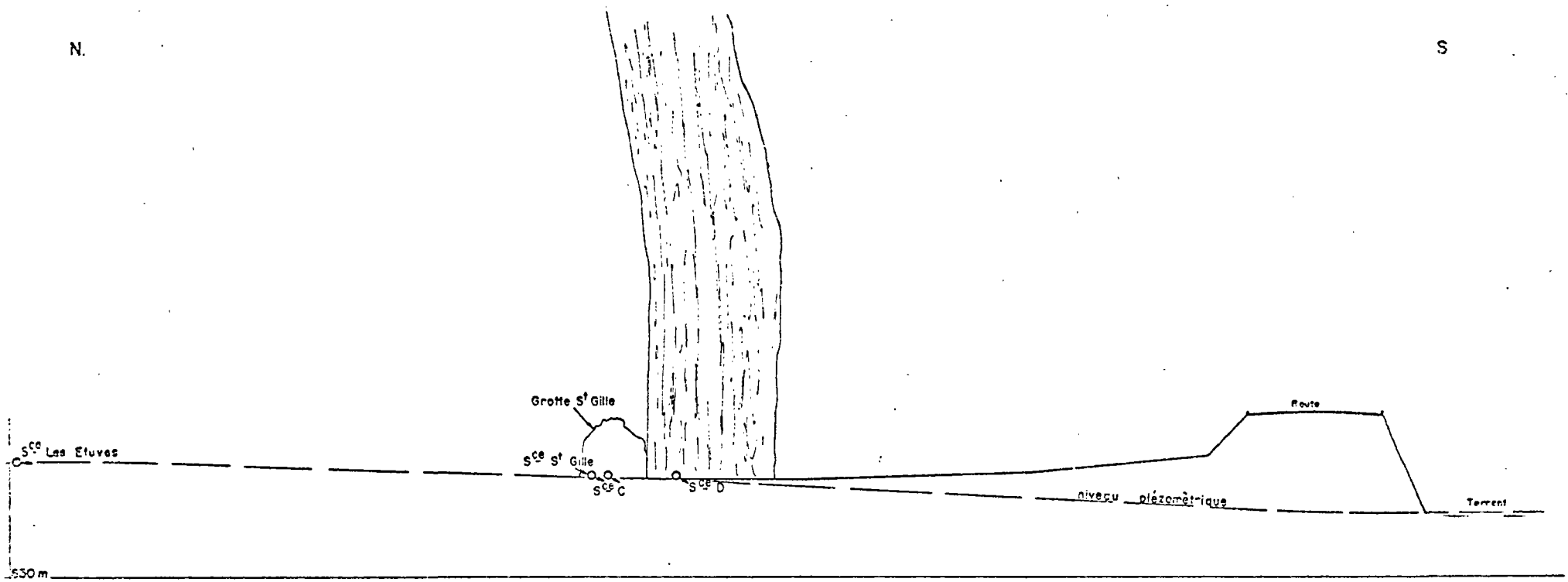
Ce profil montre:

- une dépression très nette des Etuves vers Saint Gilles: même en période de non-pompage il y a potentialité de drainage par Saint Gilles mais la perte de charge de plus de 1 m indique des relations très mauvaises qui expliquent bien le retard à la transmission d'influence (tentative de rabattement du Cabinet Merlin).
- on voit également que la source tiède D peut exercer son influence directe sur C par apport gravitaire.
- ce n'est pas pour autant que la source D inférieure en cote à Saint Gilles et aux Etuves n'a pas d'influence sur celles-ci: en effet sa seule existence et son débit considérable peuvent servir de niveau de base partiel pour l'eau chaude. On peut schématiquement assigner à cette venue froide le rôle de barrage hydraulique; elle exerce une contre-pression qui retient partiellement l'eau chaude de façon imparfaite car il y a une zone de mélange.

Cependant comme cette circulation froide se fait dans une zone fissurée très ouverte (faille, diaclases) les variations de débit de l'eau froide n'engendrent guère de variation sensible du niveau de celle-ci à son émergence. Qu'en est-il en profondeur dans la falaise? Il serait nécessaire de disposer d'un piézomètre pour s'en assurer.

On peut toutefois formuler l'hypothèse que la condition de potentiel hydraulique qui règle le système complexe est bien la pression de l'eau froide dans le massif rocheux, celle-ci maintient la cote de l'eau chaude et ses fluctuations engendrent corrélativement les fluctuations du débit de cette dernière... mais comme le système est peu perméable et présente une forte inertie, la montée en débit de l'eau chaude ne survient que bien après la montée de l'eau froide. Il ne faut pas en effet voir le système limité au seul environnement de l'établissement mais à la totalité du massif rocheux. A l'opposé de l'eau froide qui circule de haut en bas, l'eau chaude circule

Profil piézométrique



Echelle

0 2 4 6 8 10

Fig.: II - 32

de bas en haut, c'est-à-dire dans un terrain qui n'a très probablement pas été attaqué aussi fortement par la dissolution karstique: l'inertie du système peut donc être très grande.

ANNEXE À LA DEUXIÈME PARTIE

SOURCES THERMALES DE DIGNE

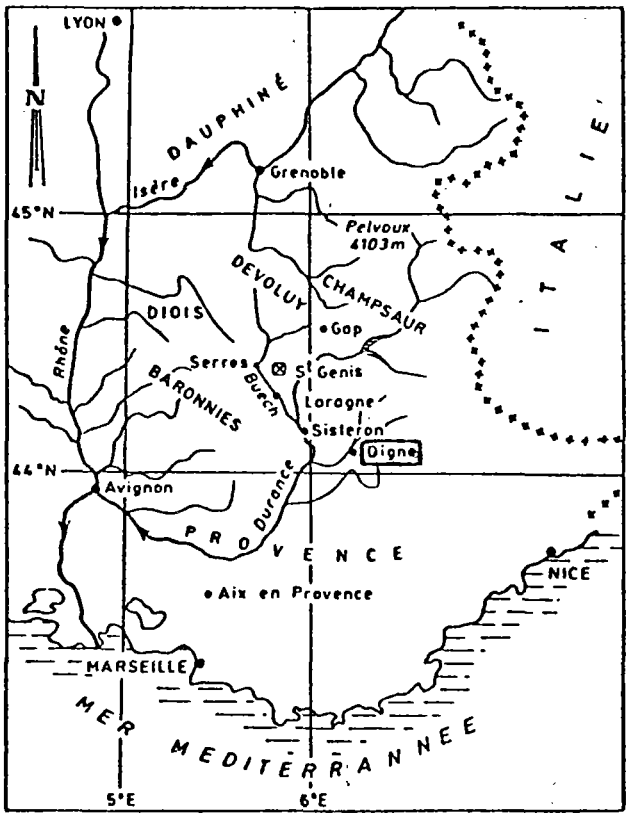
(ALPES DE HAUTE PROVENCE)

—

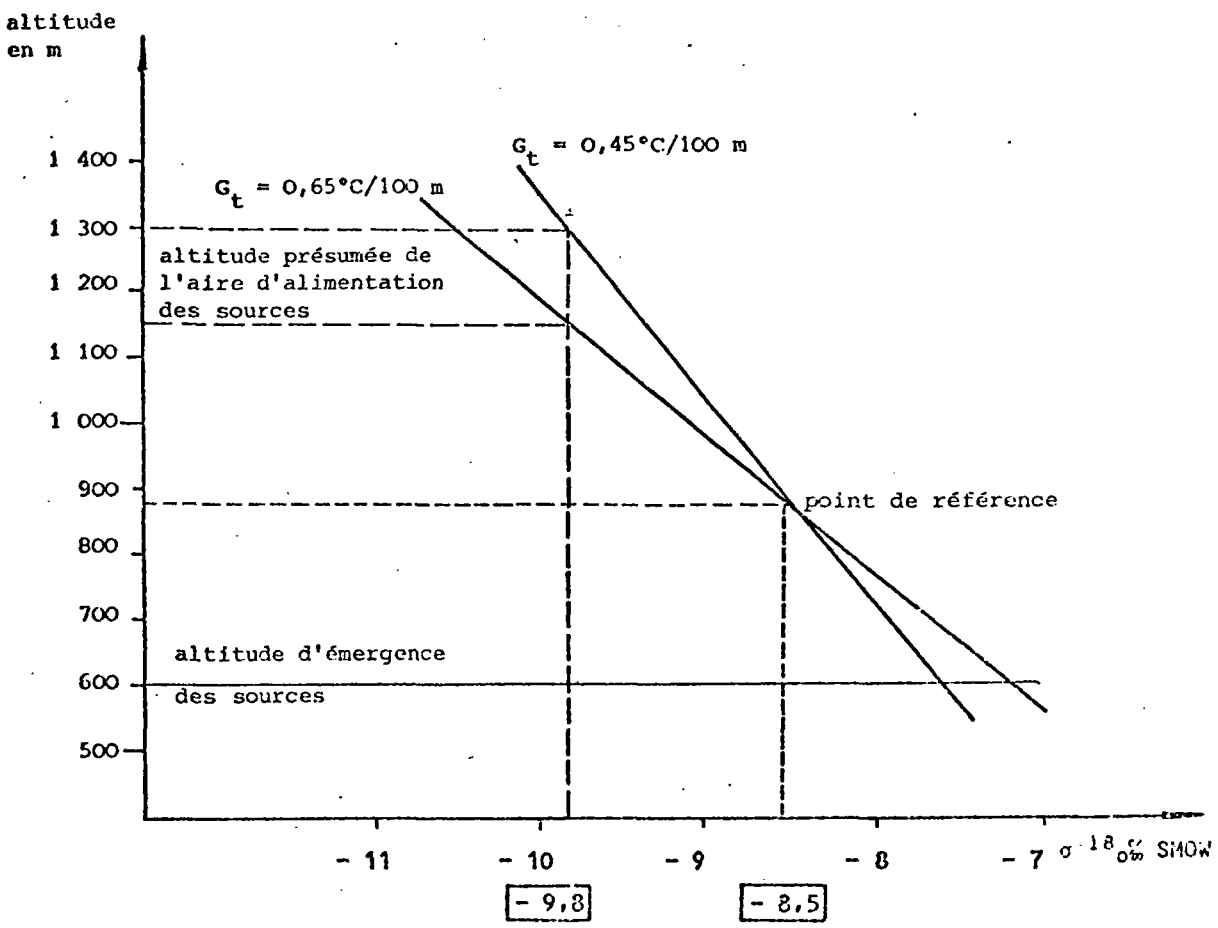
DISCUSSION SUR LES ANALYSES ISOTOPIQUES

PAR

A. MARCÉ



SITUATION GEOGRAPHIQUE



RELATION ALTITUDE - COMPOSITION ISOTOPIQUE DE L'OXYGENE

Sur l'ensemble des sources chaudes, les teneurs en Tritium, faibles ou nulles ($2 \pm$ UT, < 1 UT) indiquent que les eaux sont relativement anciennes (antérieures à 1925), alors que celles des sources tièdes montrent que l'apport d'eaux récentes n'est pas négligeable (de d'ordre de 50 %).

Sur la bse des analyses chimiques, il est possible d'établir une proportion des mélanges:

- 40% d'eau profonde, minéralisée, chaude, non tritiée (< 1 UT)
- 60% d'eau superficielle, peu minéralisée, froide tritiée (80 UT)

Les compositions isotopiques de l'oxygène sont exprimées en $\sigma‰$ suivant la définition:

$$\sigma‰ = \frac{(R \text{ échantillon} - \text{standard}}{\text{standard}} \times 1\,000 \text{ où } R = \frac{(^{18}O)}{(^{16}O)} = \text{Rapport isotopique}$$

Le standard adopté est le SMOW (Standard Mean Ocean Water) dont le σ est égal à zéro par définition[1].

Les variations de compositions isotopiques sont dues, lors des phénomènes d'évaporation et de condensation, au fractionnement isotopique qui varie en fonction inverse de la température. Il s'ensuit que les précipitations sont appauvries en ^{18}O par rapport au SMOW, dont ont des σ négatifs et que ceux-ci seront d'autant plus négatifs que la température lors de précipitations sera plus basse, pluies d'hiver ou pluies en altitude.

Les compositions isotopiques de l'oxygène des eaux sont concordantes avec celles des précipitations de type régime méditerranée, telles qu'on les connaît plus au Nord dans la région de Saint Genis: $\sigma^{18}O‰ = -8{,}5$ à une altitude de 875 m (cf. figure 1). Cette identité avec les précipitations paraît confirmée par l'analyse isotopique de l'hydrogène (deutérium) sur la source la plus chaude (σ D ‰ devrait être sensiblement égal à - 65 à - 70 ‰ dans le cas où les eaux n'ont pas subi de modification de la composition isotopique par suite des phénomènes thermiques: la valeur mesurée est en effet de - 68).

---

(1) Compte tenu de ces définitions, il apparaît qu'un σ négatif correspond à un appauvrissement en ^{18}O et un σ positif à un enrichissement en ^{18}O de l'échantillon par rapport au SMOW.

Compte tenu de l'appauvrissement en ^{18}o des eaux de pluies en fonction de l'abaissement de la température, donc de l'élévation en altitude, il est possible d'établir une relation altitude/gradient thermométrique et composition isotopique en oxygène (cf. figure 2). Deux hypothèses ont été adoptées suivant la valeur du gradient thermométrique:
l'une de 0,45° C/100 m donne une variation de 1 σ/320 m
l'autre de 0,65° C/100 m donne une variation de 1 σ/220 m

Sur la base des taux de mélange calculés, la composition isotopique des eaux de surface peut être calculée de l'ordre de $\sigma\ ^{18}_{o}\ \%$ - 8,5 l'altitude moyenne de l'aire d'alimentation du bassin est de l'ordre de 900 m (cf. figure 2).

Pour les sources chaudes caractérisées par une composition isotopique appauvrie en $^{18}_{o}$ ($\sigma\ \%$ = - 9,8), l'altitude moyenne de l'aire d'alimentation est, suivant le gradient géothermométrique adopté, comprise entre 1 150 et 1 300 m (l'altitude de l'émergence de ces sources est de l'ordre de 600 m).

TROISIEME PARTIE

—

ESSAI DE SYNTHÈSE

PAR

JJ. COLLIN - JL. GARNIER

1 - LE GITE THERMAL AU SENS LARGE

L'étude géologique nous montre que le gîte thermal peut être l'ensemble du plan de chevauchement de la nappe de Digne - d'ailleurs d'autres venues d'eau de même type ont été reconnues en divers points de la région.

L'infiltration sur une vaste surface peut se pratiquer par les diverses barres calcaires et par des fractures qui conduisent au plan de charriage.

La minéralisation s'acquiert au niveau du Trias qui cède chlorures et sulfates en grande quantité. L'isotope 34 S confirme en effet l'âge triasique du soufre.

L'eau qui sourd à une température de 43° n'a pas été portée à de hautes températures, au plus 50° à 60° C. Cette température avec un gradient thermique moyen de 3°/100 m correspondrait à un enfouissement de l'ordre de 1 500 m, ce qui est tout à fait compatible avec les données de la géologie sur la profondeur du plan de charriage (1), siège le plus probable de la circulation.

L'altitude de précipitation est également élevée, elle est donnée par l'étude du ^{18}O, elle s'étagerait entre 1 150 et 1 300 m ce qui correspond assez bien avec l'altitude générale moyenne des régions environnantes.

Par contre "l'eau froide" aurait une aire de précipitation plus basse et correspondrait aux collines proches de l'Etablissement.

L'eau thermale non mélangée est ancienne, au moins 50 ans, alors que les eaux "froides" sont des mélanges avec des eaux quasi actuelles.

---

(1) Il ne faut pas considérer ce plan comme une surface théorique, mais comme une zone broyée, donc comme un milieu hétérogène, partant, perméable.

2 - CONDITIONS LOCALES D'EMERGENCE

2.1. - LES SOURCES

Bien que Saint Gilles voie sa température varier légèrement, cette eau est absolument identique (chimie, isotopes) à celle des Etuves:la variation thermique n'est due qu'au refroidissement lié à la mauvaise isolation. La source C est un mélange mais où l'eau chaude prédomine, elle reçoit toutefois une petite part d'eau froide qui lui apporte quelques unités de Tritium.

La source D est un mélange à forte proportion d'eau froide.

2.2. - DEBIT REEL D'EAU DE TYPE THERMAL AUX SOURCES

Aux fluctuations "historiques" près, le débit des sources chaudes s'est établi pendant la période d'observation entre les valeurs moyennes de 1,15l/s pour la cumulation Saint Gilles + Etuves.

Par contre, la source C a varié de 0,65 à 1,37 l/s; la souce D de 13 à 34 l/s.

Calculons, par diverses méthodes, quel débit d'eau thermale on peut espérer identifier dans ces eaux mélangées.

1) *Méthode des températures*

Soit:V le volume par unité de temps (débit)
t la température
V_t et t_t = volume et température de la venue totale
V_f et t_f = volume et température de l'eau froide
V_c et t_c = volume et température de l'eau chaude

on écrira donc le bilan calorique:

$$Q_{k\ cal} = V_t \times t_t = V_f \times t_f + V_c \times t_c$$

mais comme $V_f = V_t - V_c$ on aura:

$$V_t \times t_t = tf\ (V_t - V_c) + V_c \times t_t$$

$$V_t \quad t_t = tf \quad V_t - t_f V_c + V_c \times t_c$$

$$V_t \quad t_t - V_t t_f = V_c t_c - V_c t_f$$

$$V_t (t_t - t_f) = V_c (t_c - t_f)$$

soit l'expression du volume instantané d'eau chaude V_c:

$$V_c = V_t \times \left(\frac{(t_t - t_f)}{(t_c - t_f)}\right)$$

L'application pour les basses eaux de septembre 1976 (13.09.1976)

avec V_t = 12.93 l/s
t_t = 23.5° C
t_c = 43°C (température moyenne des Etuves)
t_f = 7.5°C (température des eaux froides source Richelme)(1)

$$V_c \qquad V_c = \frac{12.93 \quad (23.5 - 7.5)}{43 - 7,5} = 5.7 \text{ l/s}$$

Soit donc un débit minimal d'eau thermale perdue par mélange avec l'eau froide de 5.7 l/s.

2) *Méthode des dilutions chimiques*

L'apport pondéral par unité de temps en chaque substance dissoute à des teneurs τ différentes s'écrit:

$$Q_t \times \tau_t = Q_f \cdot \tau_f + Q_c \cdot \tau_c$$

suivant le même type de calcul que pour la température on a donc:

$$Q_c = Q_t \cdot \left(\frac{(\tau_t \; t - \tau_t)}{(\tau_c \; c\tau - f)}\right) \qquad Q_c = Q_t \cdot \left(\frac{(\tau_t - \tau_f)}{(\tau_c \quad \tau_f)}\right)$$

Nous prendrons comme référence la valeur des teneurs suivantes:

- pour l'eau chaude l'analyse des Etuves
- pour l'eau froide une analyse d'une source située dans le même massif (source dite du Faucon des Dourbes

---

(1) La source Richelme (X 914,55 - Y 204,90 - Z 710) est la source froide qui alimente en eau potable l'hôtel thermal, elle représente l'eau "ordinaire" locale.

Ne disposant pas d'analyse chimique complète synchrome des jaugeages, nous utiliserons la résistivité qui par son inverse représente la minéralisation totale donc pour les différentes valeurs de Q_t (cf. rapport Cabinet MERLIN).

5.10.1976 $R_c = 103$ $R_t = 240$ $Q_t = 14{,}26$ l/s

6.05.1977 $R_c = 106$ $R_t = 390$ $Q_t = 34$ l/s

La résistivité de l'eau froide, référence régionale est de 2 000 (source du Faucon des Dourbes) il nous faut supposer qu'elle varie assez peu, ce qui est de règle générale.

$$Q_c \text{ oct. } 1976 = 14{,}26 \times \left(\frac{\left(\frac{1}{240} - \frac{1}{2000}\right)}{\left(\frac{1}{103} - \frac{1}{2000}\right)} \right)$$

Q_c oct. 1976 = 5,6 l/s

Pour mai 1977

$$Q_c = 34 \times \left(\frac{\left(\frac{1}{390} - \frac{1}{2000}\right)}{\left(\frac{1}{106} - \frac{1}{2000}\right)} \right)$$

Q_c mai 1977 = 7,8 l/s

L'apport d'eau chaude serait donc compris entre 5,6 et 7,8 l/s

Il nous est toutefois difficile de déterminer si ce débit fluctue beaucoup ou si cette variation est liée aux incertitudes sur les données.

On remarquera toutefois que la variation calculée est relativement faible devant le débit total: $\frac{5{,}6}{7{,}8}$ par rapport à $\frac{14{,}26}{34}$ ce qui laisse présumer un apport relativement constant de l'eau thermo-minérale.

Nous pouvons donc escompter qu'il y a disponible sous le site un débit de l'ordre de 5 l/s d'eau thermale.

3) *Discussion*

L'existence ainsi démontrée, sous le site, d'une venue d'au moins 5 l/s d'eau thermale se mélant à l'eau froide ne lève pas pour autant tous les problèmes.

En effet, si on peut espérer que le mélange se fait près de la source D , en particulier par l'apport des venues liées aux fractures de la faille (cf. photo. figure I.1) on n'a pas de certitude sur l'individualité des deux venues jusqu'à proximité de l'émergence : le mélange pourrait se réaliser plus tôt au sein même de la masse rocheuse.

La variation simultanée du débit d'eau chaude et d'eau froide pourrait elle aussi conduire à une température résultante peu variable.

Notons à ce propos que les calories ne sont pas un traceur de l'eau thermale puisqu'elles peuvent s'échanger sans qu'il y ait pour autant mélange.

En effet, si nous reprenons (pour une période de fort débit de la source D) le calcul de la venue thermale nous aurions :

$$Q_c = 34 \text{ l/s} \times \frac{(24,6 - 7,5)}{(43 - 7,5)} = 16,4 \text{ l/s}$$

Cette apparente variabilité du débit de la venue d'eau chaude obtenue par ce calcul est peu compatible avec ce que l'on sait des venues thermales des Etuves et de Saint Gilles, de débit peu variable pendant nos observations. Il est donc peu probable que les apports d'eau chaude varient dans de telles proportions à la source D.

Nous notons par ailleurs (cf. annexe 5) que la variation du débit global paraît faible par rapport à la variation des températures à la source D.

L'hypothèse explicative pourait donc être la suivante : l'apport d'eau thermale serait assez peu variable, autour de 5 -7 l/s (comme le montre la chimie)... Mais le mélange s'effectuant dans le massif rocheux, c'est-à-dire dans un réservoir déjà réchauffé par l'eau thermale, l'eau météorique se réchaufferait à son tour, ce qui tend "à écraser" les variations de sa température.

La dilution étudiée par le biais de la chimie qui s'avère le meilleur traceur peut donc refléter un apport assez constant de l'eau thermale mais il est également possible que cette dilution s'opère à une certaine profondeur dans le massif rocheux.

2.3. - *EMERGENCES DANS LE RUISSEAU DES EAUX CHAUDES*

Ces émergences d'eau de type thermal sont connues de longue date ; le lit du ruisseau, point bas du système hydraulique local, peut drainer des venues thermales qui, à cause du profil topographique échappent à la zone d'émergence exploitée (cf. profil piézométrique figure II.32).

Cette eau thermale représente néanmoins globalement un complément de ressources qu'il convient d'évaluer.

A cet effet, nous avons pratiqué une mesure de débit global au moulinet et une série d'anlyses chimiques (cf. figure II.23).

Nous adopterons l'hypothèse que l'eau qui vient se mélanger au ruisseau est l'eau thermale pure du type Etuves (SO_4= 1 200 mg/l., CL = 1550 mg/l.)

Nous aurons donc, selon l'expression employée précédemment :

$$Q_{thermal} = Q_{aval} \times \left(\frac{\tau_{aval} - \tau_{amont}}{\tau_{thermal} - \tau_{aval}}\right)$$

Soit avec le débit mesuré de 19,4 l/s le 9.08.1976 et selon le profil de prélèvement de la figure

pour SO_4 = 70 mg/l et 145 mg/l

$$Q_{th} = 19{,}4 \times \left(\frac{(145 - 70)}{(1\,200 - 145)}\right) = 1{,}38 \text{ l/s}$$

pour Cl = 0,5 et 105 mg/l

$$Q_{th} = 19{,}4 \times \left(\frac{(105 - 0{,}5)}{(1\,550 - 105)}\right) = 1{,}40 \text{ l/s}$$

Ainsi un apport équivalent à 1,4 l/s d'eau de type thermal [1] se perd au ruisseau.

---

(1) Entre les deux points extrêmes la température s'élève de 15°4 à 17°5 ce qui dans les conditions de calcul précédents équivaudraient à un apport de 1,6 l d'eau chaude type "Etuves", mais le calcul ne peut être très rigoureux par suite des pertes thermiques dans cet écoulement torrentiel.

QUATRIEME PARTIE

—

CONCLUSIONS

ET RECOMMANDATIONS

PAR

JJ. COLLIN - G. DUROZOY - JL. GARNIER

La caractère relativement peu variable des sources thermales, malgré quelques fluctuations de débit induites par l'exploitation, ne nous incite pas à tenter d'agir directement sur ces sources pour récupérer plus d'eau thermale.

Dans ce système à faible perméabilité, aux fractures aléatoires, ces travaux pourraient être délicats et compromettre les venues actuelles, seul bien tangible de la station.

Par contre, entre la source C , la source froide D et les griffons du lit du ruisseau c'est un débit minimal de 7 l/s ou 600 m^3/jour qui échappe au contrôle de la station thermale soit deux à trois fois plus que son actuelle production.

Il nous semble donc que c'est sur cette ressource toute proche qu'il faut agir [1]

1 - CAPTAGE ET DERIVATION DE L'EAU FROIDE

Nous avons vu que l'eau froide d'origine locale (mais non totalement superficielle et proche) pouvait être conduite au griffon D par la fracture repérée sur la figure I.1).

Cette eau exerce une charge effective sur la source C, se mélange en D et contribue également à soutenir le potentiel hydraulique local. On peut donc proposer de réaliser un ouvrage de captage de l'eau froide à partir de l'amont immédiat de la fracture qui semble alimenter en eau froide la source D. Cette galerie qui prendrait l'eau froide "à revers" devrait permettre au mieux d'individualiser les deux venues, au pire de libérer la source C de toute influence froide.

---

(1) Sans exclure toute action de caractère "économie, lutte contre les fuites et le gaspillage" qu'il n'est pas notre propos d'étudier.

Selon la réussite de ces travaux, c'est un à plusieurs litres/s d'eau thermale qui peuvent être récupérés.

Bien évidemment il faudra veiller à ce que l'équilibre nouveau ne crée pas un rabattement excessif dans le circuit "chaud" et pour cela mettre en place un dispositif de retenue réglable.

De même, les travaux de captage (galerie) devront être conduits avec une grande prudence afin de ne pas provoquer de désordres - et sous surveillance permanente (venues, température, fracturation, etc.).

Cette solution, si elle n'offre pas la garantie absolue de réussite présente l'avantage de ne pas amener à commettre de geste irréparable sur les venues thermales actuelles.

De plus si d'autres actions devaient être entreprises, celles-ci ne seraient pas contradictoires avec la première mais complémentaires.

2 - *CAPTAGE DE L'EAU CHAUDE*

Dans le même esprit de prudence on peut également chercher à exploiter de l'eau thermale par un nouvel accès direct et distinct des griffons actuels.

Un ou plusieurs forages inclinés, convenablement cimentés en tête auraient un "pourcentage de chance" de récupérer en profondeur des venues chaudes qui se dirigent soit vers les sources autorisées soit vers les sources C et D, soit vers le ruisseau, soit même vers la vallée située au Nord (source Honorat).

Cette solution présente l'avantage d'être extérieure au gîte actuel et d'être moins définitive qu'une galerie de captage au coeur même du massif. Elle n'est pas du tout incompatible, au contraire, avec le captage de l'eau froide conçu comme un moyen de décharge du gisement thermal.

Un ou plusieurs forages présenteraient en outre l'intérêt de s'appliquer à un volume de massif rocheux important et même dans l'hypothèse d'une productivité faible on peut espérer bénéficier de l'effet de capacité

du réservoir ce que l'on ne peut obtenir par un captage gravitaire; le réservoir souterrain peut alors être sollicité au delà de son débit nominal pendant des périodes de fort besoin et reconstituer sa réserve.

En cas de rencontre des venues froides les techniques de cimentation sont suffisamment maitrisées pour préserver le gisement. Cette solution nécessite également un suivi minutieux des venues, de la fracturation, etc.

De plus cette solution ne serait à priori pas excessivement onéreuse, au moins dans sa phase de reconnaissance préalable au captage définitif. Une consultation d'entreprises spécialisées a fourni les estimations suivantes : pour 2 sondages inclinés, Ø 200 mm de 0 à 10 m isolés des eaux de surface par tube cimenté, poussés jusq'à 60 m en 146 mm, essais de pompage ou essais de perméabilité (à l'exclusion de toute investigation spéciale telle que diagraphies, micromoulinet, etc ...) le montant des travaux serait de l'ordre de 80.000 à 90.000 F.

A ces prestations purement techniques, il conviendra d'adjoindre une surveillance géologique et hydrogéologique particulièrement attentive ainsi qu' une exploitation systématique de toutes les données recueillies (fracturation, venues d'eau, température, physico-chimie, etc ...).

VILLE DE DIGNE-LES-BAINS

ALPES DE HAUTE PROVENCE

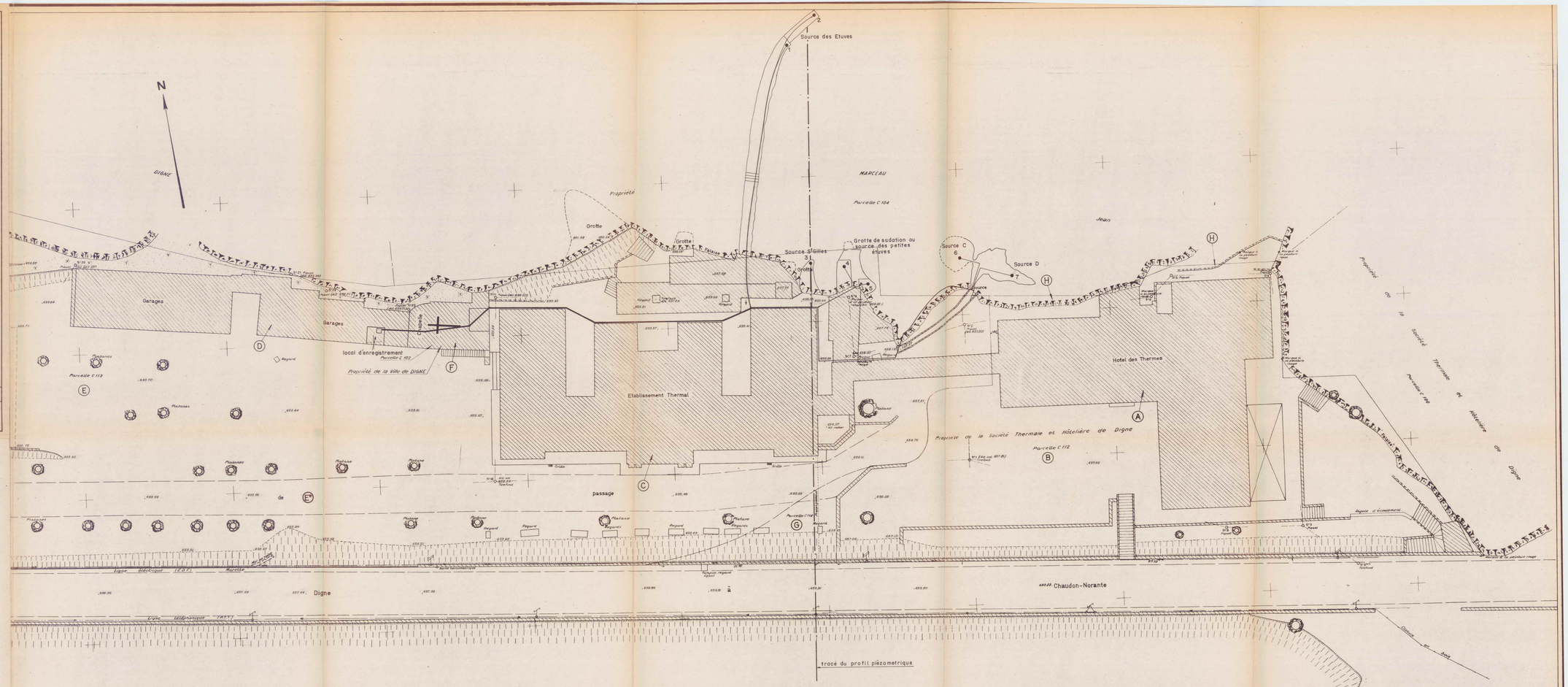
ETUDE DE DEVELOPPEMENT DU GITE THERMO-MINERAL

Plan de situation

ECHELLE: 1/200

SERVICE GÉOLOGIQUE REGIONAL PROVENCE-CORSE

Annexe n° 1	MODIFICATIONS
Dessiné le Juin 1978	
78 SGN 202 PRC	



Plan topographique dressé par J.R. JOURNET géomètre expert à Digne

VILLE DE DIGNE
(Alpes de Haute Provence)

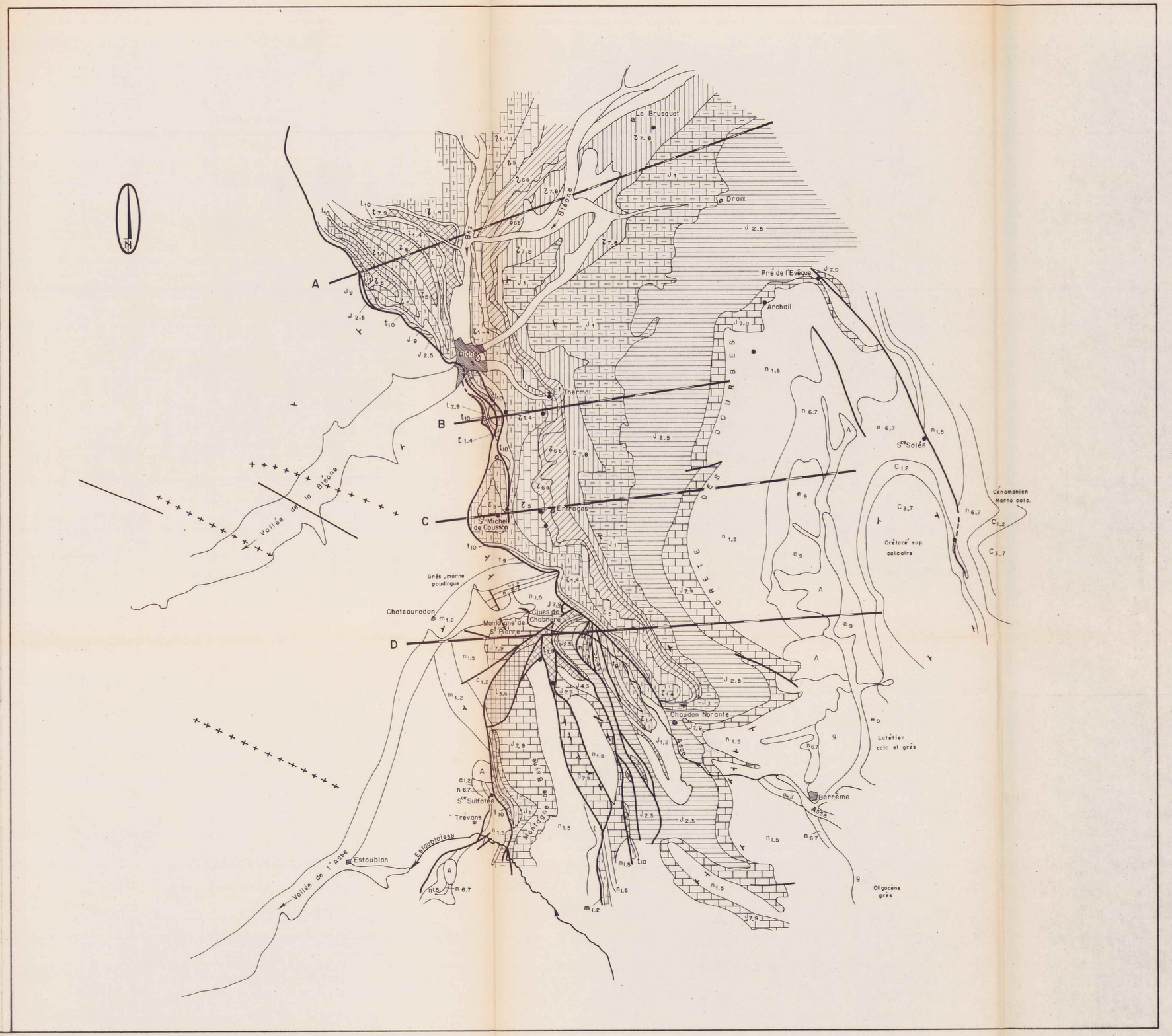
ETUDE DE DEVELOPPEMENT THERMO-MINERAL

ESQUISSE GEOLOGIQUE

ECHELLE 1/80000

SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° 2	MODIFICATIONS
Dessiné le avril 1978	
78 SGN 202 PRC	



LEGENDE

$n_{6.7}$	Albo-Aptien	Marne, intercalation de calc. glauconieux	Crétacé
$n_{1.5}$	Berriasien	Marno-calcaire	
$J_{7.9}$	Kimméridgien Tithonique	Calcaire massif	Jurassique
$J_{2.6}$	Bathonien sup Callovien oxf.	Terre noire	
J_1	Bajocien + Bathonien sup.	Calcaire en lits schisteux	
$\tau_{7.8}$	Toarcien	Marnes	Lias
τ_6	Domérien	Marnes grises, calc. au sommet	
τ_5	Carixien	Calcaire à silex	
$\tau_{1.4}$	Sinemurien Hettangien	Calcaire et calc marneux	
t_{10}	Rhétien	Schistes argileux verts et lumachelles	Trias
$t_{7.9}$	Keuper	Marnes, dolomies, gypses, argiles	
$t_{3.6}$	Muschelkalk	Calcaires et dolomies	

Complément légende stratigraphique voir coupe A

- Pendage, verticalité des couches
- Contact anormal
- Axe anticlinal
- A — Trocé de coupe
- Emergence

VILLE DE DIGNE

(Alpes de Haute Provence)

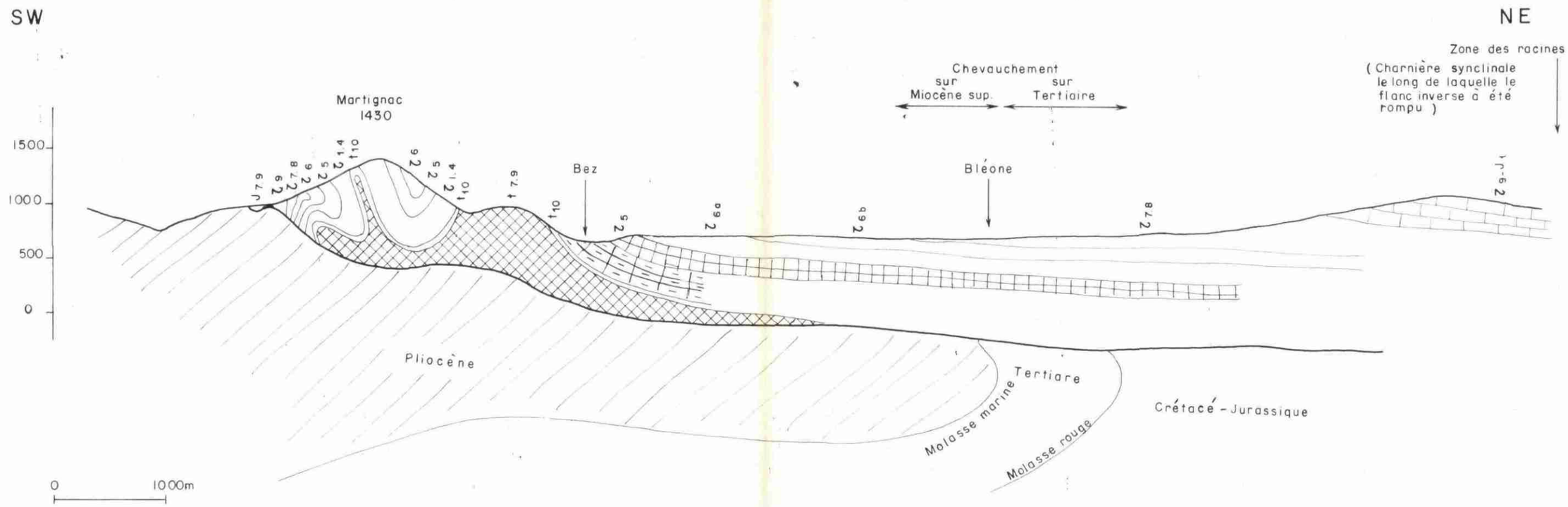
ETUDE DE DEVELOPPEMENT THERMO-MINERAL

COUPES GEOLOGIQUES

SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° **3** (a,b,c,d,e)	MODIFICATIONS
Dessiné le .avril 1978	
78 SGN 202 PRC	

COUPE A _ Nord de Digne



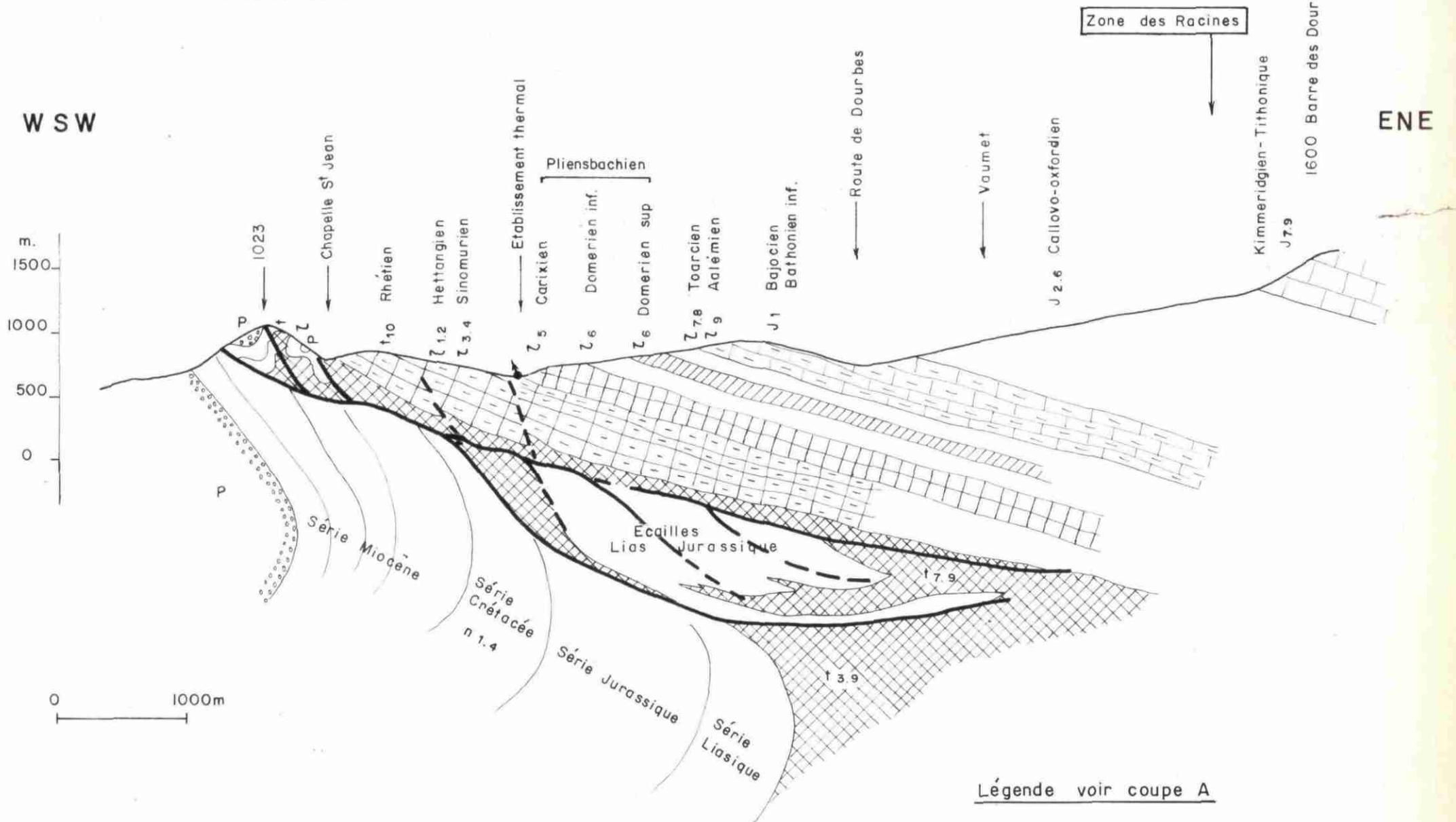
Légende (commune à toutes les coupes)

	P	Pliocène	Poudingue de Valensole		
Miocène	m 3	Pontien	Calcaire lacustre		
	m 2	Vindobonien	Molasse		
	m 1	Aquitanien	Grès, marne, poudingue		
Oligocène	e.g	Lutétien	Calcaire et grès		
Crétacé sup.	C 3-7	Turonien à Maestrichtien	Calcaire blanc	400 m	
	C 1-2	Cénomanien	Marno-calcaire, grès au sommet	110 m	
Crétacé inf.	n 6-7	Albo-Aptien	Marne une intercalation de cal glauconieux	115 m	
	n 5	Aptien inf.	Absent		
	n 4	Barrémien	Calcaire à lits schisteux et marno calc.	75 m	
	n 3	Hauterivien	Marne et marno-calcaire	150 m	
	n 2	Valanginien	Marno-calcaire et marne	250 m	
	n 1	Berriasien	Marno-calcaire	40 m	

Jurassique sup.	J 7-9	Kimméridgien Tithonique	Calcaire massif	200 m
Jurassique moyen	J 2-6	Bathonien sup. Callovien Oxfordien	"Terres noires" (marne schisteuse)	700 m
	J 1	Bajocien + Bathonien sup.	Calcaire et lit schisteux	130 m
Lias	τ 9	Aalénien	Calcaire inter. de schiste, schiste au sommet	150 m
	τ 7-8	Tarcien	Marne	200 m
	τ 6	Dométien	Marne grise calc. au sommet	60 m
	τ 5	Carixien	Calcaire à silex	100 m
	τ 3-4	Sinémurien	Calcaire, marneux au sommet et à la base	110 m
	τ 1-2	Héttangien	Calcaire alternant avec marne	50 m
Trias	t 10	Rhétien	Schiste argileux vert et lumachelles	35 m
	t 7-9	Keuper	Marne, dolomie, gypse, argile	
	t 3-6	Muschelkak	Calcaire et dolomie	

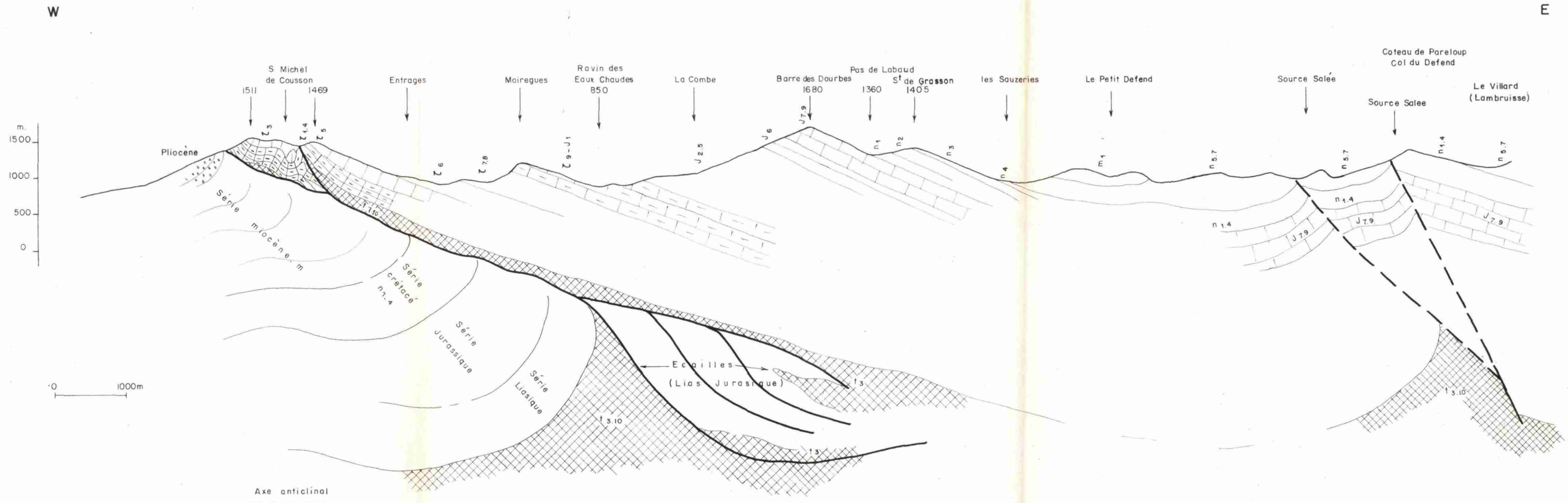
Annexe 3 b

COUPE B _ Chapelle S^{t} Jean _ Emergences thermales _ Barre des Dourbes



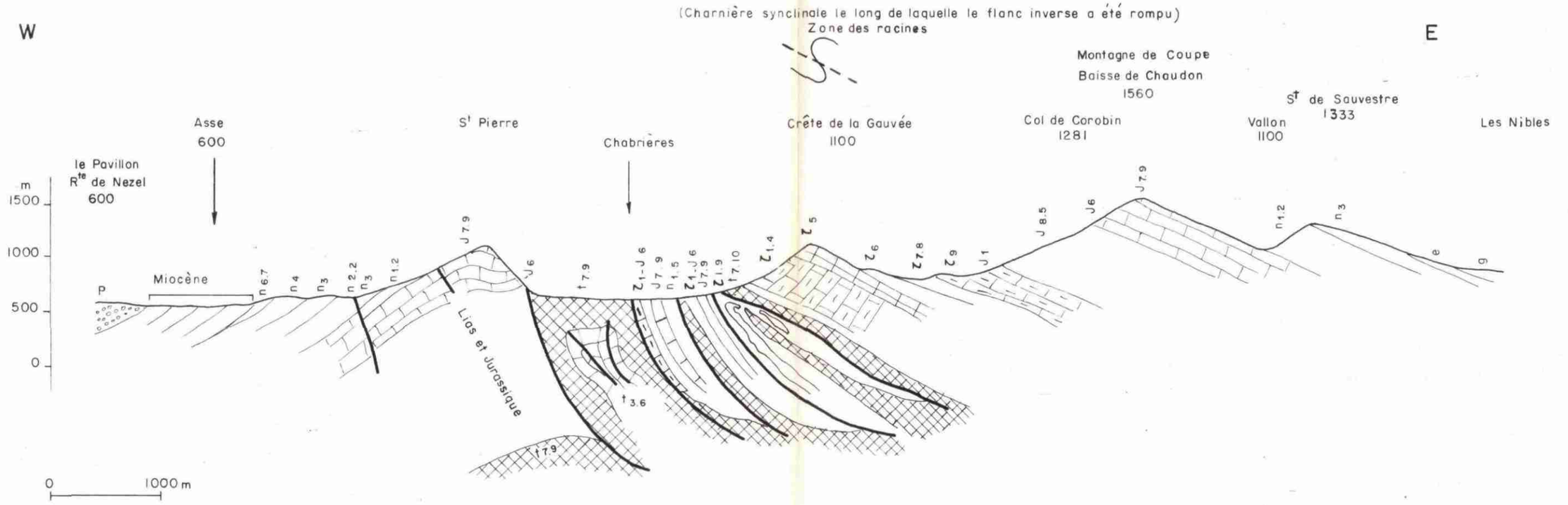
78 SGN 202 PRC

COUPE C _ S[t] Michel de Cousson _ Entrages _ Tartonne



Légende voir coupe A

COUPE D _ Chabrières _ Clumanc



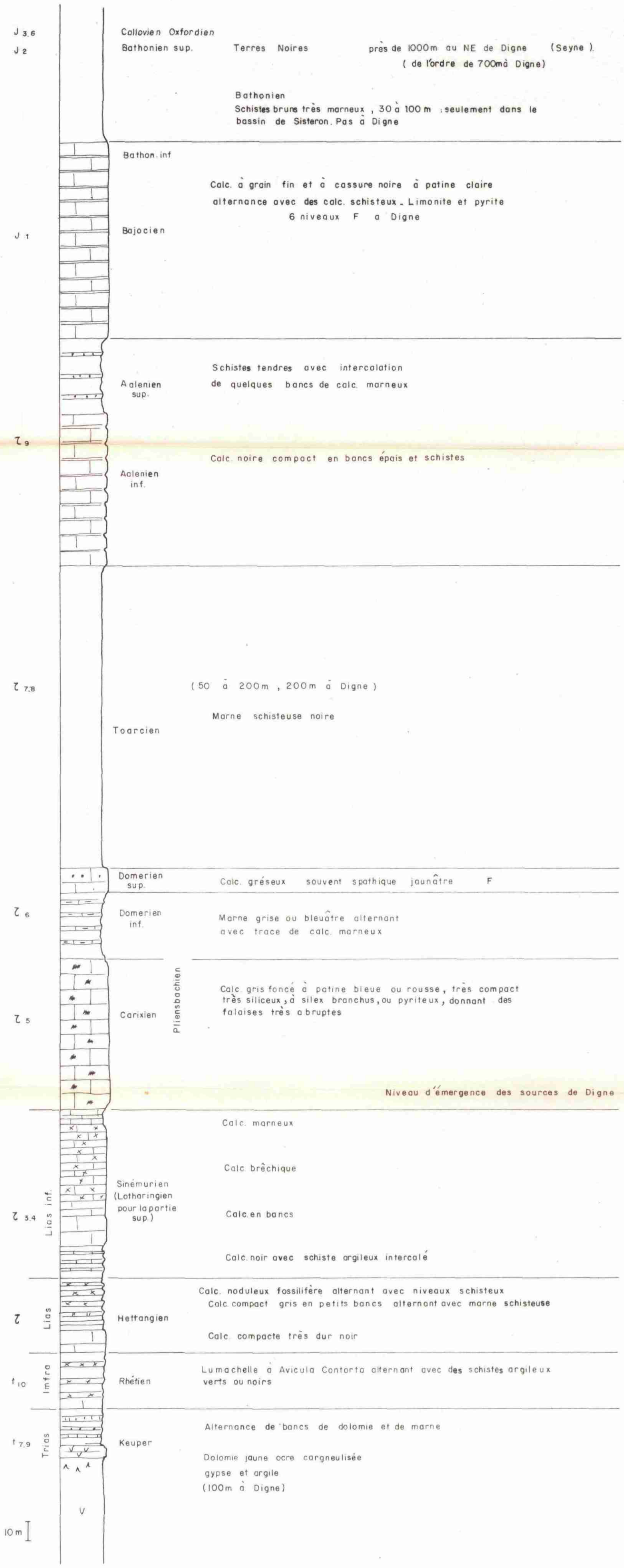
Légende voir coupe A

Annexe 3 e

78 SGN 202 PRC

Digne

Série stratigraphique
Trias _ Lias _ Jurassique inf.



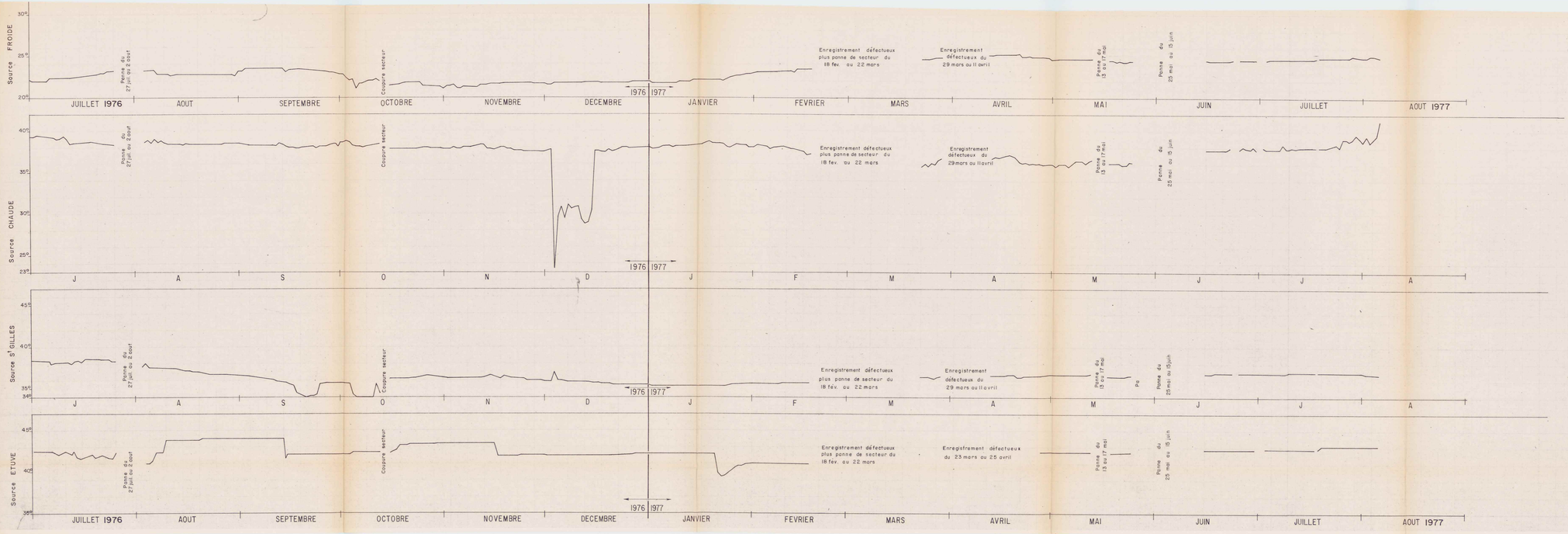
VILLE DE DIGNE
(Alpes de Haute Provence)

ETUDE DE DEVELOPPEMENT THERMO-MINERAL

DISPOSITIFS ET RESULTATS DES MESURES THERMIQUES

SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° 4	MODIFICATIONS
Dessiné le avril 1978	
78 SGN 202 PRC	



ANNEXE 5

ENREGISTREMENT DES TEMPERATURES A L'ETABLISSEMENT THERMAL

DE DIGNE LES BAINS

1. - MATERIEL UTILISE

L'enregistrement des température a été effectué par voie analogique sur un appareil multitraces à scrutation séquentielle, les capteurs de température étaient constitué par des thermomètres à résistance de platine.

1.1. - ENREGISTREMENT :

L'appareil utilisé est un enregistreur à 12 traces type POLYCOMP de la société HARTMANN & BRAUN AG. permettant la mesure de 12 valeurs et leurs enregistrements successifs par points de différentes couleurs sur une même bande de papier de largeur utile 250 mm.

Le pointé des différentes valeurs est effectué toutes les 4 secondes.

L'enregistrement est du type potentiométrique, l'ajustement de la valeur mesurée étant effectuée par un servomécanisme avec potentiomètre de réglage (Pont de Wheatstone).

La position du potentiomètre de précision est repérée sur l'échelle par la position du curseur et le pointage de la valeur mesurée sur la bande d'enregistrement par une tête d'inscription.

L'appareil a été équipé ,pour la circonstance, d'un boitier d'amplitude de mesure permettant l'enregistrement des températures entre 0 et 60°.

L'appareil fonctionnait sur le secteur disponible dans le local d'enregistrement.

Un programmateur à cames réglables CROUZET permettait la mise en service de l'enregistrement pendant une durée de 24 minutes toutes les trois heures.

1.2. - CAPTEURS :

Ils étaient constitués par des thermomètres à résistance de platine PHILIPS type PT.100/150 - R.O. conformes à la norme DIN 43760. Un fil de platine a en effet une résistance qui varie en fonction de la température pour prendre des valeurs déterminées avec précision.

Entre 0 et 100°C, la fonction de résistance est sensiblement une droite de pente 0,4 $\Omega/^{\circ}C$.

Les thermomètres à résistance de platine permettent d'obtenir des limites d'erreur inférieures à 0,1 %.

A 0°c la résistance d'un tel thermomètre est de $100 \pm 0{,}1\Omega$.

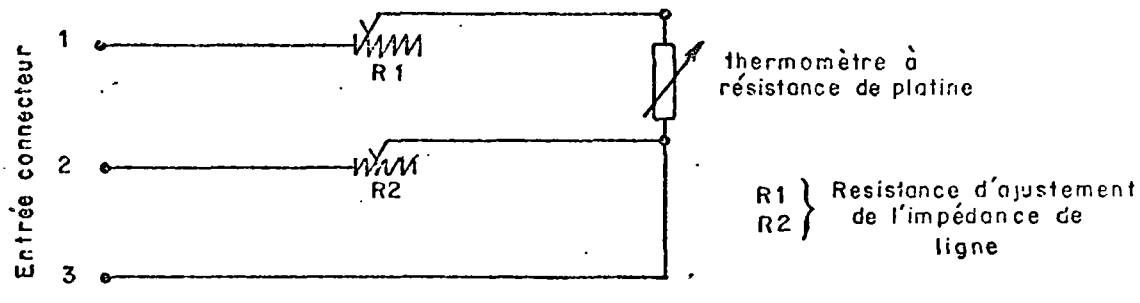
Les sondes thermométriques étaient montées dans un manchon protecteur en acier inox 18/8 de diamètre 6 mm enduit de résine polyester.

La connection avec les lignes de mesures était assurée par un cable blindé 3 conducteurs.

Des cannes en PVC ont été utilisées par la mise en place des éléments sensibles dans les griffons dans de bonnes conditions d'étanchéité des connections.

Le branchement avec l'enregistreur a été effectué suivant le schéma "3 fils" afin d'assurer la compensation des variations de résistance de connection dues aux variations de température.

Le schéma en est donné ci- dessous.



2. - PRATIQUE DES ENREGISTREMENTS

2.1. - IMPLANTATION DES CAPTEURS :

7 capteurs ont été mis en place comme suit :

- Sonde N° 1 : Galerie des étuves, au fond de la galerie dans l'air.
- Sonde N° 2 : Galerie des étuves, dans le griffon en amont du batardeau.
- Sonde N° 3 : Source Saint-Gilles.
- Sonde N° 4 : Grotte de sudation, bassin ouest.
- Sonde N° 5 : Grotte de sudation, bassin est.
- Sonde N° 6 : Source chaude C dans la vasque mise à jour par les travaux en amont du batardeau.
- Sonde N° 7 : Source froide D en amont du batardeau.

Les implantations ont été reportées sur le plan de situation.

La sonde N° 1 a été mise en place pour vérifier que des fluctuations enregistrées sur la sonde N° 2 ne seraient pas dues à des ouvertures prolongées de la porte de la galerie des étuves (Forte déperdition de chaleur).

2.2. - PROBLEMES RENCONTRES EN COURS D'ENREGISTREMENT :

Les enregistrements ont été perturbés tout au long de la période d'observation, les causes ont été multiples :

- Mise à la masse de l'appareil insuffisante.
- Coupures de courant dues aux orages.
- Coupures de courant en raison de travaux dans l'établissement.
- Corrosion des sondes malgré les précautions prises.
- Pannes d'enregistreur (ruptures du câble de commande dans la tête d'inscription).
- Mauvais contact dans les connecteurs.

Les enseignements, qu'il est possible de tirer de cette expérience, consisteront dans l'avenir à prévoir :

- Une meilleure protection des capteurs contre la corrosion. (gainage en plomb ou en téflon).
- La mise en place, en parallèle avec l'enregistreur, d'un détecteur de pannes de secteur, à mouvement d'horlogerie à remontage mécanique pour pouvoir recaler les enregistrements dans le temps et éviter de longues séries douteuses.

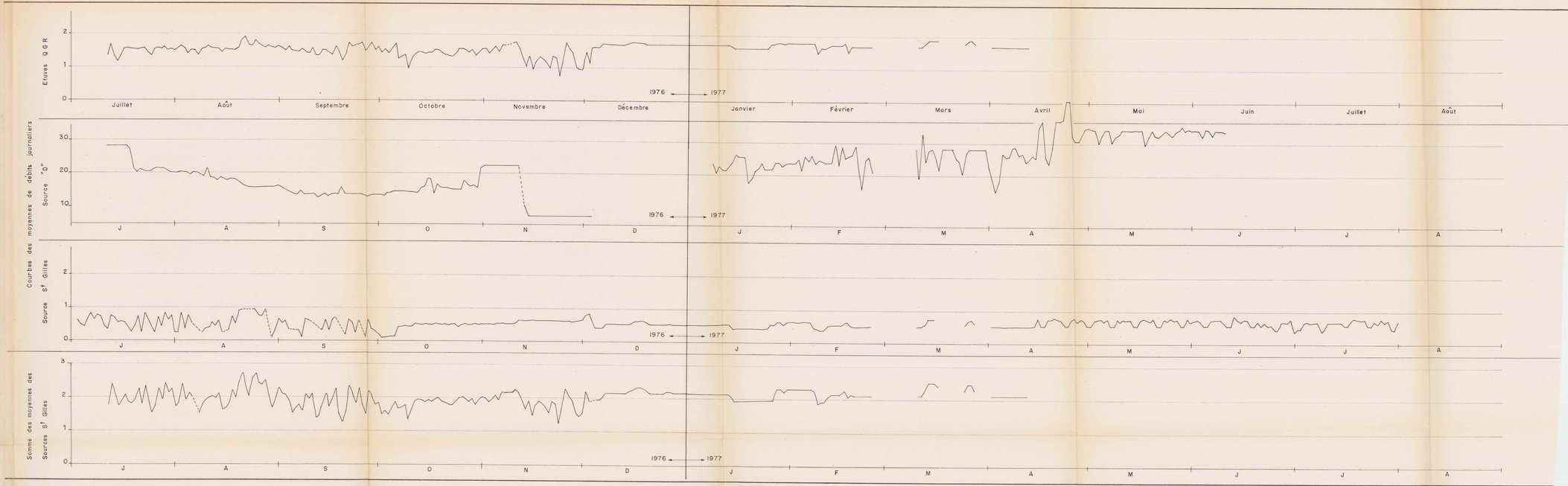
VILLE DE DIGNE
(Alpes de Haute Provence)

ETUDE DE DEVELOPPEMENT THERMO-MINERAL

EVOLUTION DU DEBIT DES EMERGENCES

SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° 6	MODIFICATIONS
Dessiné le avril 1978	
78 SGN 202 PRC	



ANNEXE 7

RECHERCHE DE CORRELATIONS

AVEC DES PRECIPITATIONS

PAR

D. THIERY.

DEPARTEMENT HYDROGEOLOGIE - SGN - ORLEANS.

78 SGN 202 PRC

1 - BUT DE L'ETUDE

On se propose de voir si les variations du débit de la source D peuvent être mises en relation avec celles de l'infiltration des régions voisines.

2 - LES DONNEES DE DEBIT

Les données de débit relatives à la période 1976 - 1977 ne sont pas toutes exploitables ; en particulier, à partir de la fin de l'année 1976, des décalages importants montrent qu'on ne peut accorder aucun crédit aux débits mesurés à partir de cette date.

La seule période qui nous a paru utilisable s'étend du 18 Août au 31 Octobre 1976, soit 75 Jours.

3 - LES DONNEES CLIMATIQUES

Une estimation des précipitations efficaces journalières de l'année 1976 a été calculée à partir des précipitations de la station de Chateau Arnoux au moyen du programme de calcul du BRGM CLIDAT.

4 - LA METHODE DE CALCUL

4. 1 - Corrélation simple

On a tout d'abord calculé les coefficients de corrélation entre la série des débits du Jour J et la série des précipitations efficaces du jour j-k, k variant de 0 à 19 jours. Le résultat obtenu est présenté figure 1. Sur 20 coefficients de corrélation, seuls trois sont légèrement au-dessus du seuil de significativité à 95 %. Tous les autres coefficients ne sont pas significativement différents de zéro.

4. 2. - *Corrélation multiple*

Un calcul de corrélation multiple a été effectué en mettant en relation les 75 observations de débits avec les précipitations efficaces des 20 jours précédents (c'est un calcul de déconvolution).

4. 3. - *Résultats*

Les résultats sont les suivants :

4. 3. 1. - *Coefficient de régression obtenus sans contrainte* :

Les coefficients de régression sont représentés en traits continus ,figure 2.

Le carré du coefficient de corrélation multiple est : $R^2 = 0.45$; le terme constant est égal à 1. 224.

4. 3. 2. - *Coefficient de régression avec contraite de positivité* :

Si on impose aux coefficients de régression de ne pas être négatifs pour éviter que les précipitations efficaces ne produisent une baisse de débit, on obtient les coefficients représentés en traits interrompus sur la figure 2.

Le carré du coefficient de corrélation multiple est alors $R^2 = 0.42$ et le terme constant de 1.218.

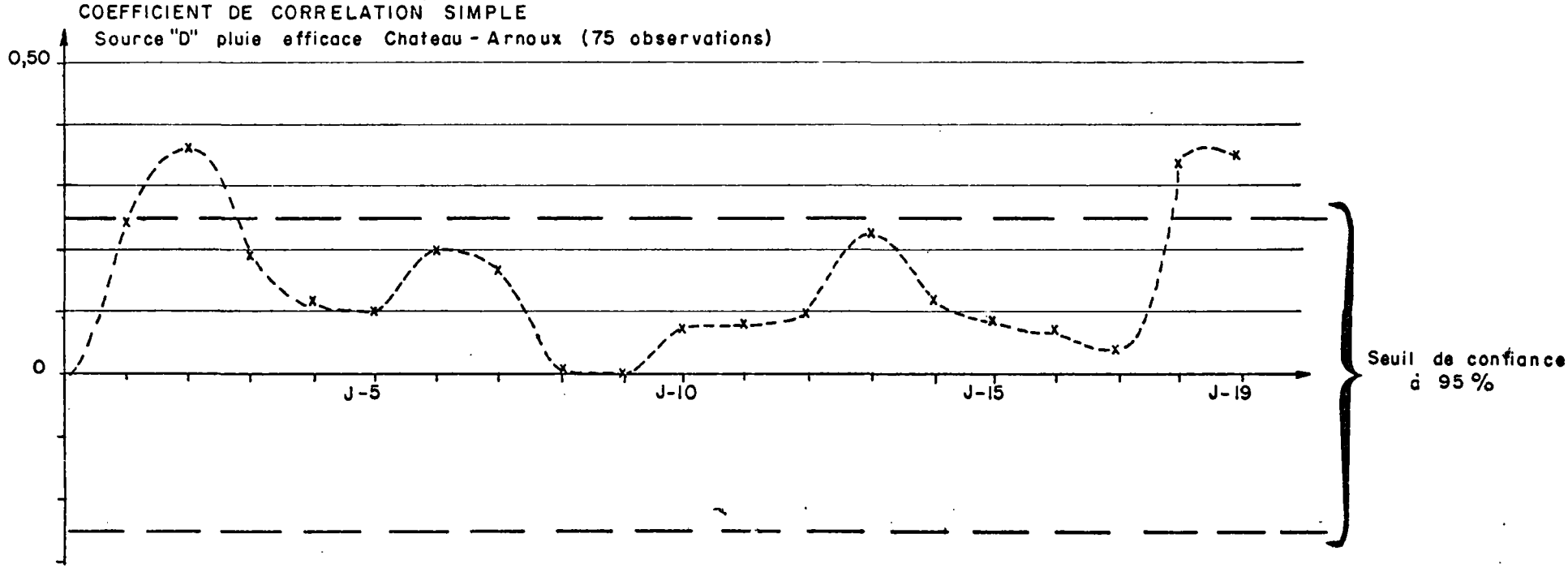
5 - C O N C L U S I O N S

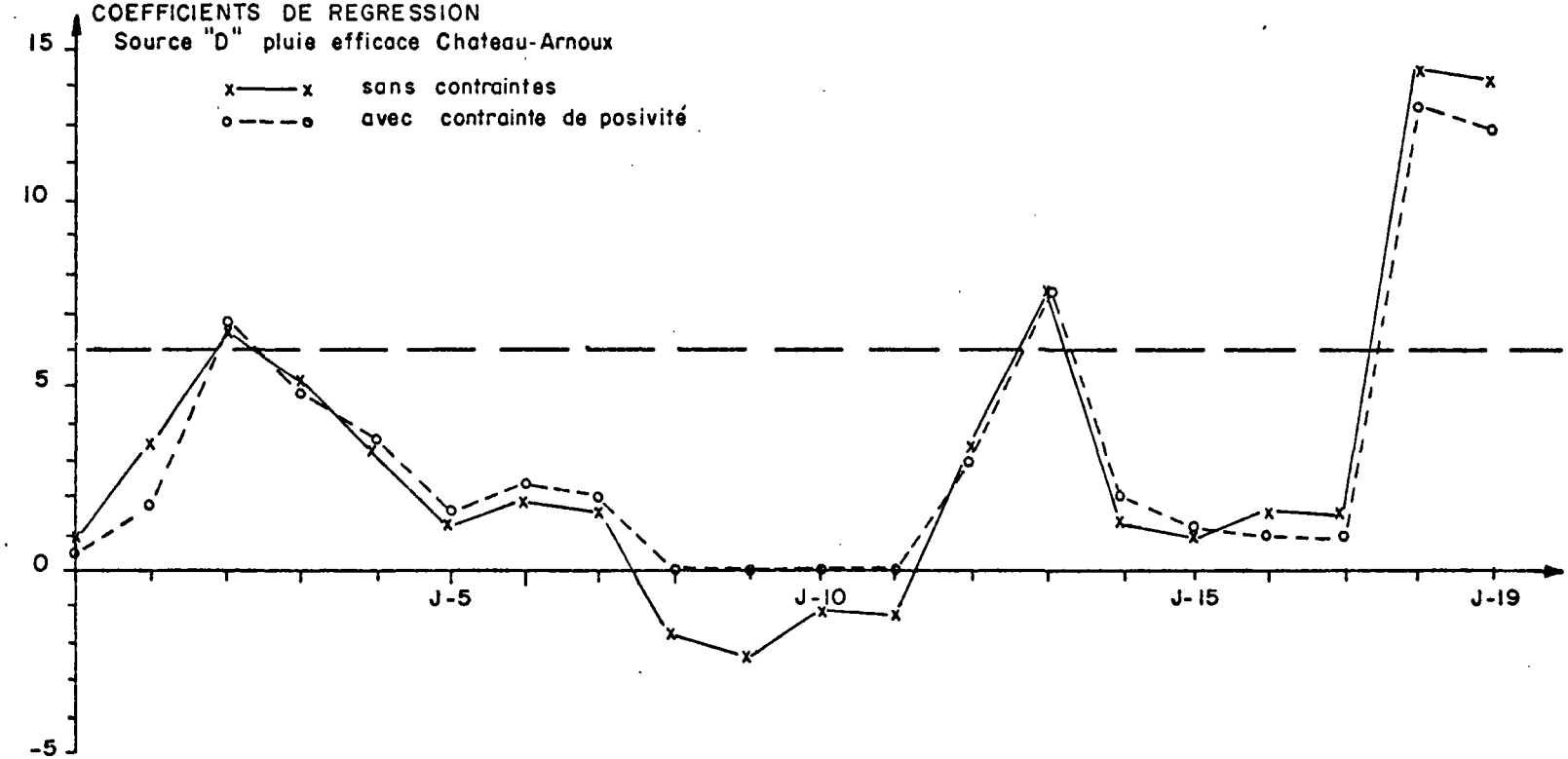
Malgré le choix de la période la plus régulière possible, on n'obtient avec 20 variables (soit 55 degrés de liberté) que des coefficients de corrélation très faibles avec des coefficients de régression n'ayant absolument pas l'allure d'une réponse impulsionnelle. On peut donc affirmer que les variations de la source D ne sont pas significativement reliées à celles des précipitations efficaces de la région interessée.

Un calcul a également été effectué avec les pluies naturelles de Chateau Arnoux. Le carré du coefficient de corrélation était alors égal à zéro.

Il est possible qu'une liaison (assez lache) existe entre le débit de la source D et les précipitations efficaces des mois précédents comme semble le montrer l'évolution générale de l'enregistrement du débit au cours de l'été 1976.

Il faudrait cependant disposer de mesures plus fines et continues de débit pendant de nombreux mois - un à deux ans - pour être en mesure d'étudier une telle relation.





RECHERCHE DE CORRELATIONS AVEC LES PRECIPITATIONS

Annexe : 7