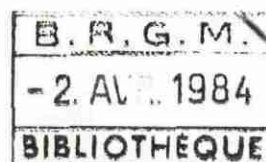


NOVA ENERGIA
Despatx d'Enginyeria



PROJET GÉOTHERMIQUE DES ESCALDES (ANDORRE)

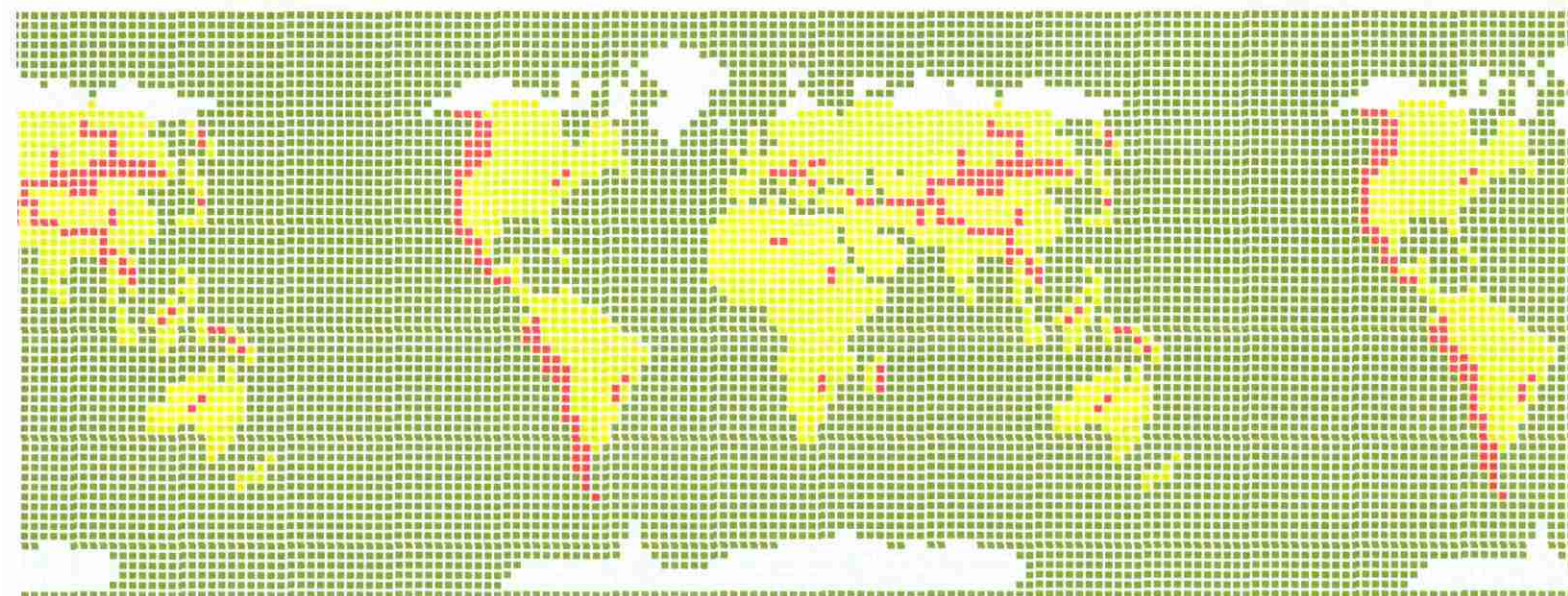
ETUDE SOUS-SOL

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département Géothermie et Hydroénergie

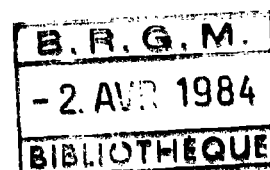


Rapport du B.R.G.M.
84 SGN 116 GTH

Mars 1984



NOVA ENERGIA
Despatx d'Enginyeria
Avda Meritxel 30
ANDORRA LA VELLA



PROJET GÉOTHERMIQUE DES ESCALDES (ANDORRE)

ETUDE SOUS-SOL

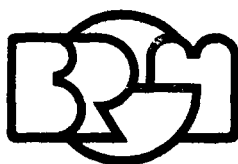
par

J.-Ph. RANCON*, P. PUVILLAND*, F. VUATAZ**

avec la collaboration de

D. GARCIA**, J.Y. HERVE*, F. MERCIER*** et G. WEEKSTEEN****

- * Département Géothermie et Hydroénergie
- ** Institut de Recherches Géothermiques
- *** Département Géophysique
- **** Département Géologie - Division Télédétection



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département Géothermie et Hydroénergie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél. (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

84 SGN 116 GTH

Mars 1984

R E S U M E

L'étude pluridisciplinaire (géologie, hydrogéochimie, gravimétrie) de la zone des sources thermales des Escaldes a permis de mettre en évidence une ressource géothermale de basse énergie exploitable à l'aplomb de cette zone.

Le système hydrothermal qui donne naissance aux deux groupes d'émergences situées en rive gauche du Riu Valira et sur les rives du Riu Madriu est contrôlé par l'intersection de deux accidents régionaux qui marquent le lit de ces deux rivières.

Les remontées d'eaux thermales s'effectuent le long des plans de faille depuis leur lieu d'origine en profondeur et aux joints de stratification des roches affleurantes dans les dernières centaines de mètres sous la surface.

Toutes les sources inventoriées aux Escaldes présentent une communauté d'origine. Les eaux sont très peu minéralisées, de caractère sulfuré sodique comme les autres eaux thermales des Pyrénées Orientales. Les températures mesurées à l'émergence varient entre 17 et 67°C et la température du fluide profond a été estimée à $80 \pm 5^\circ\text{C}$ par géothermométrie. Cette température est susceptible d'être atteinte à une profondeur de 300 ± 100 m.

Le débit total des 36 points d'émergence est de l'ordre de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ et constitue la valeur minimale du débit que l'on peut espérer obtenir par recaptage.

La zone fortement fracturée et broyée, située dans la partie basse du Riu Madriu, en aval du Pont de Pierre, apparaît la plus favorable à l'implantation de forages de recaptage.

Pratiquement, cela revient à établir la (ou les) plateforme(s) de forage sur les rives du Riu Madriu, entre le Riu Valira et l'ancien Pont de Pierre.

La solution que nous préconisons, qui apparait la plus rentable économiquement et la plus appropriée au recaptage de la ressource géothermale des Escaldes, consiste en l'implantation d'un ou deux forages en petit diamètre, pouvant atteindre une profondeur de 200 à 300 m.

S O M M A I R E

=====

1 - <u>INTRODUCTION</u>	1
2 - <u>METHODOLOGIE</u>	3
2.1. - ETUDE GEOLOGIQUE.....	3
2.2. - ETUDE GEOCHIMIQUE.....	3
2.3. - ETUDE GRAVIMETRIQUE.....	4
2.3.1. - Principe.....	4
2.3.2. - Calcul de l'anomalie de Bouguer.....	6
2.3.3. - Calcul de résiduelle.....	7
2.3.4. - Calcul de gradient.....	7
3 - <u>CONTEXTE GEOLOGIQUE DES SOURCES THERMALES DES ESCALDES</u>	8
3.1. - LOCALISATION DES SOURCES.....	8
3.2. - PHOTO-INTERPRETATION STRUCTURALE ET LITHOLOGIQUE DE LA ZONE ESCALES-ENGORDANY-EL NOGUER.....	8
3.2.1. - Cadre tectonique.....	10
3.2.2. - Lithologie et stratification.....	10
3.3. - ETUDE DE TERRAIN.....	13
3.3.1. - Lithostratigraphie.....	13
3.3.2. - Cartographie.....	14
3.3.3. - Microtectonique.....	21
3.4. - CONCLUSIONS GEOLOGIQUES.....	23
3.5. - BIBLIOGRAPHIE ET DOCUMENTS UTILISES.....	23
4 - <u>GEOCHIMIE DES SOURCES</u>	25
4.1. - CARACTERISTIQUES GENERALES.....	25
4.2. - EVALUATION DU DEGRE D'INFLUENCE DES EAUX SUPERFICIELLES SUR LES SOURCES THERMALES.....	25

.../...

4.3. - EVALUATION DU DEBIT TOTAL DES SOURCES THERMALES.....	30
4.4. - EVALUATION DU REFROIDISSEMENT PAR CONDUCTION.....	33
4.5. - ESTIMATION DE LA TEMPERATURE EN PROFONDEUR.....	33
4.6. - GAZ DISSOUS DANS L'EAU THERMALE.....	36
4.7. - ISOTOPES STABLES DE L'EAU.....	37
4.8. - CONCLUSIONS GEOCHIMIQUES.....	37
4.9. - BIBLIOGRAPHIE.....	39
5 - <u>ETUDE GRAVIMETRIQUE</u>	42
5.1. - INTRODUCTION.....	42
5.2. - STATISTIQUES.....	42
5.3. - EXECUTION DES TRAVAUX.....	43
5.3.1. - topographie.....	43
5.3.2. - Gravimétrie.....	43
5.4. - COMPILATION DES DONNEES.....	46
5.5. - RESULTATS.....	46
5.6. - INTERPRETATION GEOPHYSIQUE.....	50
5.7. - CONCLUSION GEOPHYSIQUE.....	50
6 - <u>SYNTHESE DES DONNEES : MODELE DE CIRCULATION</u>	52
7 - <u>PROPOSITION DE PROGRAMME DE FORAGE</u>	56
7.1. - TECHNIQUE DE FORAGE PRECONISEE.....	56
7.2. - PROGRAMME DE FORAGE RESUME.....	56
7.3. - DEVIS ESTIMATIF.....	58
8 - <u>RECOMMANDATIONS</u>	59

LISTE DES FIGURES

=====

- Figure 1** : Situation des sources thermales de la commune des Escaldes
- Figure 2** : Localisation des différentes sources thermales des Escaldes (échelle 1/1 000 e)
- Figure 3** : Photo-interprétation lithologique et structurale de la zone Escaldes-Engordany-Engolasters
- Figure 4** : Carte géologique de la zone des sources thermales
- Figure 5** : Les affleurements du substratum de la zone des sources thermales
- Figure 6** : Coupe géologique dans le lit du Riu Madriu
- Figure 7** : Représentation des directions de micro-fracturation relevées dans la zone des sources thermales
- Figure 8** : Relation Magnésium-Silice
- Figure 9** : Décroissance du pH avec l'augmentation de la température
- Figure 10** : Croissance de la température en fonction du débit
- Figure 11** : Oxygène 18, deutérium et altitude de la zone de recharge des eaux thermales des Escaldes
- Figure 12** : Histogramme des points doubles
- Figure 13** : Profil régional Sta Julia-Canillo
- Figure 14** : Carte des anomalies de Bouguer en densité 2,7
- Figure 15** : Modélisation du système hydrothermal des Escaldes et distribution des isothermes suivant une coupe parallèle au Riu Madriu
- Figure 16** : Modélisation du système hydrothermal des Escaldes et distribution des isothermes suivant une coupe parallèle au Riu Valira
- Figure 17** : Programme technique de forage
- Figure 18** : Délimitation du meilleur secteur d'implantation des forages de recaptage

LISTE DES PLANCHES HORS TEXTE

Planche I : Plan de situation des stations gravimétriques

Planche II : Plan des altitudes

Planche III : Plan de l'anomalie de Bouguer en densité 2,7

Planche IV : Régional polynome ordre 4

Planche V : Résiduelle polynome ordre 4

Planche VI : Gradient vertical gravimétrique au sol

1 - INTRODUCTION

Une première expertise effectuée en novembre 1983 par le BRGM sur le site des sources thermales de la commune des Escaldes (rapport 83 ELE 13 EXP) a conclu à la validité d'une ressource géothermale dans cette zone (fig. 1).

A la suite des premiers résultats obtenus et à la demande de Nova Energia (MM. J. Llovera et T. Riberaygua), une étude sous-sol complète comprenant des travaux de géologie, hydrogéochimie et géophysique (gravimétrie) a été menée en janvier 1984 par le BRGM (Département Géothermie avec des appuis de l'Institut de Recherches Géothermiques et du Département Géophysique).

Le but de cette étude a été de rechercher une cible géothermique dont les caractéristiques de température et de débit soient compatibles avec un projet de forage de recaptage peu profond. Elle a permis d'identifier le contexte géologique et structural de la zone d'émergence et de connaître les caractéristiques du système hydrothermal profond.

Les conclusions de l'étude aboutissent à l'élaboration d'un modèle de circulation des fluides géothermaux à l'aplomb de la zone des Escaldes et au choix d'un secteur d'implantation de forages de recaptage.

Par ailleurs, un programme détaillé de forage est fourni et doit permettre de préparer la phase suivante des travaux.

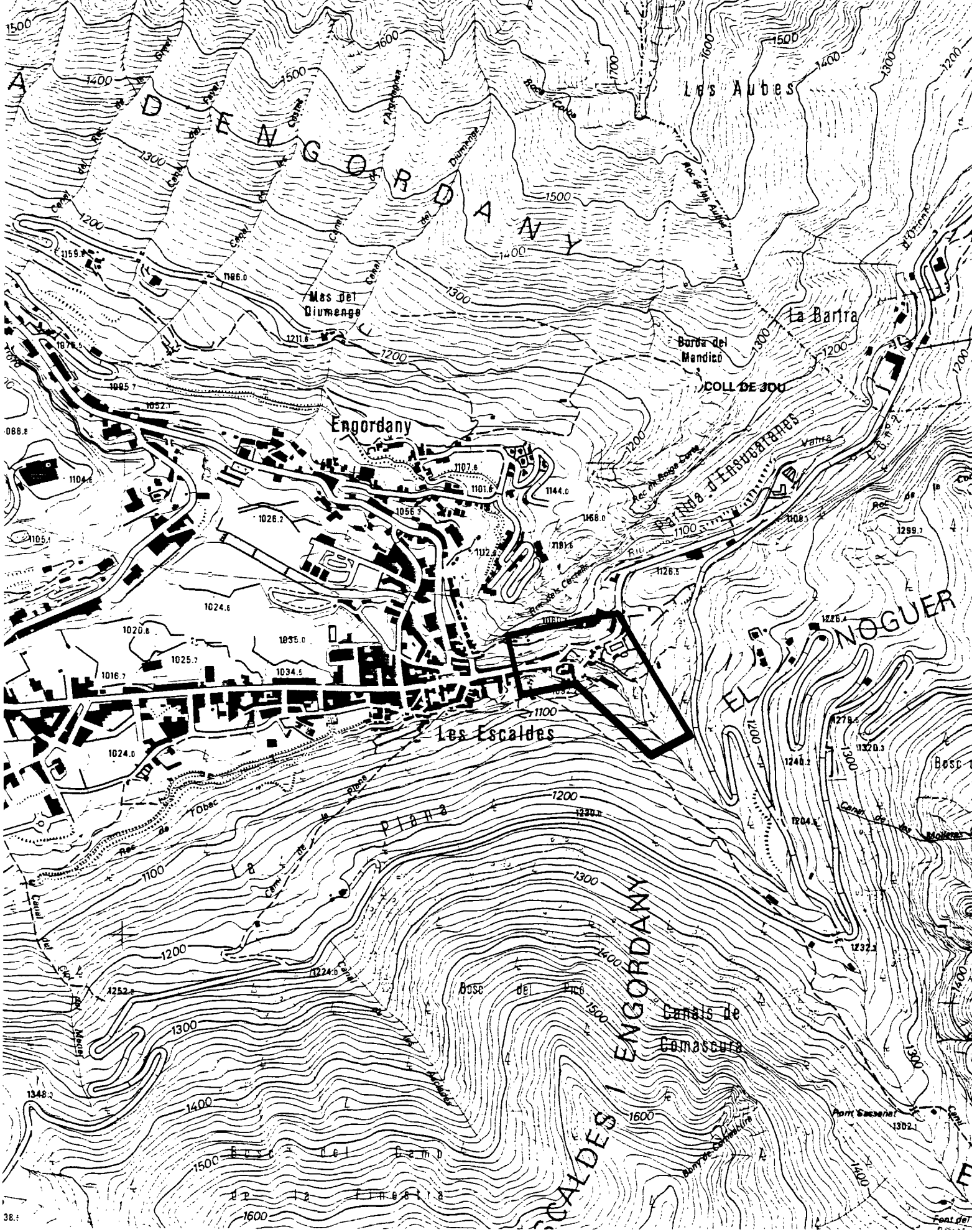


FIG.1 : SITUATION DES SOURCES THERMALES DE LA COMMUNE DES ESCALDES

2 - METHODOLOGIE

2.1. - ETUDE GEOLOGIQUE

Son objectif est d'obtenir une bonne image de la lithologie et des structures tectoniques qui constituent le contexte géologique régional et contrôlent les émergences.

Deux types d'investigations ont été menées en parallèle :

- une interprétation des photos aériennes au 1/5 000e et au 1/16 000e de la zone Escaldes-Engordany-Val d'Andorre. L'échelle de ces photos a permis de faire une interprétation détaillée des fractures visibles dans les secteurs affleurants ou sub-affleurants ainsi que de celles qui contrôlent les talweg. Les grandes unités lithologiques qui possèdent des photofaciès différents ont également pu être distinguées ;
- une étude de terrain qui a porté sur l'examen des différentes unités lithostratigraphiques, la microfracturation, les contrastes lithologiques et la situation des émergences dans la zone des Escaldes.

Les différentes informations sont présentées sous la forme d'une carte d'affleurements au 1/1 000e dans la zone des sources (fig. 5) et de deux cartes géologiques et structurales au 1/5 000e et 1/16 000e établies en utilisant le support des photos aériennes (fig. 3 et 4) couvrant la zone Escaldes-Engordany-Val d'Andorre.

2.2. - ETUDE GEOCHIMIQUE

Sept sources et une eau de rivière (Riu Madriu) ont été échantillonnées. Les résultats d'une première mission effectuée en novembre 1983 ainsi que les données du rapport de Nova Energia (1983) sont aussi utilisées dans cette étude.

Un certain nombre de mesures (température, pH, potentiel d'oxydo-réduction, oxygène dissous, conductivité électrique, débit) a été effectué directement sur le site.

La réserve alcaline (Rb) a été analysée le soir même. L'eau prélevée a été conditionnée de façon spécifique dans des flacons en fonction des analyses à effectuer. Les échantillons ont été filtrés à 0.45 μm , sous pression d'azote.

Cations	: 250 ml, filtré, acidifié avec HNO_3 à $\text{pH} \approx 1$
Anions	: 500 ml, filtré
Silice	: 125 ml, filtré, dilué environ 2 x
Ammoniaque	: 100 ml, filtré, acidifié avec HCl à $\text{pH} \approx 4$
Soufre	: 150 ml, filtré, flacon en verre, + NaOH , + acétate de zinc pour précipiter les sulfures
Elements traces	: 50 ml, filtré, acidifié avec HNO_3 à $\text{pH} \approx 1$
D/ ^{18}O	: 250 ml
^{18}O (SO_4)	: 2500 ml, + 50 ml acétate de cadmium en milieu acide pour précipiter les sulfures
Gaz dissous	: ampoule de verre de 250 ml munie d'un robinet à graisse, mise sous vide (10^{-6} mm Hg), prélèvement de 150 ml d'eau environ en évitant tout contact avec l'atmosphère.

En laboratoire, les méthodes analytiques suivantes ont été employées :

- . Spectroscopie d'absorption atomique de flamme :
Na, K, Mg, Ca, Fe
- . Spectroscopie d'absorption atomique de four :
Li, Al, As, Cs, Rb, Sr
- . Colorimétrie : SiO_2 , NH_4 , B
- . Volumétrie : CO_3 , HCO_3
- . Electrode spécifique : F, Cl, NO_3
- . Néphélométrie : SO_4

2.3. - ETUDE GRAVIMETRIQUE

2.3.1. - Principe

Le principe de la prospection gravimétrique repose sur l'étude des variations fines du champ de pesanteur terrestre, champ qui dépend essentiellement de la masse et de la forme de la terre, mais qui localement est influencé par l'attraction des terrains proches.

L'influence d'une masse quelconque placée à proximité du gravimètre est fonction de son volume, de sa densité et de la distance entre son centre de gravité et celui du gravimètre.

En géologie, les principes restent les mêmes, mais on ne définit plus les masses en elles-mêmes, mais par rapport à leurs encaissants, d'où la notion de contraste de densité entre deux formations.

Les mesures gravimétriques de terrain sont toujours des mesures relatives, c'est-à-dire que l'opérateur mesure la différence de pesanteur entre une station quelconque et une station de référence appelée base. Les mesures sont effectuées à partir de cette base puis de station en station avec retour à la base toutes les heures environ. Ce retour à la base qui constitue ce que l'on appelle la fermeture est indispensable car il permet de corriger les dérives de l'appareil. A partir des profils, on obtient par différence avec la valeur de base et après correction de dérive, correction luni-solaire, et éventuellement d'étalonnage, la valeur de g en chaque station.

La valeur de g est donc obtenue par la formule suivante :

$$g = (VL\emptyset - VLS) K_e + CLS + DVE \quad (1)$$

avec $VL\emptyset$: valeur lue à la base lors de l'ouverture,

VLS : valeur lue à la station,

K_e : coefficient d'étalonnage de l'appareil,

CLS : correction luni-solaire,

DVE : correction de dérive de l'appareil.

Coefficient d'étalonnage (K_e)

Chaque gravimètre possède un coefficient d'étalonnage qui permet, par simple multiplication, de transformer les lectures affichées sur l'appareil en unités gravimétriques. Ce coefficient n'est pas fixe, mais varie lentement dans le temps : d'où la nécessité de réétalonner périodiquement les gravimètres.

Correction luni-solaire (CLS)

La pesanteur en un point du globe est modulée par l'attraction dûe aux masses du Soleil et de la Lune. Cette attraction est fonction de la position de ces astres par rapport à la Terre, donc de l'heure et du lieu de mesure.

On calcule cette influence soit par la formule de J. GOGUEL (1954), soit par la formulation de CARTWRIGHT et TAYLER (1971).

Correction de dérive instrumentale (DVE)

Les mesures successives à la base de référence permettent, une fois déduite l'influence luni-solaire, de mettre en évidence des écarts de lecture qui constituent la fermeture. Ces écarts sont dûs à la dérive instrumentale de l'appareil.

Cette dérive est supposée linéaire, ce qui permet de la répartir proportionnellement au temps sur toutes les stations mesurées entre deux passages à la base.

2.3.2. - Calcul de l'anomalie de Bouguer

La valeur de la pesanteur (notée g) obtenue par la formule (1) n'est pas directement exploitable car elle est fortement influencée par les conditions locales :

- . Latitude de la station (CLAT),
- . altitude de la station (Z),
- . forme et importance du relief entourant la station (CT).

L'anomalie de Bouguer est donnée par la formule :

$$AB = g + CLAT + CZ + CT + TRE \quad (2)$$

- avec AB : anomalie de Bouguer en milliGal,
g : valeur de la pesanteur en milliGal,
CLAT : correction de latitude en milliGal,
CZ : correction d'altitude en milliGal,
CT : correction topographique en milliGal,
TRE : correction de trépied.

Correction de latitude (CLAT)

La valeur de la pesanteur en un point quelconque du globe est fonction de la distance entre ce point et le centre de gravité de la Terre. Or, l'on sait que la Terre n'est pas une sphère mais un géoïde, c'est-à-dire un ellipsoïde de révolution imparfait avec un rayon équatorial plus grand que le rayon polaire.

La méthode de calcul de la correction de latitude consiste en une méthode purement mathématique qui permet de calculer une pesanteur théorique g_0 en fonction de la latitude sur l'ellipsoïde de référence.

Correction d'altitude (CA)

La valeur de la pesanteur est très sensible à l'altitude de la station (- 3 microGal par centimètre d'élévation), aussi il est important de connaître l'altitude de la station à quelques centimètres près. Afin de simplifier les calculs et d'augmenter la précision des mesures, on fait niveler les piquets au ras du sol et on effectue les mesures sur la coupelle posée directement sur le sol, il y a lieu de ramener l'altitude station à l'altitude coupelle.

La correction d'altitude est effectuée à l'aide de la formule suivante :

$$CA = (0,3086 - 0,0419 \times d) Z$$

avec CA : correction d'altitude en milliGal,
d : densité des terrains superficiels,
Z : altitude exprimée en mètre de la station.

La densité des terrains superficiels est fonction de la nature géologique de ces terrains.

Correction topographique (CT)

Le relief entourant une station, par excès ou par défaut de masse, tend à diminuer la pesanteur en ce point et ce d'autant plus que les dénivelées sont importantes et plus proches de la station.

La correction topographique est déterminée sur le terrain dans un rayon de 40 mètres à l'aide d'un abaque placé sur la carte topographique. L'opérateur détermine pour chaque compartiment de l'abaque la différence d'altitude entre la station et l'altitude moyenne du compartiment, différence qui est ensuite convertie en mGal à l'aide d'une table des corrections topographiques (table de Hammer, ou autres).

Les corrections topographiques ne sont pas effectuées (en micro-gravimétrie) au-delà de 40 mètres, car les variations sont très lentes et interviennent dès lors comme un gradient régional.

2.3.3. - Calcul de résiduelle

Il peut arriver dans certains cas particuliers que la carte d'anomalie de Bouguer obtenue soit ininterprétable en raison de la présence d'un fort gradient régional lié soit au relief avoisinant insuffisamment corrigé, soit à des conditions géologiques particulières. Dans ce cas, il est indispensable de réaliser une carte dite "résiduelle".

Une carte résiduelle est une carte d'anomalie de Bouguer à laquelle on a retranché un régional plan ou non. Seul un régional plan peut être calculé à la main, il est alors déterminé d'une manière graphique de la même façon que pour la correction de latitude. Pour le calcul de régional plus complexe ou de gradient vertical du champ de pesanteur, il sera nécessaire de traiter les données au moyen d'un ordinateur.

2.3.4. - Calcul du gradient

Le calcul d'un gradient vertical est une opération mathématique qui, à partir des variations de l'anomalie en surface, est capable de rendre compte de cette variation en fonction de la profondeur. La carte qui en est tirée met surtout l'accent sur les accidents géologiques (failles) et les compartiments lourds ou légers. Comme la carte des résiduelles, à laquelle elle ressemble en général, elle sera représentative des structures superficielles.

3 - CONTEXTE GEOLOGIQUE DES SOURCES THERMALES DES ESCALDES

3.1. - LOCALISATION DES SOURCES

Trente neuf émergences d'eaux thermales ont été répertoriées sur le territoire de la commune des Escaldes. Ces différentes sources, dont les températures s'échelonnent entre 17,5 et 70°C sont étalées sur une distance de 300 m environ (fig. 2) et appartiennent -géographiquement- à deux groupes d'émergences :

- . une première famille de sources grossièrement alignées NO-SE est située sur les deux rives du Riu Madriu,
- . une seconde famille est caractérisée par des griffons situés en rive gauche du Riu Valira et orientés NE-SO.

Notons également la situation de la source n° 1 relativement éloignée de ces deux groupes, sur le sentier longeant la piscine.

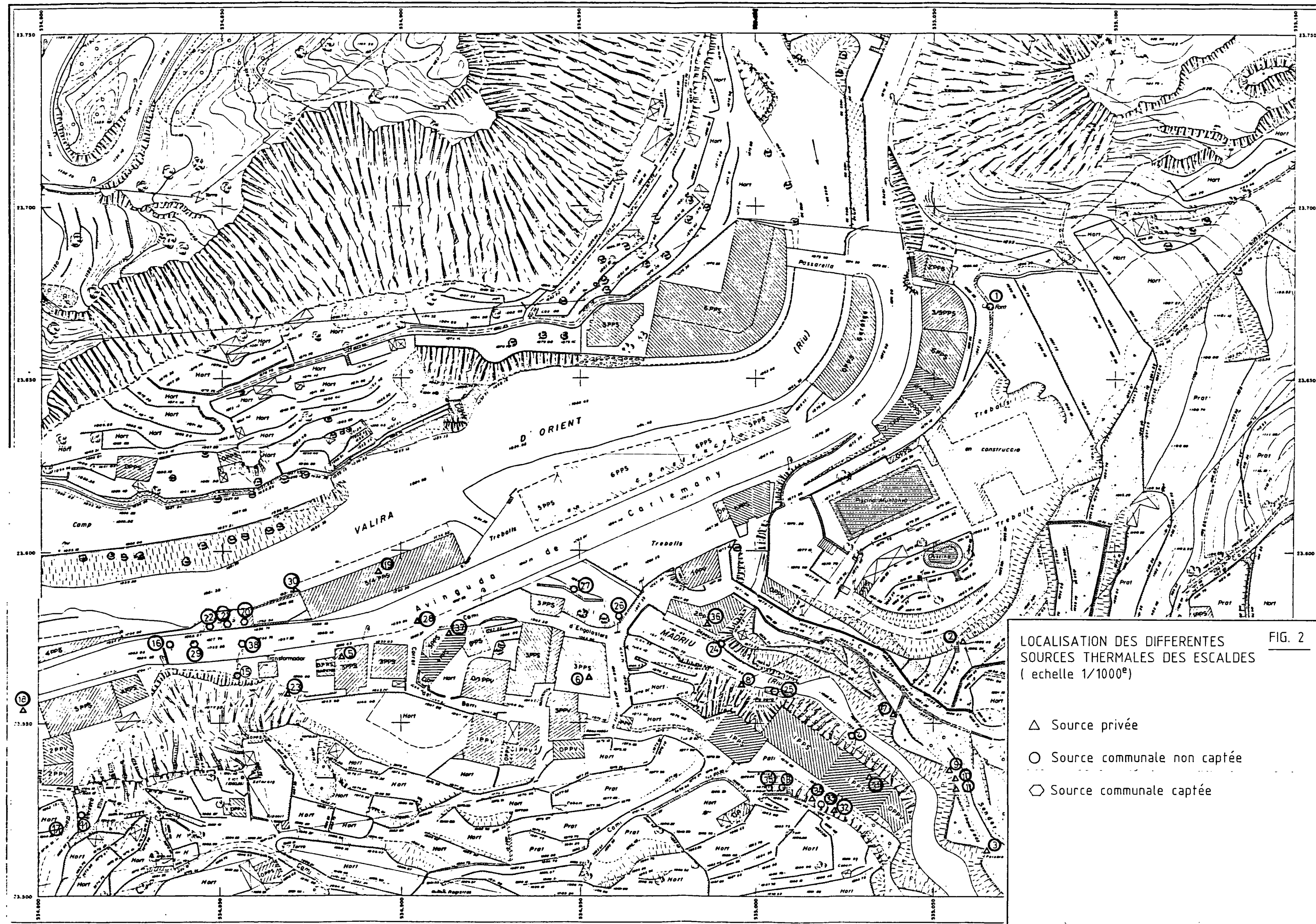
Certaines sources (fig. 2), localisées sur les terrains communaux (O) sont déjà captées (◐) pour le chauffage urbain ; d'autres appartiennent à des propriétaires privés (Δ) et sont captées (chauffage de la piscine Muntanya) ou non.

Les différentes caractéristiques des sources thermales (température, débit, ...) sont présentées dans la partie hydrogéochimique (voir § 4 et tableau 5).

3.2. - PHOTO-INTERPRETATION STRUCTURALE ET LITHOLOGIQUE DE LA ZONE ESCALDES-ENGORDANY-EL NOGUER

La zone des sources thermales située dans le prolongement du Val d'Andorre est encaissée entre la falaise en rive droite du Riu Valira (Roc dels Castells), les massifs d'Engolasters et de l'Hopital.

Une interprétation du contexte régional dans lequel s'inscrit la zone des sources a pu être faite à partir des photos aériennes au 1/16 000e (fig. 3).



Plusieurs traits structuraux et lithologiques se dégagent de l'observation :

3.2.1. - Cadre tectonique

La plupart des accidents observés sont à imputer à la tectonique pyrénéenne éocène qui a provoqué l'ouverture de nombreuses failles et la réactivation d'anciennes cassures hercyniennes.

- . On constate l'existence d'une tectonique cassante parallèle au Val d'Andorre et à la vallée du Riu Valira. Les accidents de cette famille ont une direction NE-SO à NNE-SSO. Ils sont probablement à l'origine du creusement du Val d'Andorre par l'intermédiaire d'un réseau hydrographique guidé par la fracturation.
- . Une autre famille de failles bien visibles dans le paysage est transverse à ces premières et correspond à des accidents NO-SE présents sur le flanc sud du Riu Valira. L'un d'entre eux "marque" le tracé du Riu Madriu. Sur ce même flanc, des diaclases sub-orthogonales contrôlant le débit des formations affleurantes sont observables en rive droite du Riu Madriu.
- . Une troisième famille de failles a été identifiée sur le flanc nord de la Valira dans des formations stratifiées. Ces failles N-S à NO-SE correspondent à une discontinuité de la stratification. Leur densité est importante au Nord d'Engordany.
- . Enfin, une quatrième catégorie d'accidents orientés E-O sur le flanc nord de la Valira est concordante avec les formations stratifiées et peut correspondre pro parte à des charriages.

3.2.2. - Lithologie et stratification

En ce qui concerne les lithofaciès, une limite entre une zone affleurante et non-affleurante a pu être tracée sur le flanc sud de la Valira. Cette distinction entre deux lithofaciès est localement marquée par un accident sub-parallèle au Riu Madriu et doit résulter du remaniement et du recouvrement détritique (Quaternaire de la figure 3) des bordures de la formation granitique en rive gauche du Riu Valira (carte géologique d'Andorre au 1/50 000e, Sole-Sabaris et Llopis-Llado).

Sur le flanc nord de la Valira et au Nord d'Engordany, une limite de photofaciès discrète mais continue peut être interprétée comme le contact Silurien-Dévonien dessiné sur la carte géologique au 1/50 000e.

Sur ce même flanc, il est souvent possible de déterminer sur des affleurements très bien dégagés la stratification et le pendage nord des bancs sédimentaires. Des terminaisons périclinales sont également visibles localement.

FIG. 3

PHOTO INTERPRETATION LITHOLOGIQUE ET STRUCTURALE
DE LA ZONE ESCALDES-ENGORDANY-ENGOLASTERS

PHOTO FRACTURATION

-  Faille majeure
-  Faille secondaire ou supposée

LIMITE DE PHOTO FACIES

-  Zone affleurante / Quaternaire

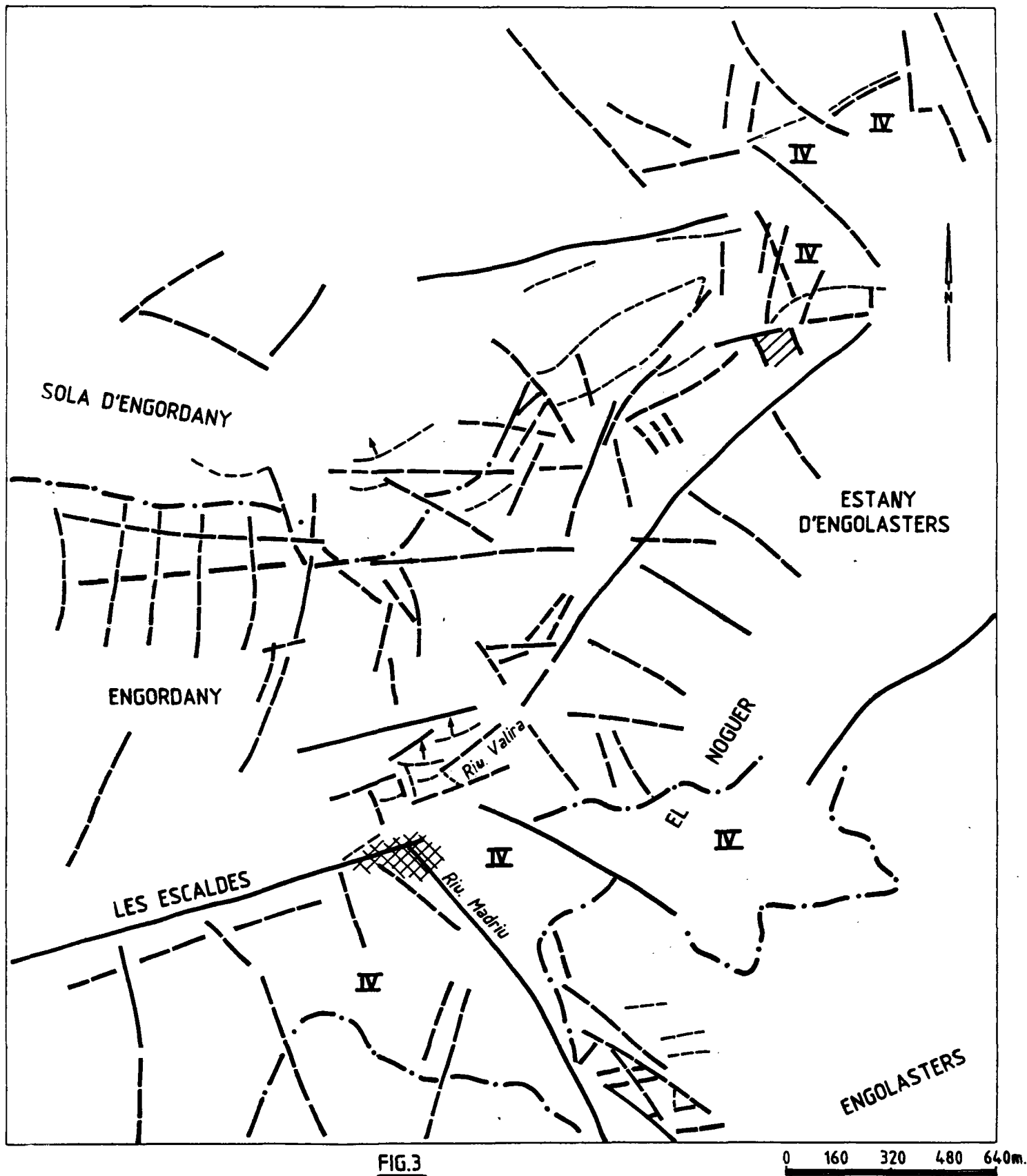
-  Stratification , schistosité

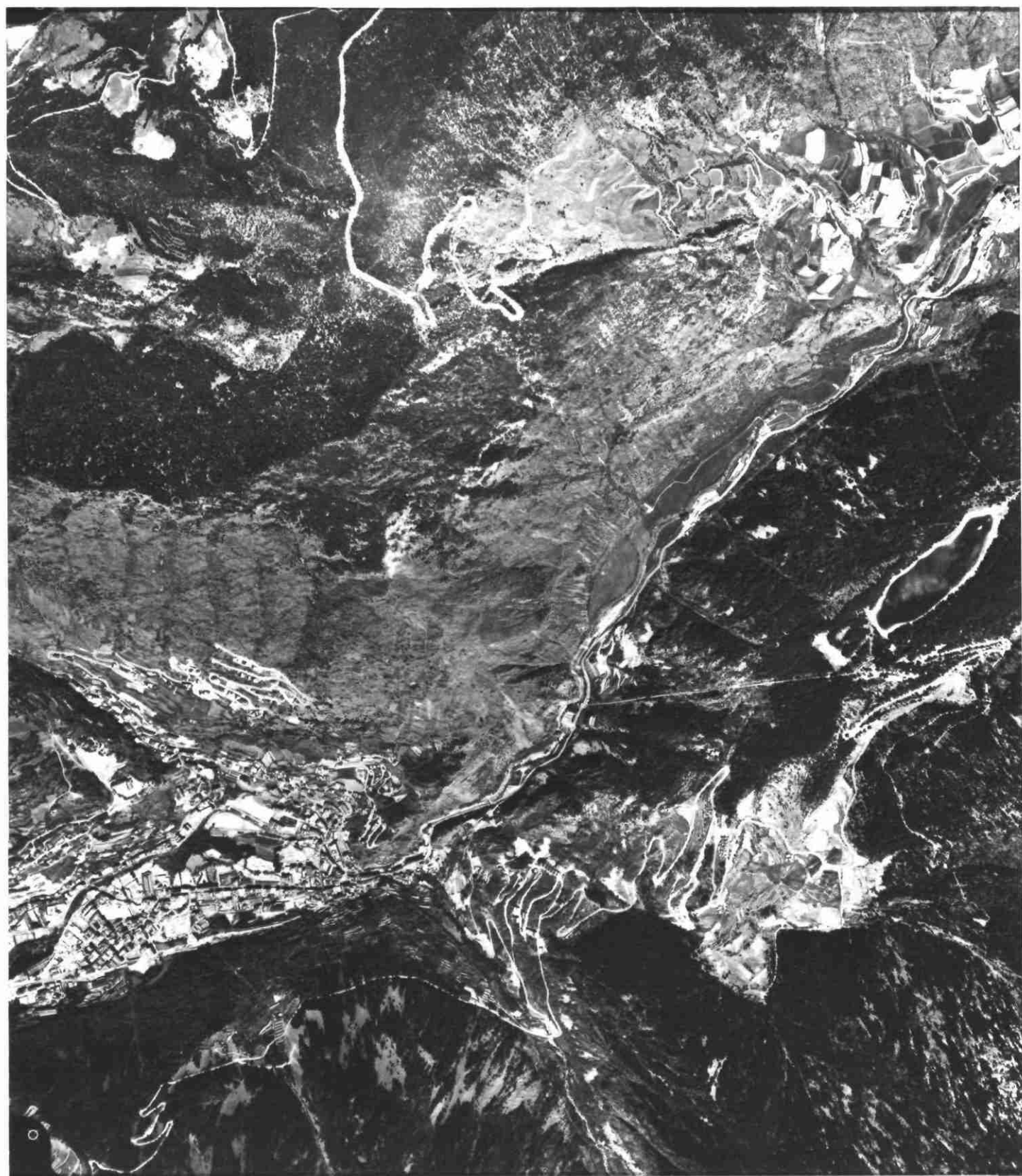
-  Pendage

-  Zone d'altérites en gouttières

-  Dépôts et remaniements d'âge quaternaire

-  Zone des sources thermales





1- PHOTO AERIENNE AERIAL (1/16.000^e , 1982)
DE LA ZONE ESCALDES-ENGORDANY-ENGOLASTERS

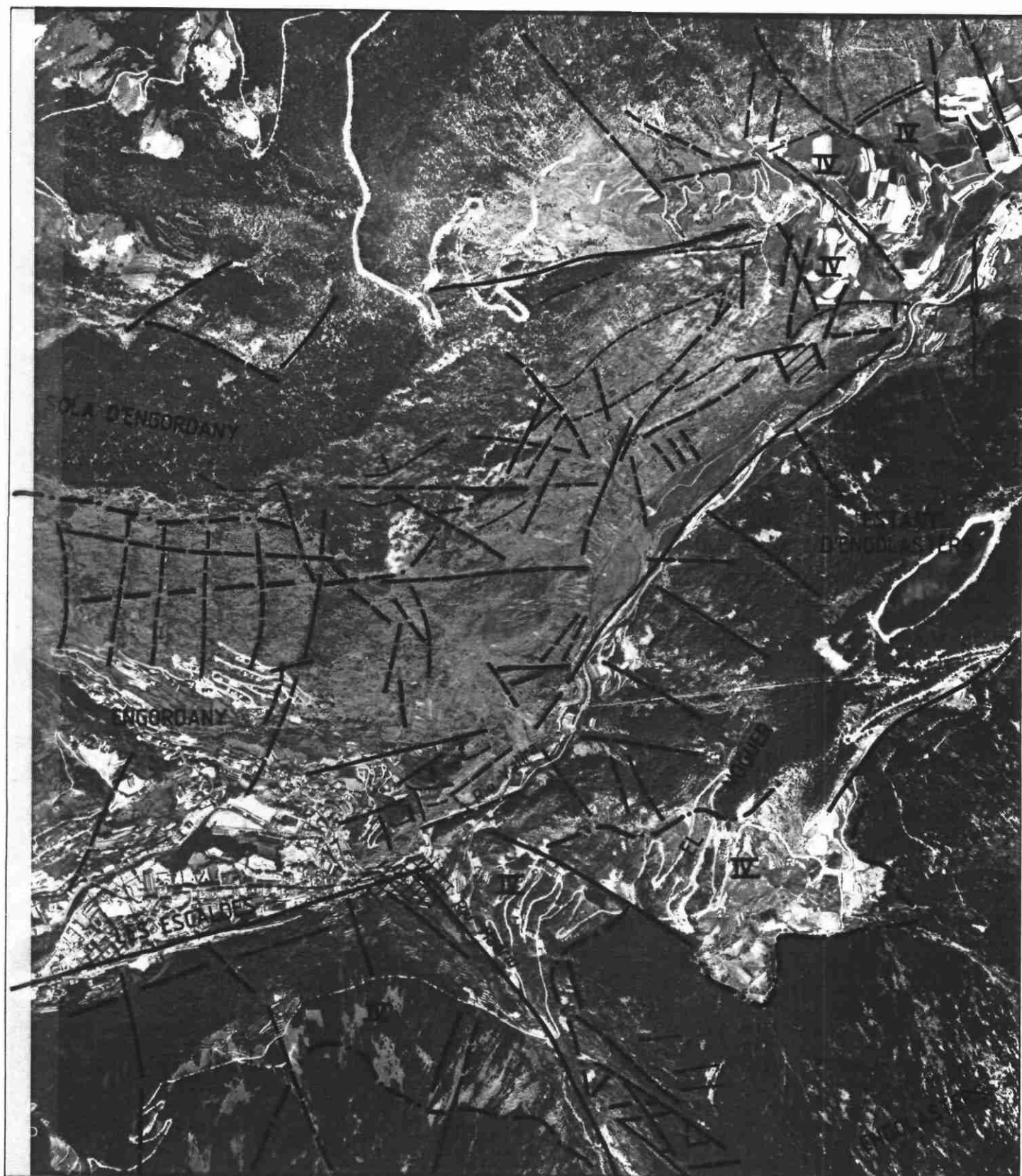


FIG.3

0 160 320 480 640m.

1- PHOTO AERIE AERIAL (1/16.000^e , 1982)
DE LA ZONE ESCALDES-ENGORDANY-ENGOLASTERS

3.3. - ETUDE DE TERRAIN

3.3.1. - Lithostratigraphie

. La série silurienne

Cette série mentionnée sur la carte géologique au 1/50 000e de Sole-Sabaris et Llopi-Llado, n'a pas été observée à l'affleurement dans la zone d'intérêt délimitée autour des sources thermales.

Cette formation sédimentaire métamorphisée, en contact anormal avec la série dévonienne, est constituée de schistes, micaschistes et ectinites (schistes cristallins) et affleure sur le versant nord du massif d'Engordany.

. La série dévonienne

Elle affleure en rive droite du Riu Valira (Roc dels Castells) et dans le lit du Riu Madriu. A la base de cette série, les roches consistent en une alternance de bancs calcaires massifs et de schistes noirs graphiteux parfois pyriteux.

La partie supérieure de la formation, rencontrée dans le Riu Madriu est constituée de micaschistes souvent mylonitisés. La puissance des bancs est métrique à plurimétrique. La puissance totale de la série dévonienne a été estimée à 250 m. Les composantes de la formation dévonienne ont fait l'objet d'un métamorphisme régional provoquant l'apparition de minéraux de néogénèse (présence d'amphiboles vertes = amiantes, en placage sur les calcaires ; muscovite dans les schistes).

La mise en place intrusive du batholite granitique d'Engolasters a provoqué également un thermo-métamorphisme de l'encaissant dévonien sous forme de cornéennes visibles dans la zone de contact granite/dévonien sur les rives et dans le lit du Riu Madriu.

Par ailleurs, des indices d'une paléo-hydrothermalisation existent sous la forme de filonnets et lentilles de calcite dans les calcaires et les schistes, d'une serpentinitisation parfois intense des schistes mylonitisés et de cristaux et filonnets de quartz dans les schistes indurés.

. Le batholite granitique d'Engolasters et son complexe filonien associé

Le massif granitique d'Engolasters occupe le quart SE du territoire d'Andorre. Ce batholite post-tectonique, d'âge hercynien, est intrusif dans les séries sédimentaires paléozoïques. Au niveau des Escaldes, il affleure dans les hautes gorges du Riu Madriu et sur tout le versant sud de la vallée de la Valira. Cette vallée le limite d'ailleurs très nettement de la couverture sédimentaire affleurante sur le versant nord.

Macroscopiquement, il s'agit d'un granite à gros grains, montrant localement des faciès de bordure aplitiques ou microdioritiques. De nombreux xénolithes de schistes, arrachés par le magma granitique à l'encaissant dévonien, sont présents sous forme de lentilles centimétriques à décimétriques dans le granite.

Postérieurement ou contemporanément à l'installation du batholite, de nombreux filons de quartz d'épaisseur décimétrique à plurimétrique se sont injectés à la faveur des joints de stratification des séries sédimentaires ou à la faveur de la fracturation.

Ces filons de quartz sont fréquents dans la zone d'étude mais sont essentiellement localisés en rive gauche du Riu Valira au contact du batholite granitique. Quelques filons de quartz ont également été observés à la base de la falaise du Roc dels Castells, en rive droite du Riu Valira.

. Les dépôts quaternaires

Il s'agit essentiellement des alluvions du Riu Valira et du Riu Madriu et du remplissage morainique glaciaire qui occupent les fonds de vallée (vallée de la Valira, Val d'Andorre). L'épaisseur de ces dépôts n'excède pas 30 m.

3.3.2. - Cartographie

a) Carte géologique au 1/5 000e

Elle a été établie à partir de levés de terrain dans les gorges du Riu Madriu, la vallée et les flancs nord et sud de la Valira. Les reports ont été faits directement sur la photo aérienne au 1/5 000e couvrant la zone étudiée (fig. 4).

Commentaire :

Une limite lithologique très nette est mise en évidence au niveau de la vallée du Riu Valira, séparant au Nord la formation dévonienne du batholite granitique au Sud. Le contact entre ces deux unités se fait par l'intermédiaire d'un accident régional orienté NO-SE déjà observé sur la carte structurale de la figure 3. Cet accident -que nous baptiserons "faille Valira"- a conditionné le tracé de la rivière du même nom. Il est vraisemblablement lié à la tectonique pyrénéenne éocène et a joué ou rejoué à la faveur du contraste lithologique existant au contact granite/dévonien. Cartographiquement, au niveau des sources thermales, la "faille Valira" possède un pendage SO dont la valeur n'a pu être appréciée sur le terrain en raison du recouvrement alluvionnaire qui masque cette structure.

La zone d'émergence des sources thermales est en fait constitué d'un compartiment effondré de la couverture sédimentaire dévonienne sur la lèvre sud de la "faille Valira", qui est une faille contraire normale (sens opposé du pendage N55 des strates sédimentaires et du pendage SO de la faille).

FIG. 4

CARTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE DES SOURCES THERMALES

 Dépôts quaternaires : alluvions et remplissage morainique

 Filons de quartz

 Batholithe granitique

 Serie sédimentaire dévonienne : alternance de calcaires et de schistes

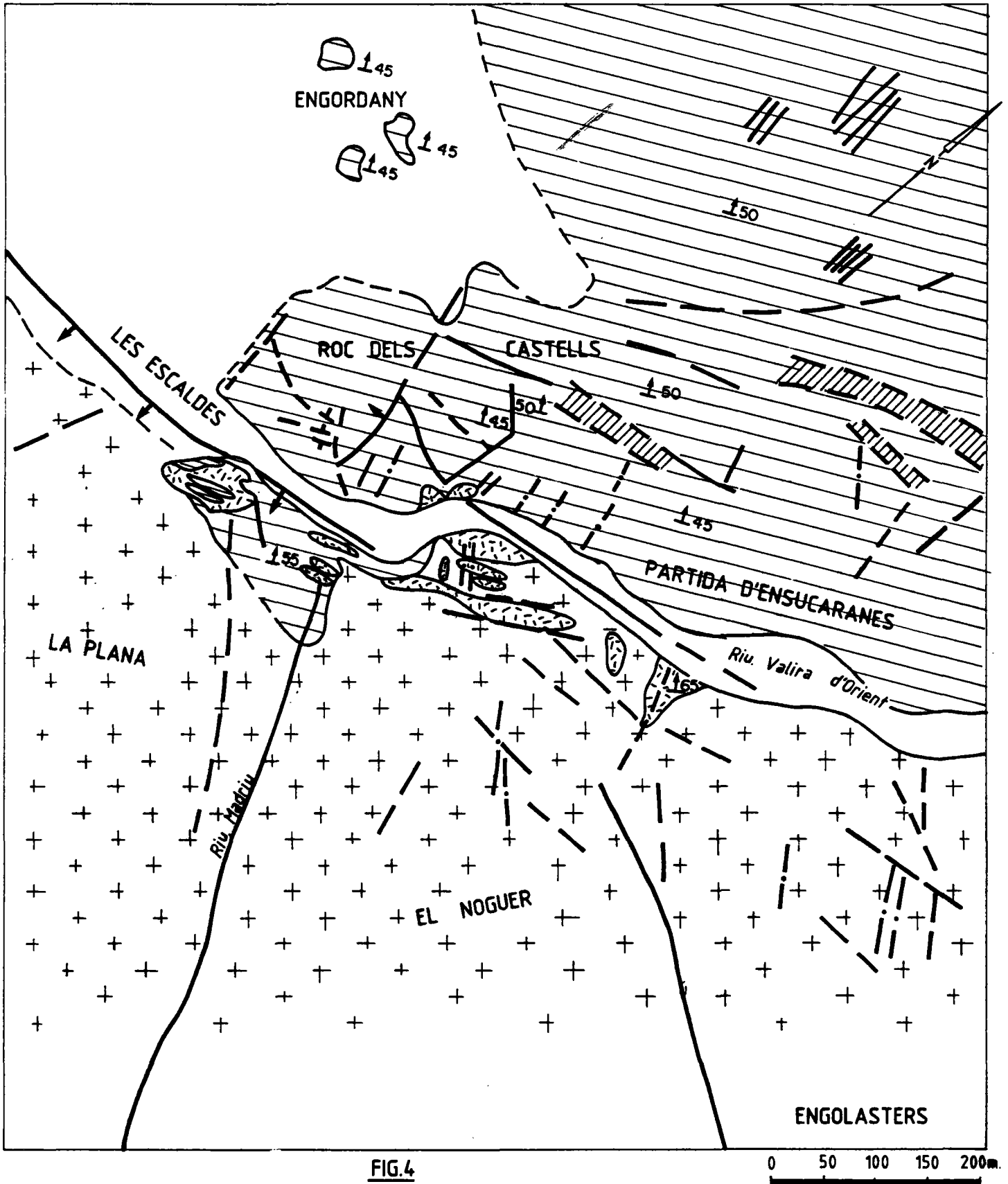
 Altérites en gouttières

 Faille majeure

 Faille supposée

 Diaclase

 ⁴⁵ Sens et valeur de pendage





2- PHOTO AERIENNE AERIAL (1/5.000^e, 1980)
DE LA ZONE ESCALDES-EL NOGUER

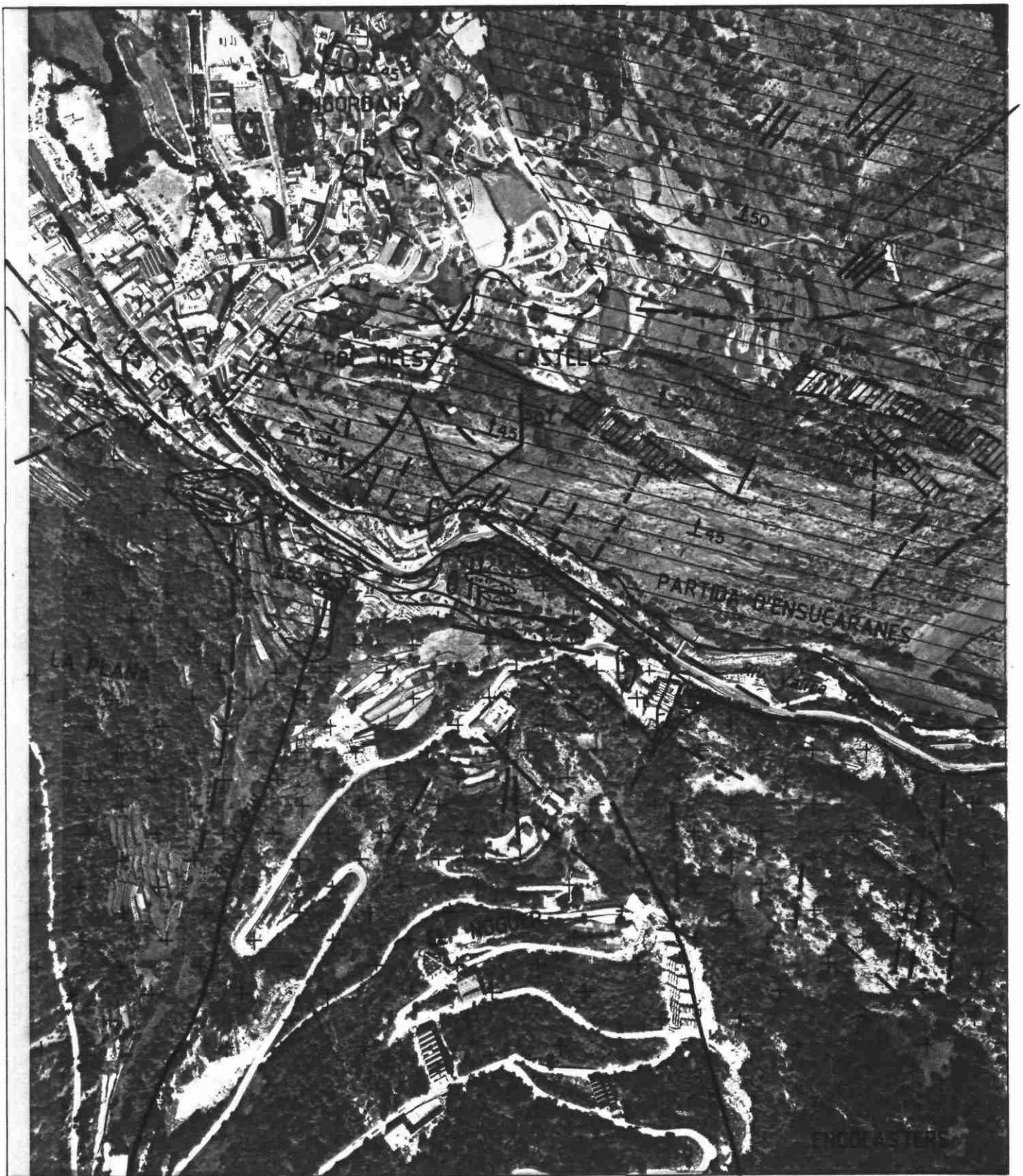


FIG.4

0 50 100 150 200m.

2- PHOTO AERIEENNE AERIAL (1/5.000^e, 1980)
DE LA ZONE ESCALDES-EL NOGUER

Une chose importante à noter est la direction similaire du tracé de la "faille Valira" et des strates calcaro-schisteuses. Cette coïncidence de direction a été exploitée par les filons intrusifs abondants dans la zone d'émergence et toujours sub-parallèles à la stratification.

Une seconde faille, appelée "faille Madriu" recoupe à la fois le granite et le Dévonien sédimentaire et marque le lit du Riu Madriu aussi bien dans la zone des sources qu'en amont. C'est à l'intersection des accidents "Valira" et "Madriu" que se situe la zone d'émergence.

La formation sédimentaire dévonienne formant l'escarpement nord-au-dessus des Escaldes est composée de strates à pendage N45-50 ; certains horizons schisteux sont fortement altérés, donnant localement des zones d'altération en gouttières, parallèles à la stratification. Cette formation est fréquemment recoupée par des fractures sub-parallèles d'orientation Madriu (NO-SE). Plusieurs panneaux sont basculés vers l'Ouest au niveau du Roc dels Castells.

Le batholithe granitique est recoupé par plusieurs accidents de grande extension NE à NO et par un système de diaclases qui suivent les mêmes directions.

Les produits de l'érosion glaciaire (remplissage morainique) et les alluvions du Riu Valira occupent le fond des vallées de la Valira et des Escaldes et rendent difficile l'appréciation des limites stratigraphiques granite/dévonien. A Engordany, quelques affleurements de schistes et calcaires dévoniens apparaissent localement au travers du recouvrement quaternaire.

b) Carte d'affleurements

En raison de l'urbanisation importante et du recouvrement pédologique de la zone des sources thermales, nous avons jugé bon d'établir ce document (fig. 5) qui a servi de support à la carte géologique interprétative à plus petite échelle (fig. 4).

La carte d'affleurements a été dessinée à partir du plan cadastral au 1/500e de la commune d'Escaldes-Engordany, réduit au 1/1 000e.

Les relations entre la couverture dévonienne calcaro-schisteuse et le complexe intrusif (batholithe granitique + filons de quartz) sont bien visibles en rive droite du Riu Madriu. De nombreux filons de quartz sont injectés aux joints de stratification des bancs sédimentaires (rives du Riu Madriu) et des digitations du batholithe granitique englobent localement des panneaux dévoniens (affleurant au Nord de la piscine Muntanya).

La position des émergences thermales par rapport aux différentes unités géologiques est remarquable : aucune source thermique n'émerge dans le granite, tous les griffons sont situés soit au contact de deux strates dévoniennes (cas de la plupart des sources du Riu Madriu), soit aux épontes des filons de quartz (sources n° 1, 15 et 26).

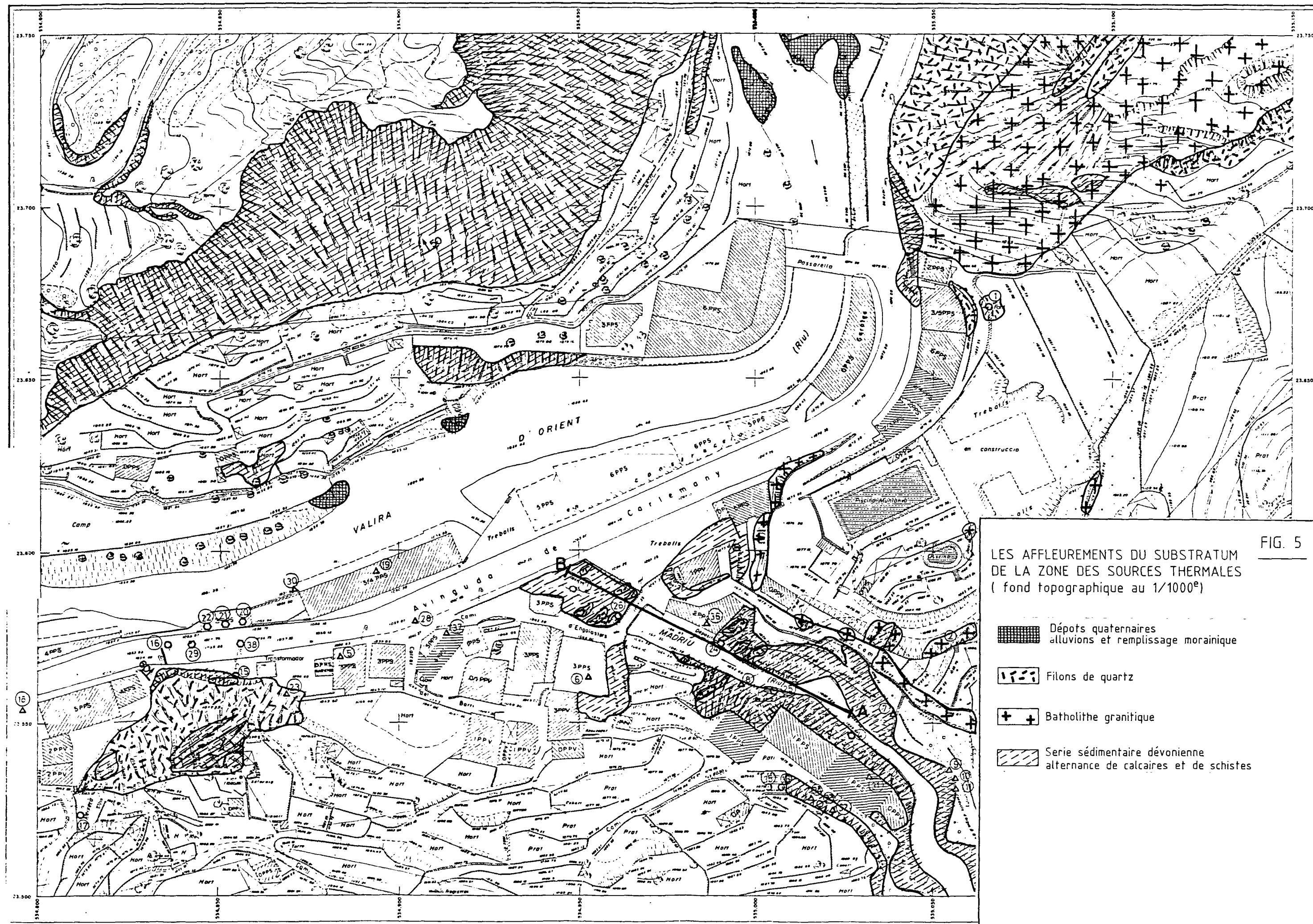


FIG. 5
LES AFFLEUREMENTS DU SUBSTRATUM
DE LA ZONE DES SOURCES THERMALES
(fond topographique au 1/1000^e)

En rive gauche du Riu Madriu, peu d'affleurements ont pu être observés en raison de l'occupation quasi-totale du sol par des habitations ou des jardins. Un filon de quartz plurimétrique injecté dans les schistes encaissants forme le relief surplombant l'avenue de Charlemagne au niveau du transformateur.

Sur le flanc nord de la Valira, la falaise surplombant les jardins et l'hôtel Paris-Londres est constituée uniquement d'un empilement de bancs calcaro-schisteux (pendage général N50) sur une hauteur d'une cinquantaine de mètres.

c) Coupe dans le Riu Madriu

Une coupe (fig. 6) a été levée banc par banc dans les basses gorges du Riu Madriu où affleurent les strates sédimentaires dévoniennes et où sont situées de nombreuses sources (fig. 5).

Cette coupe SE-NO (AB de la figure 5) qui suit le cours du Riu Madriu entre l'altitude 1070 et 1060 permet de recenser les différentes unités lithologiques susceptibles de jouer un rôle important en tant que drains des fluides hydrothermaux en subsurface.

La formation dévonnaise à l'affleurement dans le lit et sur les rives du Riu Madriu a été métamorphisée au contact de l'intrusion granitique. Elle est constituée de micaschistes massifs ou mylonitisés, en bancs métriques.

Le pendage de l'ensemble des strates varie entre N40 et N60.

De nombreux filons de quartz, d'épaisseur centimétrique à plurimétrique, s'injectent le plus souvent aux joints de stratification mais peuvent être discordants par rapport à la direction de stratification.

Dans la partie la plus basse de la coupe, entre l'ancien pont de pierre et l'avenue de Charlemagne, où la densité d'intrusions de quartz est la plus importante, de nombreux filonnets parcourent les micaschistes et s'anastomosent suivant le réseau de diaclases de l'encaissant. Plusieurs sources thermales (n° 6, 26 et 27) émergent au contact filons de quartz/micaschistes ou à l'interface de deux bancs de micaschistes mylonitisés.

Cette zone fortement broyée (micaschistes mylonitisés) et injectée est probablement située à l'aplomb d'un système de fracturation important. On peut concevoir qu'il s'agit là des effets perceptibles en surface du passage de la "faille Valira" ou/et de l'intersection "faille Valira"/"faille Madriu" provoquant un important diaclasage et broyage des formations.

En raison de ces observations, cette zone en aval du Riu Madriu apparaît favorable à la remontée d'eaux thermales profondes exploitant le système fracturé et les contrastes lithologiques micaschistes/filons de quartz. Elle se prête vraisemblablement mieux au recaptage des fluides en sub-surface que la zone plus amont qui est moins faillée.

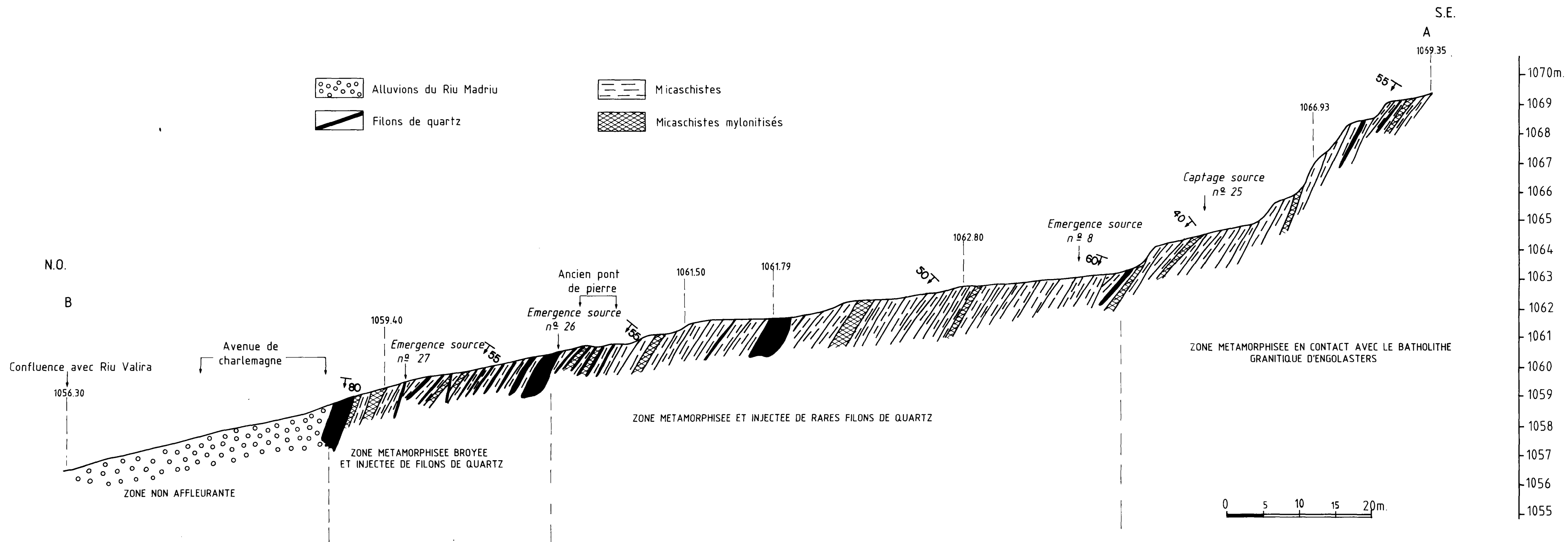


FIG. 6
COUPE GEOLOGIQUE DANS LE LIT DU RIU MADRIU

3.3.3. - Microtectonique

Des relevés microtectoniques (direction et pendage des plans de fracturation) ont été effectués à la boussole à partir des fractures et diaclases de la formation sédimentaire dévonienne et du batholithe granitique, dans la zone des sources thermales. En ce qui concerne la formation dévonienne, quatre-vingts mesures ont été faites dans le lit du Riu Madriu, dans la carrière située sur le versant nord du Roc dels Castells et au Nord d'Engordany.

Cent-vingts diaclases affectant le batholithe granitique ont été mesurées sur les affleurements qui bordent la route reliant les Escaldes à Engolasters.

Les différentes directions relevées sont reportées sur les deux rosaces de fracturation de la figure 7. Il s'agit là d'une représentation statistique donnant une image des pôles de microfracturations les plus importants.

. La formation sédimentaire dévonienne

A l'échelle des affleurements, la famille N140-160 s'individualise très clairement comme la composante essentielle de la fracturation des bancs de schistes et de calcaires.

On peut la rapprocher de la tectonique cassante NC-SE, observée sur les photos aériennes (fig. 3 et 4) dans les zones des sources, qui hache littéralement les strates sédimentaires sur le flanc nord de la Valira.

Sur le terrain, les différents volumes découpés par la fracturation N140-160 se présentent sous la forme de lames plus ou moins épaisses et régulières, souvent schistosées, dont le pendage varie entre 75° 0-S0 et la verticale.

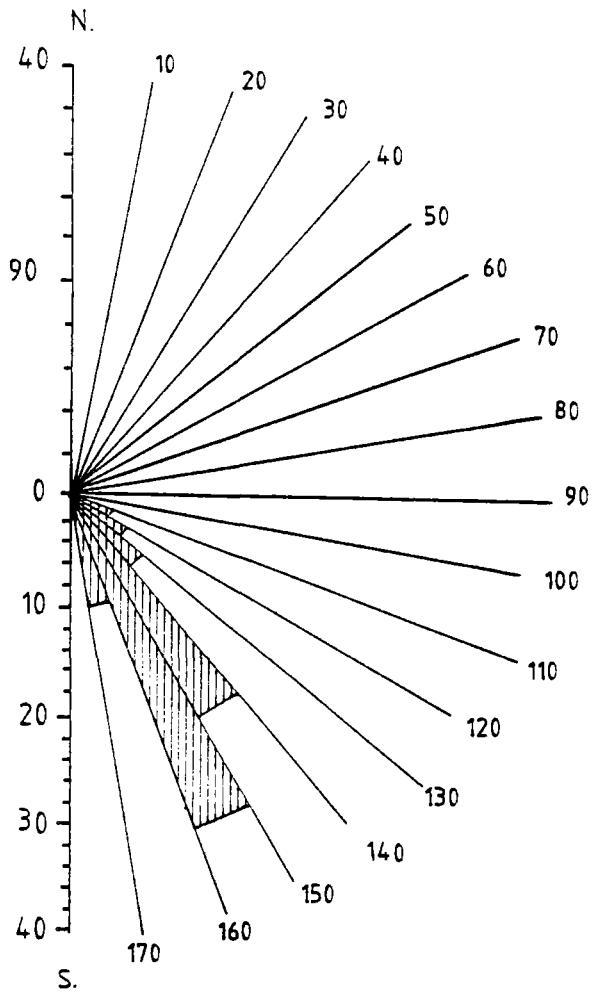
. Le batholithe granitique

Trois familles de diaclases sont prédominantes (fig. 7) :

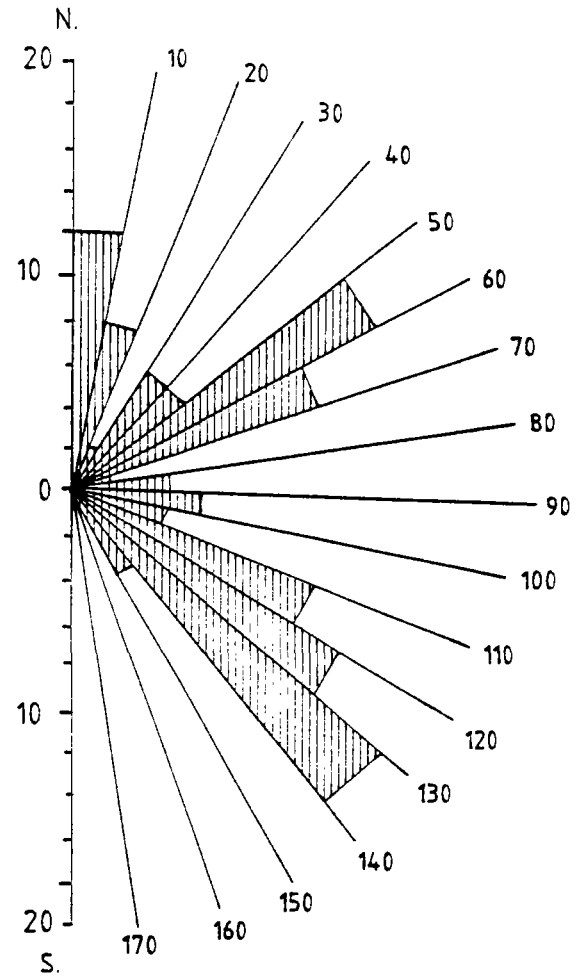
- N 5-10
- N 50-70
- N 110-140.

Ces directions de fracturation, qui ne s'apparentent pas à la famille N140-160, relevées dans la formation sédimentaire, semblent spécifiques du batholithe granitique et superficielles. Elles peuvent résulter de phénomènes de contraction thermique postérieurement à la mise en place du massif intrusif, qui débitent la masse granitique en blocs pseudo-cubiques souvent observables à l'affleurement.

De la même manière, certains filons de quartz sont découpés selon des plans de fracturation qui ne correspondent à aucune famille d'accidents régionaux.



a) Formation sédimentaire dévonienne



b) Batholithe granitique

FIG. 7

REPRESENTATION DES DIRECTIONS DE MICROFRACTURATION RELEVÉES
DANS LA ZONE DES SOURCES THERMALES

Notons toutefois que la direction N130-140, la mieux représentée sur les affleurements granitiques, est également la direction de la "faille Madriu" qui recoupe à la fois la formation dévonienne et le massif granitique.

En résumé, seules les microfractures et diaclases relevées dans la formation sédimentaire dévonienne peuvent être considérées comme marqueurs d'une tectonique cassante régionale N140-N160. L'étude microtectonique du batholithe granitique ne permet pas d'identifier avec certitude une (ou des) direction(s) de fracturation privilégiée(s) rattachable(s) à des accidents profonds.

3.4. - CONCLUSIONS GEOLOGIQUES

Les sources thermales des Escaldes émergent sur le flanc sud de la Valira, au sein d'une formation sédimentaire d'âge dévonien, dans la zone de contact du batholithe granitique d'Engolasters. Elles se positionnent exactement à l'intersection de deux accidents régionaux majeurs NE et NO marquant respectivement le tracé du Riu Valira et la bordure nord batholithe granitique/formation sédimentaire et le tracé du Riu Madriu.

Les bancs sédimentaires et les filons de quartz injectés à leurs épontes constituent des plans de circulation préférentiels des eaux thermales lors de leur remontée dans les dernières centaines de mètres sous la surface. Les émergences sont donc commandées par la stratification.

En première approche, on peut considérer que la zone des sources thermales des Escaldes peut correspondre à la mise en place d'un système hydrothermal d'origine profonde le long des plans de failles du système fracturé Riu Madriu-Riu Valira et à la faveur des discontinuités lithologiques existant dans la formation sédimentaire dévonienne.

Géologiquement, la zone qui apparait la plus favorable à l'implantation d'un forage de recaptage est située dans la partie la plus basse du Riu Madriu entre l'ancien Pont de Pierre et le Riu Valira.

3.5. - BIBLIOGRAPHIE ET DOCUMENTS UTILISES

- Estudio hidrogeologico de las aguas mineromedicinales y termominerales de los manantiales de Sanilles, San Vicente y Andorra
J.M. LOPEZ-RIBEYRAGUA (1959)
- Etude des sources chaudes d'Escaldes-Engordany
Rapport COYNE et BELIER (juillet 1981)
- Applications géothermiques de l'étude géochimique des eaux thermales pyrénéennes orientales
Rapport INAG - J. BOULEGUE et al (1981)

- Origen i situacio de la geotermia a Escaldes
Rapport NOVA ENERGIA - ANDORRE (1983)
- La géothermie sur la commune des Escaldes - Projet d'utilisation rationnelle des sources thermominérales
Rapport BRGM 83 ELE 13 EXP (1983)
- Carte géologique d'Andorre 1/50 000e
L. SOLE-SABARIS et N. LLOPIS-LLADO
- Carte géologique d'Andorre 1/25 000e - feuille VI
N. LLOPIS-LLADO (1967)
- Carte topographique au 1/500e de la commune des Escaldes
- Carte topographique au 1/10 000e du Val d'Andorre (1976)
- Photos aériennes (AERIAL) au 1/16 000e (1982) et 1/5 000e (1980) de la zone d'étude.

4 - GEOCHIMIE DES SOURCES

4.1. - CARACTERISTIQUES GENERALES

Les sources thermales des Escaldes se révèlent être très semblables aux autres sources thermales des Pyrénées Orientales, telles que Ax, Amélie ou les Aigues par exemple (Boulègue et al., 1977 ; Michard et Fouillac, 1980 ; Ouzounian et al., 1980). Elles ont en commun les caractéristiques suivantes :

- . La minéralisation totale très faible
- . le pH alcalin, autour de 9, plus élevé pour les basses températures que les hautes
- . un caractère sulfuré sodique
- . le Na représente plus de 90 % de la somme des cations, alors qu'aucun anion ne domine vraiment
- . le Mg se trouve en quantité extrêmement faible
- . en profondeur, les eaux circulent dans un environnement géologique composé de roches essentiellement granitiques
- . les sources émergeant en surface sont rarement l'objet d'importants mélanges avec des eaux superficielles, comme c'est le cas dans le Massif Central (Fouillac, 1983) ou les Alpes (Vuataz, 1983).

Les sources des Escaldes ne font pas exception à ces caractéristiques observées sur quelques 20 aires d'émergence dans les Pyrénées Orientales. L'ensemble des résultats est présenté dans les tableaux 1 à 4.

4.2. - EVALUATION DU DEGRE D'INFLUENCE DES EAUX SUPERFICIELLES SUR LES SOURCES THERMALES

La source 22, malgré un débit mesurable relativement faible, a la température la plus élevée (67°C). Elle est aussi la plus représentative du fluide profond, car sa teneur en SiO₂ (80.4 mg/l) et en Mg (< 0.01 mg/l) sont respectivement la plus élevée et la plus faible, et son potentiel d'oxydo-réduction est le plus négatif.

Les eaux superficielles ont une concentration en Mg 70 fois supérieure (0.7 mg/l) à celle de la source 22. En admettant l'hypothèse d'un mélange entre l'eau thermique remontant vers la surface et une eau froide locale, même si la concentration en Mg du fluide profond était encore plus basse, la proportion d'eau de dilution ne pourrait pas dépasser 1-2 % (fig. 8). Quant aux autres sources, le mélange n'atteindrait guère que quelques pourcents de plus.

TABLEAU 1

MESURES DE TERRAIN EFFECTUEES SUR LES EAUX THERMALES DES ESCALDES (ANDORRE)

ECHANTILLONS	N°	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	O ₂ (mg/l)	Réserve alc. (10 ⁻³ mole/l)	Conduct. (μ S/cm)	Débit (l/min)
<u>Novembre 1983</u>								
Font. Magnesia (1)	AND-1	18.0						
Source 6	AND-6	62.9						
Source 7	AND-7	52.5						
<u>Janvier 1984</u>								
Font. Magnesia (1)	AN-01	16.5	9.95	- 72	0.36	1.19	163	4
Source 6	AN-06	66.3	9.10	- 5	1.44	1.23	203	90
Source 10	AN-10	45.6	9.34	- 32	3.10	1.17	181	6
Source Safareig (13)	AN-13	42.9	9.25	+ 249	5.07	1.11	184	4.3
Source 19	AN-19	58.2	9.02	- 39	2.79	1.16	199	24
Source 22	AN-22	67.3	9.05	- 150	1.04	1.23	206	2.5
Source 41	AN-41	3.2	7.66	+ 426	10.8	0.40	54	12
Riu Madriu	AN-40	1.0	7.75	+ 368	11.5	0.35	44	≥ 6000

TABLEAU 2

ELEMENTS MAJEURS ET MINEURS (mg/l) DANS LES EAUX THERMALES DES ESCALDES (ANDORRE)

ECHANTILLONS	Date	Li	Na	K	Mg	Ca	NH ₄	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	F	NO ₃	SiO ₂	B	TSD [*]
Source 1	11.83	0.08	36.3	1.4	< 0.05	3.5	-	6.4	17	26	20	3.5	1.1	67	< 0.1	122
Source 1	01.84	-	34.0	1.4	0.08	3.5	0.2	6.6	14	27	18	3.2	2.0	63.8	< 0.1	174
Source 6	11.83	0.01	38.7	1.7	< 0.05	2.4	-	7.8	17	32	20	3.8	1.1	79	< 0.1	204
Source 6	01.84	0.114	37.1	1.6	0.02	2.3	0.2	7.8	14	33	15	3.5	2.3	77.6	< 0.1	195
Source 7	11.83	0.09	37.8	1.6	< 0.05	2.1	-	8.5	18	32	18	3.7	1.1	77	< 0.1	200
Source 10	01.84	-	36.3	1.5	0.06	2.5	0.2	7.2	12	21	33	3.4	1.6	73.9	< 0.1	193
Source 13	01.84	0.112	36.3	1.5	0.10	3.2	< 0.1	7.3	14	24	27	3.3	3.1	73.9	< 0.1	194
Source 19	01.84	0.108	37.3	1.6	0.04	2.8	0.2	7.4	16	30	15	3.4	2.2	76.6	< 0.1	193
Source 22	01.84	0.119	37.1	1.5	< 0.01	2.3	0.2	10.5	14	33	12	3.5	2.2	80.4	< 0.1	197
Source 41	01.84	-	2.4	0.36	0.80	8.8	-	1.4	3	0	31	0.2	2.4	9.60	< 0.1	60
Riu Madriu	01.84	-	1.4	0.25	0.70	7.5	-	< 1	2	0	24	< 0.1	1.5	8.0	< 0.1	47

* TSD (Total des Solides Dissous) : somme des espèces chimiques présentées dans ce tableau.

TABLEAU 3

ELEMENTS TRACES ($\mu\text{g/l}$) ET ISOTOPES STABLES DANS LES EAUX THERMALES DES ESCALDES (ANDORRE)

<i>ECHANTILLONS</i>	<i>Date</i>	<i>Al</i>	<i>As</i>	<i>Cs</i>	<i>Rb</i>	<i>Sr</i>	<i>Fe</i>	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta \text{ D}$ (‰)
<i>Source 1</i>	<i>11.83</i>	-	-	-	-	< 200	< 1	-	-
<i>Source 1</i>	<i>01.84</i>	-	-	-	-	-	-	- 11.5	- 78.7
<i>Source 6</i>	<i>11.83</i>	-	-	-	-	< 200	< 1	-	-
<i>Source 6</i>	<i>01.84</i>	94.5	162	20.8	17.4	19.6	-	-	-
<i>Source 7</i>	<i>11.83</i>	-	-	-	-	< 200	< 1	-	-
<i>Source 10</i>	<i>01.84</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Source 13</i>	<i>01.84</i>	80.4	151	18.8	16.3	19.7	-	- 11.4	- 79.5
<i>Source 19</i>	<i>01.84</i>	76.4	134	20.6	19.2	20.8	-	- 11.3	- 80.0
<i>Source 22</i>	<i>01.84</i>	96.0	168	21.1	19.0	15.8	-	- 11.4	- 80.1
<i>Source 41</i>	<i>01.84</i>	-	-	-	-	-	-	- 10.7	- 72.3
<i>Riu Madriu</i>	<i>01.84</i>	-	-	-	-	-	-	- 10.8	- 71.9

TABLEAU 4

COMPOSITION CHIMIQUE EN GAZ DISSOUS (mole/l) DANS L'EAU THERMALE DES ESCALDES (ANDORRE)

GAZ	SOURCE 1	SOURCE 6	SOURCE 22
CO ₂	< 9,58 10 ⁻⁷	< 9,94 10 ⁻⁷	< 9,22 10 ⁻⁷
Ar	2,03 10 ⁻⁵	2,25 10 ⁻⁵	1,37 10 ⁻⁵
O ₂	< 3,48 10 ⁻⁷	2,35 10 ⁻⁴	< 3,17 10 ⁻⁷
N ₂	1,04 10 ⁻³	1,52 10 ⁻³	5,05 10 ⁻⁴
He	< 3,55 10 ⁻⁷	< 3,89 10 ⁻⁷	< 3,22 10 ⁻⁷
H ₂	7,25 10 ⁻⁶	< 2,39 10 ⁻⁷	< 1,99 10 ⁻⁷
CH ₄	1,71 10 ⁻⁶	9,67 10 ⁻⁷	7,31 10 ⁻⁷
C ₂ H ₆	< 3,63 10 ⁻⁸	< 3,98 10 ⁻⁸	< 3,29 10 ⁻⁸
C ₃ H ₈	< 2,27 10 ⁻⁸	< 2,49 10 ⁻⁸	< 2,06 10 ⁻⁸
C ₄ H ₁₀	< 1,71 10 ⁻⁸	< 1,88 10 ⁻⁸	< 1,55 10 ⁻⁸
C ₅ H ₁₂	< 1,41 10 ⁻⁸	< 1,55 10 ⁻⁸	< 1,28 10 ⁻⁸
C ₆ H ₁₄	< 1,36 10 ⁻⁸	< 1,49 10 ⁻⁸	< 1,23 10 ⁻⁸

Toutefois, un mélange si faible ne devrait pas modifier de manière importante les rapports des ions entre eux. Si l'on prend le rapport Na/Mg (le sodium est considéré ici comme un paramètre conservatif, à défaut du chlorure qui ne peut être utilisé en raison de la faible teneur, on s'aperçoit que le rapport Na/Mg varie d'un facteur 10 selon les échantillons (> 3700 pour la source la plus chaude et 370 pour la source apparemment la plus diluée). Le magnésium subit donc d'autres phénomènes que celui d'un simple mélange à deux composantes, et les minéraux magnésiens voient leur solubilité se modifier rapidement avec la chute de température.

Le caractère réduit des eaux thermales (potentiel d'oxydo-réduction négatif) montre aussi que les sources les plus chaudes n'ont pas été fortement modifiées lors de leur remontée à la surface par des eaux superficielles, qui sont toujours oxydées (potentiel d'oxydo-réduction positif), ou par un contact atmosphérique dans la zone non saturée.

A part la source 22, la plus chaude et la plus représentative du fluide en profondeur, les autres sources ne montrent pas des caractéristiques très différentes, malgré les températures d'émergence variant de 17 à 66°C. Il s'agit donc essentiellement d'un refroidissement par conduction et non pas par dilution.

Michard (1977) et plus tard Michard et Fouillac (1980) ont démontré la raison de la variation du pH avec la température, dans un système "fermé", sans mélange d'eaux ni interaction eau-roche supplémentaire. La variation du pH à composition globale constante résulte de la mise à l'équilibre des différents couples acido-basiques contenus dans l'eau. Pour une zone d'émergence donnée, mais aussi en comparant plusieurs zones thermales, on constate une augmentation du pH lorsque la température diminue (fig. 9).

4.3. - EVALUATION DU DEBIT TOTAL DES SOURCES THERMALES

Si l'on prend les données de débit et de température du rapport de Nova Energia (1983), on constate que la somme des débits atteint environ 400 l/min (24 m³/h), pour 18 sources mesurées (tableau 5). Il se pourrait que de faibles débits ou de mauvais captages expliquent que les débits des 18 autres sources n'aient pas été mesurés. Néanmoins, la température moyenne de ces dernières (48°C) est la même que la température moyenne des sources dont le débit a été effectivement mesuré. Sachant que les sources ne sont pas refroidies par mélange mais par conduction lors de la remontée vers la surface, il paraît évident que deux sources à température égale auront un débit à peu près semblable. En conclusion, il est possible d'estimer le débit total des 36 sources à 800 l/min (48 m³/h) environ, sans oublier les éventuels rejets d'eau thermique dans le lit des torrents Riu Madriu et Riu Valira. Ce dernier phénomène est fréquemment rencontré lorsque les niveaux d'émergence d'un système thermal correspondent au niveau de base des eaux de surface (Vuataz, 1982). Dans le cas des Escaldes, l'existence et l'importance de ces rejets non captés ne peuvent pas être estimées.

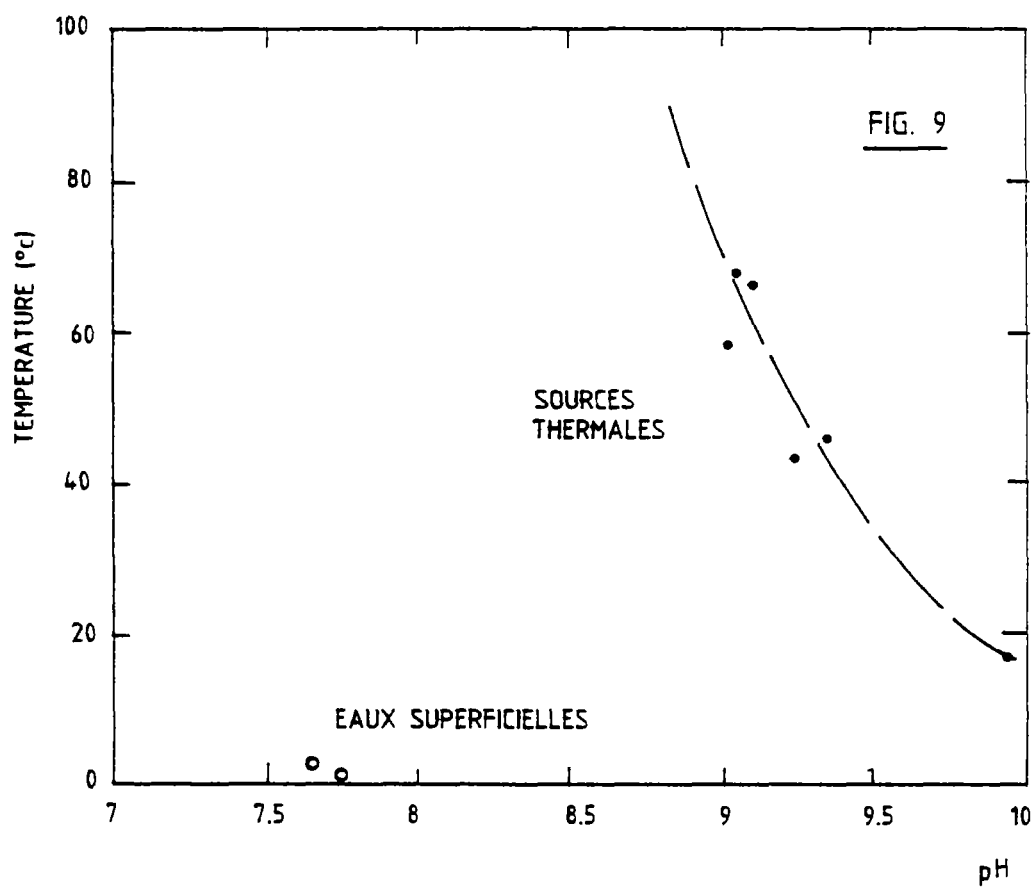
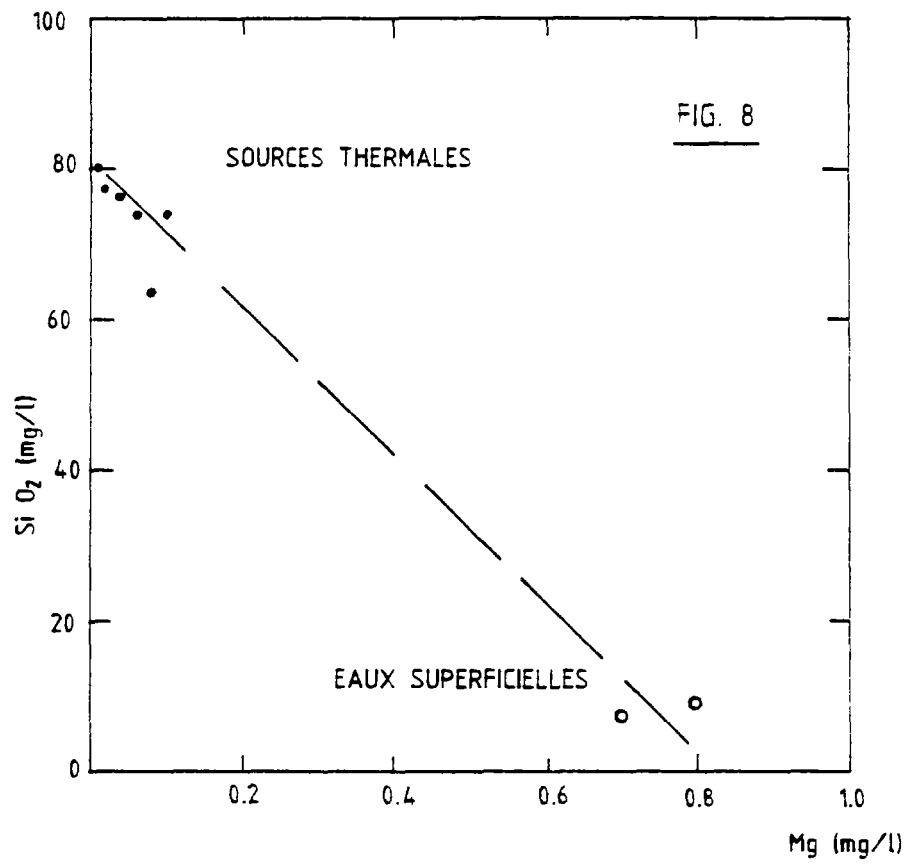


TABLEAU 5

TEMPERATURE ET DEBIT DES SOURCES THERMALES DES ESCALDES (ANDORRE)

DONNEES DU RAPPORT NOVA-ENERGIA (1983)

N° source	Temp. (°C)	Débit (l/min)	N° source	Temp. (°C)	Débit (l/min)
1	17.1	5.6	20	64	-
2	38.7	-	21	31.5	-
3	43.0	10.1	22	70	41.0
4	39	-	23	43	-
5	43.5	40.3	24	51	-
6	64	97.2	25	62	91.0
7	55	13.1	26	60	-
8	59	-	27	-	-
9	50.5	-	28	-	-
10	57	18.1	29	-	26.4
11	50-52	-	30	48-59	-
13	46-49	7.5	31	42	2.9
15	27-28	0.31	32	48	-
16	54	13.5	33	52-54	2.1
17	33	-	34	40	0.3
18	37.5	6.4	35	50-52	6.4
19	56	-	36	~ 45	~ 16.7
			37	-	-
			38	-	-

Débit total additionné pour 18 sources : ~ 400 l/min (= 24 m³/h)

4.4. - EVALUATION DU REFROIDISSEMENT PAR CONDUCTION

En mettant en relation le débit des sources avec leur température, on note la présence d'une corrélation générale positive entre les deux paramètres, avec néanmoins des échantillons qui font exception. Dans le détail, on s'aperçoit qu'il y a deux types de relation linéaire débit/température avec des pentes différentes (fig. 10). Un premier groupe (sources 15, 5, 25 et 6), caractérisé par une faible pente sur le graphe, s'inscrit géographiquement sur une ligne droite d'orientation Ouest-Est. Un deuxième groupe (sources 34, 31, 13, 16, 10 et 22) correspond aussi à un alignement sur la carte, d'orientation NNO-SSE, mais subit un refroidissement moindre.

Ces deux types de refroidissement par conduction doivent probablement correspondre à des trajets souterrains différents empruntés par les eaux remontant vers la surface, l'un plus long et refroidissant davantage l'eau thermique malgré des débits plus élevés. Truesdell et al (1977) ont calculé les pertes par conduction des sources en faisant varier le débit et la profondeur. Par exemple, la température chute de moitié si les réservoirs sont situés à 1.5, 1 et 0.5 km de profondeur et les débits ont des valeurs respectivement de 40, 26 et 13 l/min. Une source dont le débit à l'émergence serait de 300 l/min aurait un refroidissement par conduction négligeable. Si un grand nombre de sources émergent sur une très petite surface, il faut tenir compte du débit total pour calculer le refroidissement par conduction.

Dans le cas des sources thermales des Escaldes, il est difficile d'estimer le refroidissement par conduction, en raison des deux relations débit/température mises en évidence. Pour baisser la température de moitié, il faut dans un cas diminuer le débit d'un facteur 15 et dans l'autre d'un facteur 80. D'autre part, on ignore le mode de mesure et la précision des données du rapport de Nova Energia (1983). Néanmoins, une confirmation de la validité de ces données semble être apportée par les mesures de janvier 1984. En effet ces dernières, à une exception près, correspondent exactement aux relations linéaires débit/température décrites ci-dessus. Cela signifie qu'en cas de variation de débit par modification de la pression dans le système de circulation, la température varie elle aussi proportionnellement.

4.5. - ESTIMATION DE LA TEMPERATURE EN PROFONDEUR

Les résultats obtenus par la géothermométrie permettent de penser que la température de l'eau thermique avant son refroidissement par conduction aurait atteint $80 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Il s'agit d'une première approximation et d'une valeur probablement minimale, car plusieurs éléments manquent encore pour estimer avec certitude la température maximum du "réservoir" (tableau 6).

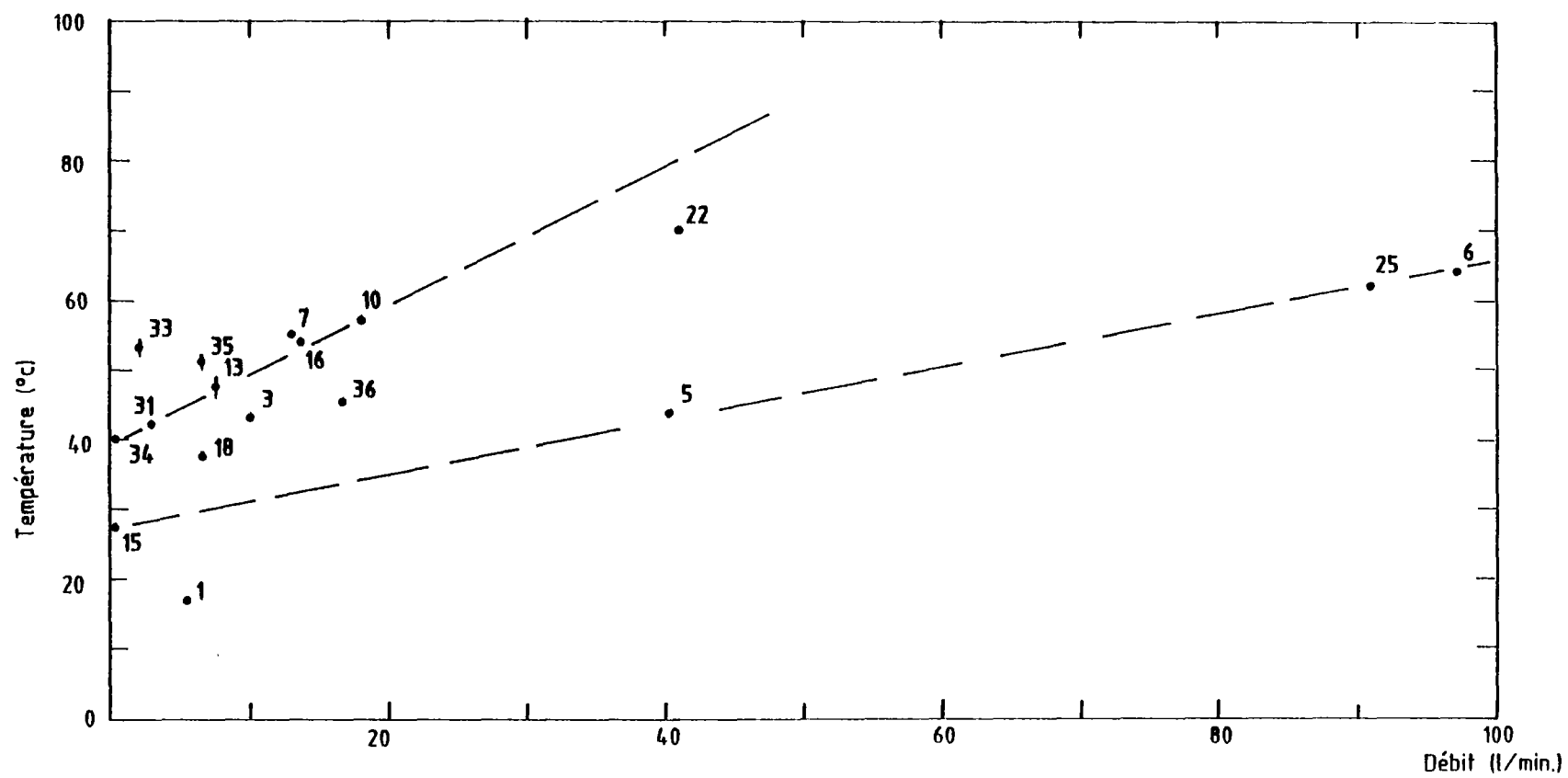


FIG. 10

TABLEAU 6

TEMPERATURES EN PROFONDEUR CALCULEES PAR LES GEOTHERMOMETRES (°C)

GEOTHERMOMETRE	SOURCE 22	SOURCE 6	REFERENCE
$T \text{ SiO}_2$ calcédoine	81	79	(1)
$T \text{ SiO}_2$ quartz (refroid. par conduct.)	111	109	(2)
$T \text{ Na/Li}$	152	148	(3)
$T \text{ Na/K}$	118	123	(4)
$T \text{ Na-K-Ca}$ ($B = 4/3$)	73	75	(5)
($B = 1/3$)	130	133	(5)
$T \text{ }^{18}\text{O}$ ($\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$)	82	-	(6)

- Références : (1) Fournier (1973)
(2) Fournier and Rowe (1966)
(3) Fouillac and Michard (1981)
(4) Arnórsson (1983)
(5) Fournier and Truesdell (1973)
(6) Mc Kenzie and Truesdell (1977)

Les géothermomètres de la silice ont été calculés avec une concentration de SiO_2 de 25 % inférieure à la concentration totale. En effet, lorsque les eaux thermales ont un pH élevé (~ 9), la silice est partiellement ionisée (H_3SiO_4^-). Afin d'obtenir une valeur correcte de la température profonde, il convient de soustraire la concentration en H_3SiO_4^- de la teneur en silice totale analysée (Boulègue et al, 1977). En première approximation, une fraction de 25 % a été soustraite, ce qui correspond aux calculs effectués sur des eaux thermales aux caractéristiques très semblables dans les Pyrénées Orientales.

Le géothermomètre isotopique de l'oxygène -18 dans les sulfates et dans l'eau, utilisé jusqu'à maintenant principalement dans les champs géothermiques haute température, a néanmoins donné des résultats très intéressants dans des réservoirs d'eau chaude en France tels que le Dogger du Bassin Parisien et le Massif Central (A.M. Fouillac, 1984, données non publiées). En ce qui concerne la source 22 des Escaldes, en utilisant les résultats analytiques de ^{18}O (SO_4) = + 7.8 ‰ et de ^{18}O (H_2O) = - 11.4 ‰, on obtient une température profonde de 82°C.

Certains géothermomètres donnent une température supérieure à 100°C, mais une étude plus détaillée serait nécessaire pour affirmer leur fiabilité. Même si ces températures existent, elles ne seront atteintes qu'à une profondeur de 1 à 2 km au minimum, c'est-à-dire hors de portée des travaux envisagés pour recapter par forage l'ensemble des sources des Escaldes.

Le géothermomètre $T^\circ \text{Na-K-Ca}$ ne peut probablement pas être pris en considération, car la teneur en calcium semble être à première vue essentiellement contrôlée par la solubilité de la calcite. En effet, l'absence presque totale de CO_2 dissous dans l'eau laisse à penser que ce gaz a été entièrement utilisé pour la formation de CO_3^{2-} et HCO_3^- et que la calcite contrôle la solubilité du calcium. Le calcul des équilibres chimiques serait nécessaire pour en apporter la preuve.

Certains paramètres chimiques appelés géothermomètres qualitatifs sont généralement de bons indicateurs d'une haute température en profondeur si leur concentration est élevée (Truesdell, 1976). Pour les sources des Escaldes, on constate que les eaux sont riches en arsenic (maximum de 168 $\mu\text{g/l}$ pour la source 22). Cet élément a déjà été remarqué dans les eaux du Massif Central, comme étant directement associé aux fluides profonds et de température élevée (Criaud, 1983).

4.6. - GAZ DISSOUS DANS L'EAU THERMALE

Les gaz dissous des trois sources thermales qui ont été analysés mettent en évidence les phénomènes suivants (tableau 4). L'absence de CO_2 détectable a été expliquée ci-dessus. La quasi-absence de O_2 dans deux des trois sources montre qu'il n'y a pratiquement pas de mélange avec des eaux superficielles de la zone d'émergence. La présence de O_2 dans la source 6 est certainement due au mode de prélèvement et au type de recaptage qui permet un contact de l'eau thermique avec l'atmosphère.

Les concentrations en Ar, N₂ et CH₄ sont assez proches de celles que l'on peut rencontrer dans des eaux thermales de même température (60-70°C) provenant du même type d'environnement géologique (granitique), par exemple les eaux thermales d'Amélie-les-Bains dans les Pyrénées Orientales et de Plombières dans les Vosges (Baubron et al, 1979).

4.7. - ISOTOPES STABLES DE L'EAU

Les résultats des analyses d'oxygène-18 et de deutérium dans l'eau de quatre sources thermales et deux eaux superficielles apportent des informations intéressantes sur les questions de mélange et d'origine. On constate tout d'abord que la composition isotopique est très semblable d'une source thermique à l'autre, les variations étant du même ordre de grandeur que l'incertitude sur l'analyse (tableau 3). Par contre, les eaux superficielles (le Riu Madriu et une source froide) ont une composition nettement différenciée. Cela confirme une fois de plus l'absence d'un mélange entre l'eau thermique profonde et les eaux froides superficielles. La relation oxygène-18 / deutérium montre que les eaux se regroupent bien autour de la droite des eaux météoriques calculée pour les Pyrénées Orientales (C. Fouillac, 1984, données non publiées) (fig. 11).

Le deutérium et l'oxygène-18 de l'eau permettent également de retrouver l'altitude moyenne du bassin d'alimentation qui recharge en profondeur un système de circulation donné. A partir des données nombreuses sur les eaux superficielles des Pyrénées Orientales, C. Fouillac (1984, données non publiées) a calculé une relation entre δD (ou $\delta^{18}O$) et l'altitude de recharge. En appliquant cette relation aux eaux des Escaldes, on s'aperçoit que les sources thermales ont une altitude moyenne de recharge de 2 300 m environ, c'est-à-dire dans la zone des sommets autour de la vallée d'Andorre. S'agissant d'une valeur pondérée, il est très possible que le bassin d'alimentation s'étage entre 2 000 et 2 600 m par exemple. Les deux eaux superficielles, quant à elles, montrent une origine apparente de plus basse altitude (environ 1 850 m). Cependant, pour ce type d'eau il faudrait tenir compte de la saison et établir une moyenne annuelle. En effet, durant l'hiver, les eaux de haute altitude sont bloquées sous forme de neige alors qu'à la fin du printemps et en été, les fontes de neige et les pluies proviennent en majeure partie des altitudes élevées.

4.8. - CONCLUSIONS GEOCHIMIQUES

Au cas où un forage ou plusieurs implantés aux Escaldes permettraient de capter la totalité de l'eau thermique qui remonte à la surface, un débit de 50 m³/h environ semble être une estimation raisonnable.

Le refroidissement de l'eau des sources thermales est entièrement dû au phénomène de conduction. La température en surface varie de 17 à 67°C, alors que la température en profondeur serait en première estimation de 80 ± 5°C.

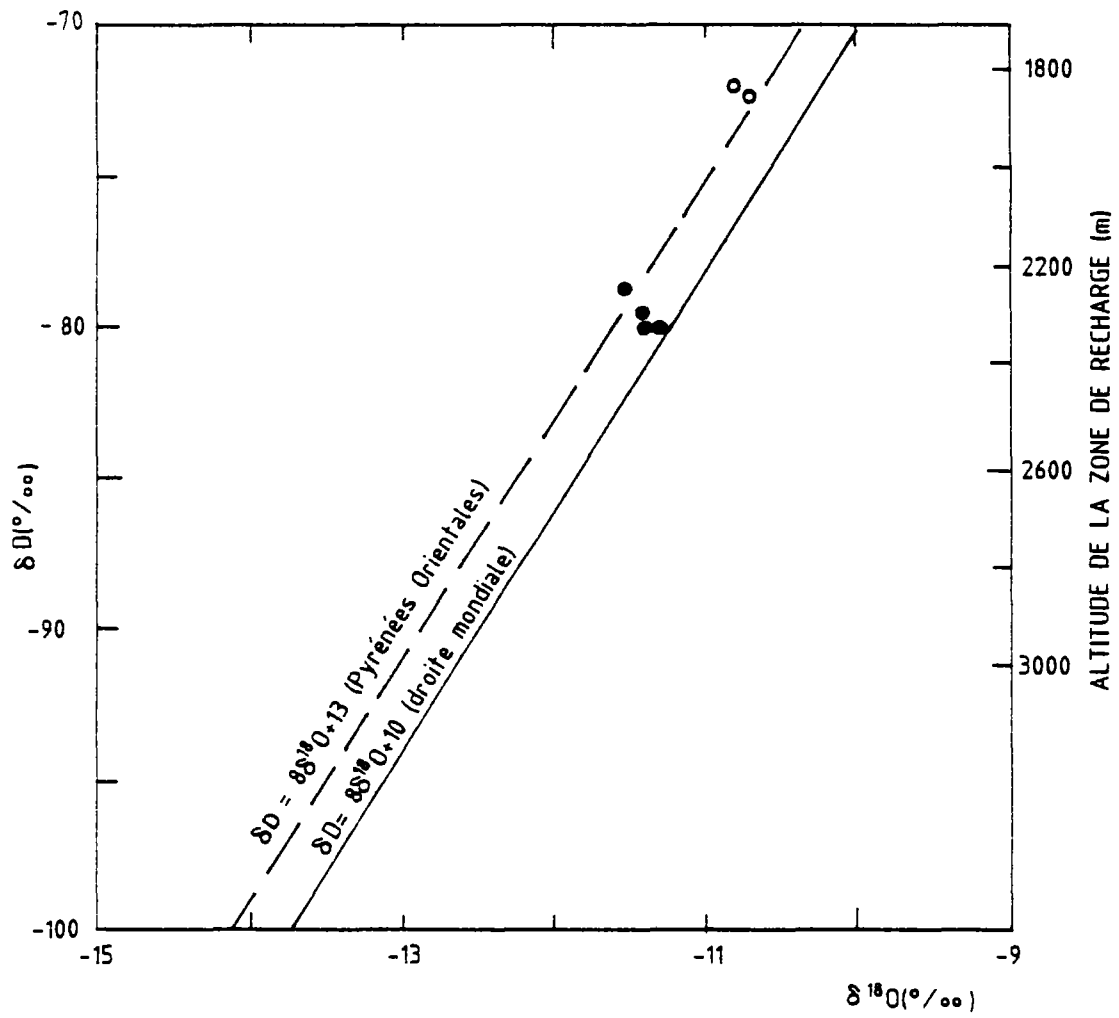


FIG.11 : OXYGENE-18 , DEUTERIUM ET ALTITUDE DE LA ZONE DE RECHARGE
DES EAUX THERMALES DES ESCALDES

La profondeur à laquelle cette température peut être rencontrée dépend essentiellement du type de circulation souterraine et donc de la vitesse de refroidissement. Un écoulement réparti le long d'un plan de faille ou d'un contact verrait sa température baisser beaucoup plus rapidement que dans le cas d'une remontée à l'intersection de deux failles, correspondant à une surface d'échange thermique plus réduite. En première approximation, on peut évaluer à 300 ± 100 m la profondeur à laquelle une température de $80 \pm 5^\circ\text{C}$ serait atteinte.

L'utilisation de l'eau thermale des Escaldes à des fins de chauffage ne posera apparemment pas ou peu de problèmes dûs à la corrosion des matériaux utilisés ou à des précipitations de minéraux incrustants le système de tuyauterie, en raison de la minéralisation extrêmement faible et l'absence de H_2S .

4.9. - BIBLIOGRAPHIE

ALBERT-BELTRAN J.F. (1975)

Les sources thermales des Pyrénées Catalanes. Symp. Intern. sur les eaux minérales (Efoire, Nord Roumanie). Studie Technice si Economice, Serie E, 12 : 21-26.

ARNORSSON S. (1983)

Chemical equilibria in Icelandic geothermal system. Implications for chemical geothermometry investigations. Geothermics, 12, 2/3 : 119-128.

BAUBRON J.C., BOSCH B., DEGRANGES P., HALFON J., LELEU M., MARCE A., et SARCIA C. (1979)

Recherches géothermiques sur les eaux thermales d'Amélie-les-Bains (Pyrénées Orientales) et de Plombières-les-Bains (Vosges). Isotope Hydrology 1978, IAEA, Vienna, Vol. II : 585-612.

BOULEGUE J., FOUILLAC C., MICHARD D. et OUZOUNIAN G. (1977)

Applications géothermiques de l'étude géochimique des eaux thermales des Pyrénées Orientales. Seminar on Geothermal Energy, Bruxelles, EUR 5920, Vol. 2 : 455-468.

CRIAUD A. (1983)

Phénomènes d'oxydo-réduction et métaux en traces dans les eaux minérales carbogazeuses du Massif Central. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris VII, 181 p.

FOUILLAC C. (1983)

Chemical geothermometry in CO_2 - rich thermal waters. Example of the French Massif Central. Geothermics, 12, 2/3 : 149-160.

FOUILLAC C. and MICHARD G. (1981)

Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10, 1 : 55-70.

FOURNIER R.O. (1973)

Silica in thermal waters : laboratory and field investigation. *Proceed. Intern. Symp. Hydrogeochemistry and Biogeochemistry, Japan, 1970, Vol. 1, Washington DC, J.W. Clark* : 122-139.

FOURNIER R.O. and ROWE J.J. (1966)

Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *Am. J. Sci.* 264 : 685-697.

FOURNIER R.O. and TRUESDELL A.H. (1973)

An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37 : 1255-1275.

McKENZIE W.F. and TRUESDELL A.H. (1977)

Geothermal reservoir temperatures estimated from the oxygen isotope compositions of dissolved sulfate and water from hot springs and shallow drill holes. *Geothermics*, 5 : 51-61.

MICHARD G. (1977)

Modification de la répartition des espèces chimiques lors du refroidissement d'une eau thermale. *C.R. Acad. Sc. Paris, t. 284, série C* : 949-952.

MICHARD G. and FOUILLAC C. (1980)

Contrôles de la composition chimique des eaux thermales sulfurées sodiques du Sud de la France. In Y. Tardy (ed.). *Géochimie des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches. S.A.R.L. Eléments, Tarbes* : 147-166.

NOVA ENERGIA (1983)

Origen i situacio de la geotermia a Escaldes, Andorra. 121 pp.

OUZOUNIAN G., MICHARD G., FOUILLAC C. et BEAUCAIRE C. (1980)

Relations entre les concentrations des ions alcalins dans les eaux thermales sulfurées sodiques du Midi de la France. *Chem. Geol.*, 30 : 317-339.

TRUESDELL A.H. (1976)

Summary of Section III. Geochemical techniques in exploration. 2nd U.N. Symp. on Dev. and Use of Geothermal Resources, San Francisco, 1975, I : LIII-LXXIX.

TRUESDELL A.H., NATHENSON M. and RYE R.O. (1977)

The effects of subsurface boiling and dilution on the isotopic compositions of Yellowstone thermal waters. J. Geophys. Res., 82, 26 : 3694-3704.

VUATAZ F.D. (1983)

Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. Matér. Géol. Suisse, Sér. Hydrol. 29, Kümmerly & Frey, Berne, 174 pp.

VUATAZ F.D. (1983)

Hydrology, geochemistry and geothermal aspects of the thermal waters from Switzerland and adjacent alpine regions. J. Volcanol. Geotherm. Res., 19 : 73-97.

5 - ETUDE GRAVIMETRIQUE

5.1. - INTRODUCTION

La démarche habituelle adaptée à une prospection géophysique dans une zone de sources chaudes est de cartographier les conducteurs liés aux émergences, par méthodes électriques ou électromagnétiques, dans le but d'en recueillir des renseignements précieux sur le système de circulation des eaux.

La gravimétrie contribue, quant à elle, à fournir d'une part un schéma structural, appui précieux à la cartographie géologique, et d'autre part, la localisation des zones fracturées qui, lorsqu'elles correspondent à ces zones conductrices, peuvent constituer un réservoir d'eau chaude ou une zone d'alimentation.

Dans le cas des sources chaudes des "Escaldes", leur situation en milieu intensément urbanisé nous a interdit de développer toute méthode électrique et électromagnétique en raison de la présence de parasites industriels (canalisations métalliques, lignes électriques haute tension, etc...).

Cet état de fait nous a donc contraint à nous contenter de la seule campagne gravimétrique et donc de faire l'impasse sur la "dimension électrique" des anomalies relevées, avec les risques que cela implique.

Les mesures, la compilation, le tracé des cartes topographiques et gravimétriques ainsi qu'un début d'interprétation géophysique ont été effectués par le département géothermie du BRGM. Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport interne : "Etude gravimétrique à les Escaldes, Andorre" par F. Mercier, n° 84 GPH 013, dont nous reprendrons de larges extraits dans cette partie géophysique.

5.2. - STATISTIQUES

Les travaux ont été réalisés du 16 au 25 janvier 1984 (mise en place et repli compris).

Personnel

F. MERCIER, pour la topographie et la gravimétrie.

1 manoeuvre embauché localement.

Matériel

1 gravimètre Worden n° 566
1 niveau automatique WILD NK 1
1 R6 4 x 4

Travaux réalisés

190 points nivelés et levés en gravimétrie
32 points repris
4 points triples et 1 point quadruple.

5.3. - EXECUTION DES TRAVAUX

5.3.1. - Topographie

La station de référence est le pied d'une bouche d'incendie dont l'altitude admise est 1 054,21 m (d'après le plan au 1/500 FULL 05.14.25.3) et qui pourra servir de point de départ à toute étude ultérieure.

Les stations ont été matérialisées à la peinture blanche sur route ou sur des roches ou blocs plats. Le nivellement direct a été utilisé. Tous les cheminements ont été fermés entre eux.

La précision du nivellement, compte tenu des erreurs de fermeture (<10 mm) et du rattachement au trépied du gravimètre (effectué avec un mètre pliant doté d'une nivelle), peut être estimé à 0,03 m.

Le tableau 7 récapitule les différentes altitudes adoptées.

5.3.2. - Gravimétrie

Une base unique a été utilisée : le point 43, dont la valeur de G est 980 061.67 (valeur obtenue en effectuant un calage entre la base d'Ax-les-Thermes (France) et le point 43).

La précision sur la lecture de la valeur de G appréciée sur 32 reprises est estimée à 0,045 mGal d'après la figure 12 comprenant un histogramme simple et un histogramme cumulé.

Des difficultés, liées au terrain, ont altéré les mesures. Il s'agit d'un bruit de fond local provoqué par le passage des véhicules sur la route très fréquentée, ainsi que le passage de l'eau des rivières (Riu Valira d'Orient et Riu Madriu). Il est à signaler, également, les difficultés pour la mise en station du gravimètre (période de dégel qui provoquait une instabilité du trépied).

TABLEAU 7

ALTITUDES ADOPTÉES APRES COMPENSATION POUR LE CALCUL DE L'ANOMALIE DE BOUGUER

N° des pts	Z	N° des pts	Z	N° des pts	Z	N° des pts	Z	N° des pts	Z
1	1070.16	41	1063.06	81	1087.73	121	1084.13	161	1089.08
2	1071.31	42	1064.03	82	1087.45	122	1080.36	162	1082.12
3	1074.89	43	1065.85	83	1091.84	123	1065.40	163	1082.52
4	1078.37	44	1067.65	84	1091.05	124	1066.57	164	1078.96
5	1076.89	45	1068.69	85	1087.43	125	1067.40	165	1077.99
6	1075.23	46	1064.09	86	1082.22	126	1065.95	166	1076.40
7	1074.23	47	1065.73	87	1078.48	127	1063.14	167	1053.53
8	1073.24	48	1066.79	88	1068.70	128	1064.66	168	1053.59
9	1072.53	49	1067.67	89	1061.87	129	1070.47	169	1052.64
10	1073.11	50	1071.06	90	1057.49	130	1072.20	170	1051.61
11	1075.65	51	1073.86	91	1053.18	131	1077.96	171	1049.93
12	1077.27	52	1078.34	92	1054.64	132	1077.59	172	1071.88
13	1077.27	53	1082.67	93	1057.48	133	1079.70	173	1080.13
14	1077.27	54	1085.27	94	1058.01	134	1081.75	174	1076.29
15	1078.70	55	1090.23	95	1057.94	135	1083.23	175	1075.56
16	1079.52	56	1095.77	96	1056.73	136	1084.69	176	1073.08
17	1083.26	57	1100.35	97	1058.75	137	1076.01	177	1069.66
18	1086.29	58	1104.83	98	1066.06	138	1069.86	178	1097.35
19	1093.96	59	1094.51	99	1069.42	139	1066.16	179	1098.64
20	1100.42	60	1098.04	100	1076.23	140	1068.34	180	1097.26
21	1069.84	61	1100.65	101	1078.00	141	1067.90	181	1098.51
22	1067.70	62	1102.70	102	1080.84	142	1066.41	182	1097.10
23	1064.20	63	1070.73	103	1082.06	143	1065.98	183	1097.74
24	1062.20	64	1072.26	104	1080.57	144	1058.75	184	1099.15
25	1060.94	65	1075.73	105	1062.29	145	1060.51	185	1103.02
26	1060.25	66	1077.31	106	1064.97	146	1071.24	186	1102.22
27	1059.41	67	1078.89	107	1085.27	147	1076.66	187	1101.58
28	1058.64	68	1079.70	108	1084.77	148	1085.36	188	1103.78
29	1056.93	69	1080.58	109	1088.95	149	1087.70	189	1104.78
30	1055.94	70	1082.79	110	1089.56	150	1087.50	190	1105.42
31	1054.99	71	1063.99	111	1108.53	151	1087.46		
32	1053.55	72	1066.42	112	1114.62	152	1083.17		
33	1052.81	73	1079.42	113	1114.46	153	1080.81		
34	1053.70	74	1070.19	114	1112.68	154	1080.77		
35	1055.80	75	1070.16	115	1110.97	155	1081.33		
36	1056.76	76	1073.25	116	1079.18	156	1085.68		
37	1057.56	77	1076.56	117	1079.24	157	1086.65		
38	1059.48	78	1076.35	118	1081.05	158	1086.91		
39	1060.34	79	1076.69	119	1080.94	159	1086.75		
40	1061.36	80	1084.06	120	1081.91	160	1086.99		

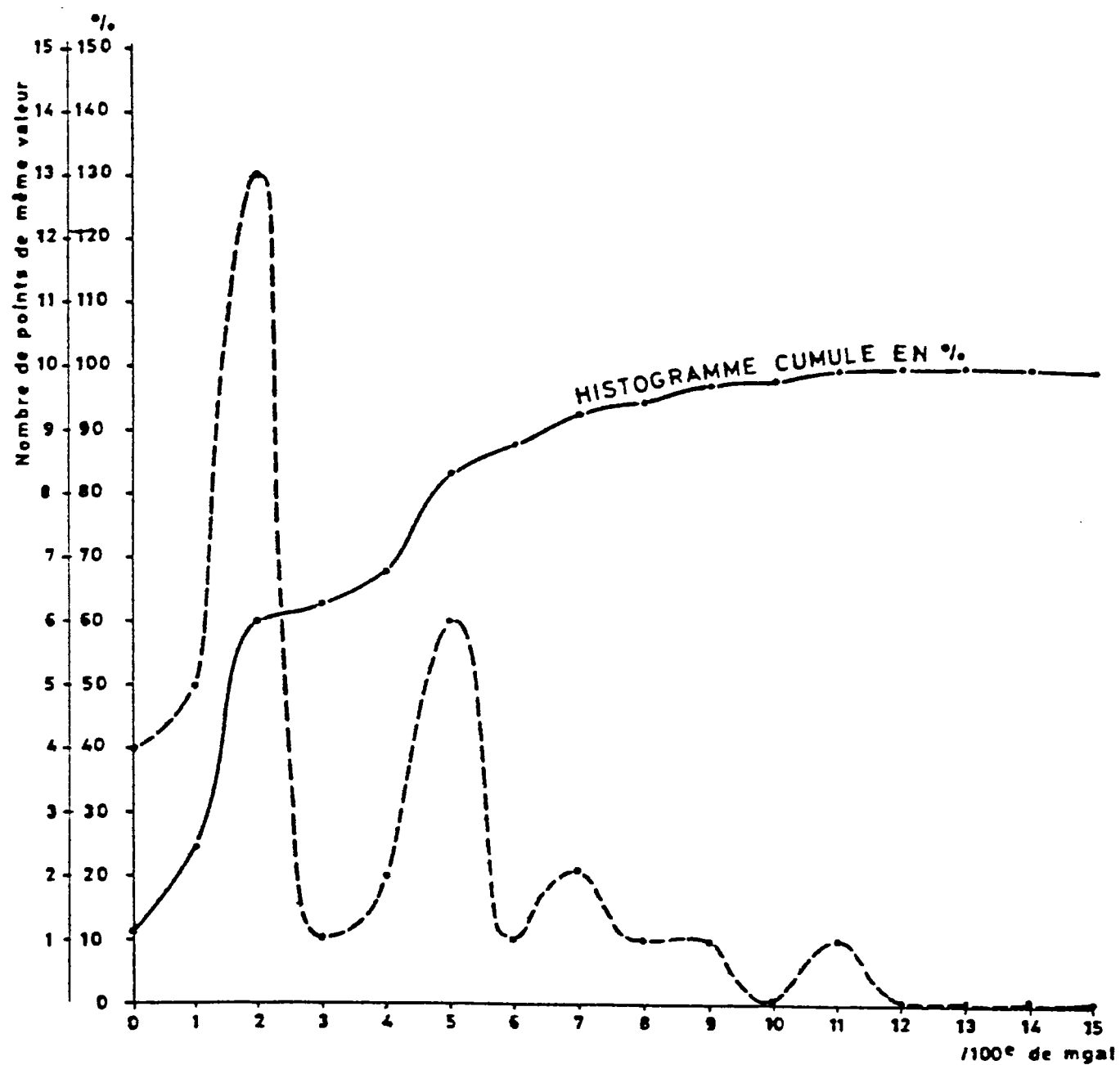


FIG. 12 : HISTOGRAMMES DES POINTS DOUBLES

Toutes les mesures sont faites sur une coupelle au sol, ce qui réduit les erreurs liées à la hauteur du trépied.

La durée moyenne d'un programme est d'environ 1 h 3/4. La densité moyenne des points est d'environ 30 points pour une zone de 100 m x 100 m. Précisons toutefois que certaines zones comme les rivières, routes et propriétés privées ne sont pas couvertes régulièrement.

5.4. - COMPILATION DES DONNEES

Les données de terrain ont été traitées sur ordinateur VAX (BRGM Orléans) pour les différents calculs, contrôles, reports, tracés.

La carte de l'anomalie de Bouguer a été calculée dans la densité 2,7 avec une correction de latitude vraie.

Les corrections topographiques ont été calculées en 3 zones : A, B et C, où :

A est compris entre 0 et 2 m

B est compris entre 2 et 16,65 m

C est compris entre 16,65 m et 53,38 m.

Il est à noter qu'en raison d'une topographie très accidentée, certains points ont dû supporter des corrections topographiques en zone A, ce qui rend la valeur de mesure assez aléatoire.

D'autre part, malgré des corrections topographiques très importantes, 15 mGal jusqu'en zone M (d'après Hammer), il n'en a pas été tenu compte en raison de la petitesse de la zone étudiée, 200 m x 300 m, ce qui représente une constante pour l'ensemble de l'étude, et donc s'inscrit dans un régional.

La précision sur l'anomalie de Bouguer, en additionnant les erreurs liées à la luni-solaire, étalonnage du gravimètre, dérive instrumentale, correction de latitude, d'altitude, correction topographique, la hauteur du trépied, peut être estimée à 0,10 mGal.

L'interpolation a été faite suivant une grille régulière de 10 m x 10 m.

5.5. - RESULTATS

Il a été établi 6 planches à l'échelle du 1/500 (en annexe) :

- . 1 plan de position (pl. I)
- . 1 plan des altitudes des points levés (Pl. II)

- . 1 plan de l'anomalie de Bouguer en densité 2.7 (pl. III)
- . 1 plan d'un régional d'ordre 4 (pl. IV)
- . 1 plan de la résiduelle d'ordre 4 (pl. V)
- . 1 gradient vertical au sol (pl. VI).

Ces 6 planches seront examinées successivement.

Plan de position (pl. I)

Ce plan montre le positionnement des points de mesure. On note des zones non couvertes dues à la non accessibilité (ruisseau, falaises, propriétés privées clôturées).

Sur ce plan, il est mentionné l'origine du nivellement (pied d'une bouche d'incendie) ainsi que la base (point 43) qui a servi de référence pour la totalité des mesures.

Plan des altitudes des points levés (pl. II)

Ce plan mentionne les différentes altitudes des points levés, la différence maximale entre les points extrêmes est de 64,70 m (points 112 et 171).

Plan de l'anomalie de Bouguer (pl. III)

Calculées en densité 2.7, les mesures ont été reportées et interpolées sur une grille régulière de 10 m x 10 m en X et Y.

L'unité d'expression est le milligal. Sur ce plan, nous constatons que le tracé suit en grande partie la topographie et que les axes gravimétriques légers, favorables à une zone fracturée, suivent les talwegs principaux.

Quatre axes principaux sont à noter :

L'axe Ia de direction 75 Gr E suit en grande partie le Riu Valira d'Orient. Cependant, dans la partie nord-est, cet axe suit surtout la route (Ib). Il se peut que cet axe ne soit pas réel mais suive plutôt le ruisseau car dans cette partie, il n'y a pas de points gravimétriques le long du ruisseau (inaccessibilité).

Trois autres types de direction 140-150E apparaissent et viennent se bloquer sur l'axe I.

L'axe II suit le Riu Madriu, son amplitude paraît supérieure à celle de l'axe I mais pourrait être en relation avec la topographie (talweg très encaissé).

L'axe III est d'amplitude plus faible.

Notons également un axe (IV) assez mal défini en raison d'un manque de points gravimétriques lié à la non accessibilité dans les propriétés privées.

Plan du régional d'ordre 4 (pl. IV)

En raison d'une topographie accidentée, il a été établi un régional à l'aide d'un polynôme d'ordre 4 pour atténuer les effets liés aux montagnes encadrant les talwegs. La planche IV montre le régional adopté.

Plan de la résiduelle d'ordre 4 (pl. V)

La différence entre les planches III et IV nous la donne la planche V.

les mêmes axes définis sur la carte de l'anomalie de Bouguer (pl. III) se retrouvent sur cette planche. Cependant, un léger axe V de direction 70 Gr E semble se dessiner.

Plan de gradient vertical au sol (pl. VI)

Ce plan confirme l'ensemble des axes vus sur les autres planches avec l'apparition d'un axe VI très léger.

Notons que les intersections des axes III et Ia sont à proximité des résurgences. Le même phénomène apparaît à l'intersection des axes II et V. L'axe II suit assez fidèlement les résurgences le long du Riu Madriu. L'axe VI se trouve à l'aplomb d'une résurgence émergence thermique (source n° 15) qui a récemment disparue à la suite de travaux.

Profil gravimétrique densité 2,7

Dans le cadre de la "Synthèse Pyrénées", le département géophysique a effectué une série de profils gravimétriques en densité 2,7. Nous reportons ici le profil SO-NE (Santa Julia de Loria-Canillo) intéressant la zone des sources thermales (fig. 13).

Ce profil fait apparaître une vaste anomalie régionale négative de 15 km d'extension marquée en son centre par un minimum secondaire de 5 km de longueur d'onde. Les Escaldes se situent sur la limite sud de cette anomalie.

Notons aussi que l'absence de corrélation entre la topographie et l'anomalie de Bouguer vient conforter le choix de la densité 2,7 pour les calculs de notre carte d'anomalies de Bouguer.

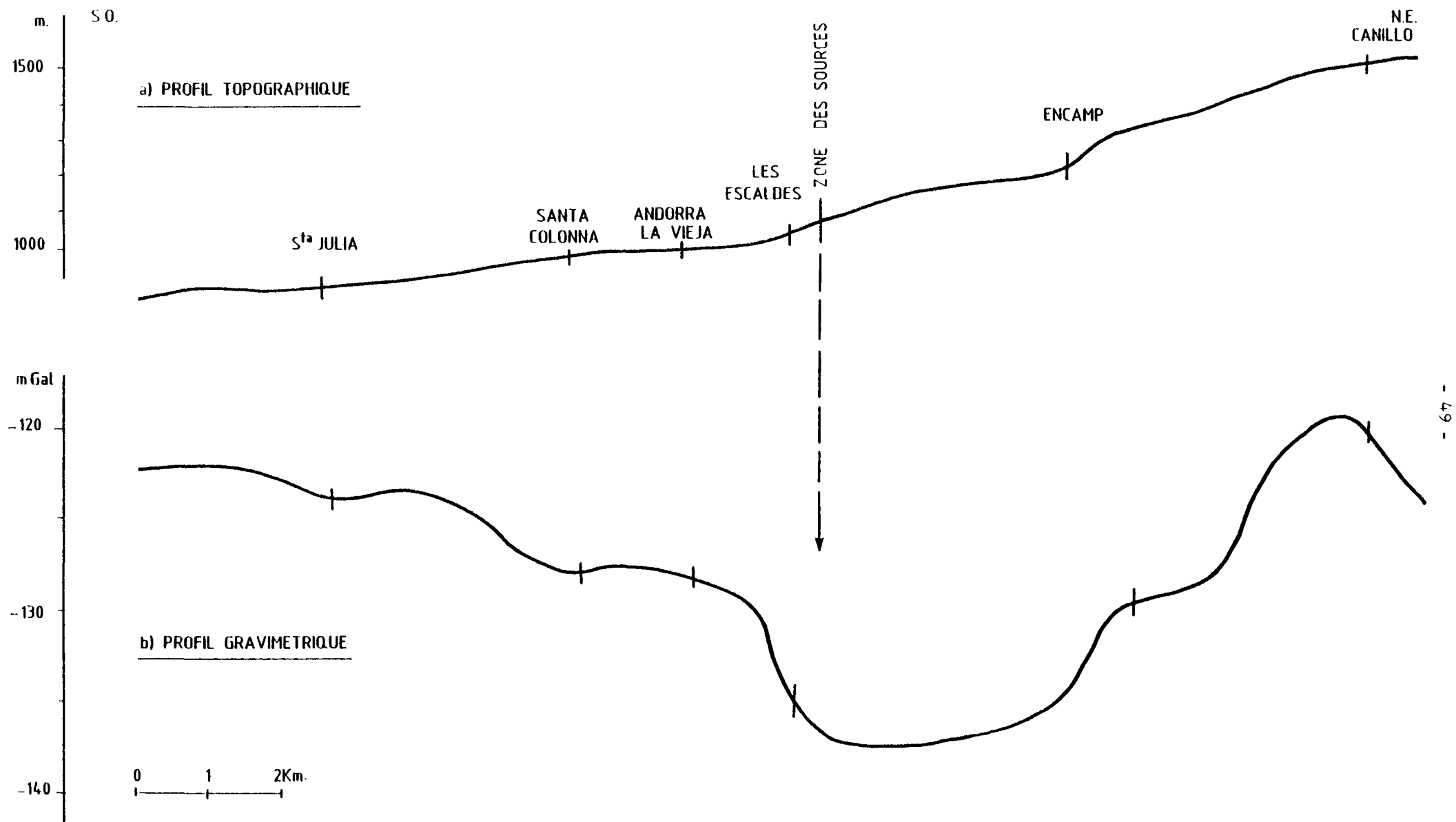


FIG. 13 : PROFIL REGIONAL S^{ta} JULIA-CANILLO

5.6. - INTERPRETATION GEOPHYSIQUE

L'anomalie négative située au centre du profil Santa Julia de Loria-Canillo (fig.13) correspond à la terminaison nord-ouest du batholithe granitique d'Engolasters entre les Escaldes et Encamp. La formation granitique intrusive dans un encaissant sédimentaire métamorphisé plus dense semble donc être à l'origine de cette anomalie légère.

A l'échelle de notre zone d'étude (250 x 350 m) le phénomène est inversé dans la mesure où les granites ainsi que la formation sédimentaire située sur le flanc nord du Riu Valira marquent une anomalie lourde par rapport aux axes légers qui se développent en fond de vallée.

On remarque ainsi une étroite corrélation entre la topographie et la carte des anomalies de Bouguer (fig. 14).

Une étude du choix de la densité utilisée pour les calculs de cette anomalie de Bouguer montre que pour diminuer cette corrélation, il faudrait attribuer aux formations géologiques affleurantes des densités supérieures à 3, ce qui ne correspond à aucune réalité géologique.

Nous avons vu par ailleurs que le choix de la densité 2,7 était justifié sur un plan régional.

Cette corrélation (topographie-anomalie de Bouguer) s'explique alors par le fait que la topographie est étroitement liée à la géométrie des formations géologiques et qu'il est impossible de s'en défaire.

Dans ces conditions, les axes légers des fonds de vallée confirment et précisent l'existence d'importantes zones fracturées le long des principaux accidents géologiques : failles "Valira" et "Madriu".

Les cartes de résiduelle et gradient vertical (planches V et VI) permettent de se libérer un peu de ce phénomène de corrélation topographie-géologie et font apparaître des zones d'anomalie légères (axes notés IV, V et VI) ne présentant pas de corrélation avec la topographie. Il s'agit là sans doute d'accidents secondaires associés eux aussi à une fracturation.

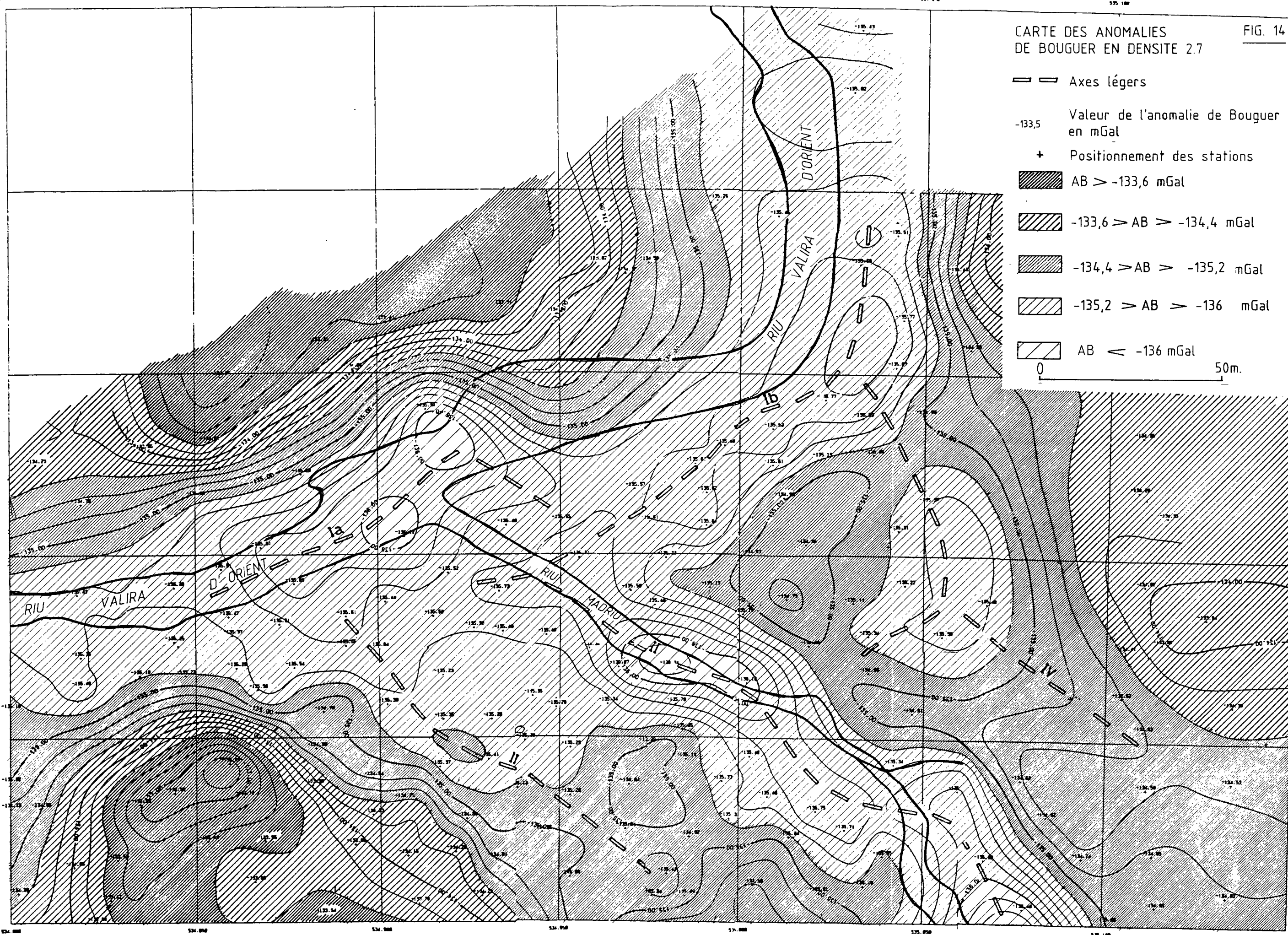
5.7. - CONCLUSION GEOPHYSIQUE

L'impossibilité de mettre en oeuvre des méthodes géophysiques susceptibles d'appréhender les paramètres de résistivité (électrique et électromagnétique) handicape beaucoup l'élaboration d'un modèle géophysique fiable. On peut cependant, grâce à la campagne gravimétrique, confirmer l'existence de zones fracturées le long des principaux accidents géologiques et donc les considérer comme zone potentiellement favorable. Il ne nous est pas possible d'aller plus en amont dans la modélisation du système régissant les émergences.

CARTE DES ANOMALIES
DE BOUGUER EN DENSITE 2.7

FIG. 14

- == Axes légers
- 133,5 Valeur de l'anomalie de Bouguer en mGal
- + Positionnement des stations
- AB > -133,6 mGal
- 133,6 > AB > -134,4 mGal
- 134,4 > AB > -135,2 mGal
- 135,2 > AB > -136 mGal
- AB < -136 mGal
- 0 50m.



6 - SYNTHÈSE DES DONNÉES : MODÈLE DE CIRCULATION

Les sources thermales des Escaldes sont l'expression en surface d'un système hydrothermal profond contrôlé par deux accidents majeurs :

Une première faille régionale NE-SO marque le cours du Riu Valira et limite sur le flanc sud le batholithe granitique d'Engolasters et son encaissant métamorphisé de la formation sédimentaire dévonienne sur le flanc nord.

L'existence de cette faille à pendage sud dont la trace en surface s'individualise nettement, a été confirmée en profondeur par la gravimétrie. Elle a vraisemblablement affecté la couverture sédimentaire dévonienne antérieurement à la mise en place du batholithe granitique, en effondrant le compartiment sud par rapport au compartiment nord. Par la suite, elle a rejoué et provoqué le décalage de plusieurs filons de quartz.

Une deuxième faille NO-SE de grande extension est responsable du creusement du Riu Madriu et marque le lit de ce dernier. Elle appartient à une famille d'accidents sub-parallèles qui affectent aussi bien le massif granitique que la couverture sédimentaire et viennent s'ancrer sur la "faille Valira".

Les différentes sources thermales répertoriées aux Escaldes s'alignent sur ces deux accidents et constituent deux groupes d'émergences géographiquement distincts.

Toutes les eaux thermales des Escaldes présentent les mêmes caractéristiques chimiques (caractère sulfuré sodique, pH alcalin, minéralisation totale très faible) et sont tout à fait semblables aux autres eaux thermales des Pyrénées Orientales.

Leur répartition géographique en deux groupes d'émergences ne correspond donc pas à une disparité d'origine, mais correspond en sub-surface à un contrôle lithologique et structural différent des remontées d'un même système hydrothermal profond.

Le débit total des 36 points d'émergence a été estimé à 48 m³/h environ, ce qui constitue la valeur minimale du débit que l'on peut espérer obtenir par recaptage, en ne tenant pas compte d'éventuels rejets d'eau thermique dans le lit du Riu Madriu et du Riu Valira.

Les températures mesurées en surface varient de 17 à 67°C alors que la température du fluide profond a été estimée à 80 ± 5°C par géothermométrie.

Les données géologiques et gravimétriques montrent que les remontées d'eaux thermales se font dans la zone d'intersection des deux failles "Valira" et "Madriu" et subissent un refroidissement par conduction relativement faible dans ce volume d'échange thermique réduit. En première approximation, on peut évaluer à 300 ± 100 m la profondeur à laquelle l'isotherme 85°C peut être recoupé (fig. 15 et 16).

En résumé, on peut interpréter le système hydrothermal qui donne naissance aux sources des Escaldes de la façon suivante :

Bien qu'ayant une origine très profonde au sein de roches granitiques, les eaux thermales remontent en surface par l'intermédiaire d'une faille régionale "nourricière", la faille Valira (fig. 15). Les remontées d'eaux chaudes se font le long du plan de faille qui joue également le rôle de barrière imperméabilisée (il n'existe aucune source sur le flanc nord de la Valira).

Au niveau des Escaldes, le "coin tectonique" formé par l'intersection de la "faille Valira" et de la "faille Madriu", en provoquant une importante fracturation du substratum, facilite grandement la remontée des eaux thermales dans les dernières centaines de mètres sous la surface (fig. 16) et constitue une surface d'échange thermique réduite, limitant ainsi les pertes par conduction.

En sub-surface (<300 m de profondeur) les eaux suivent les plans de stratification de la couverture dévonienne ou les épontes des filons de quartz recoupés par la faille Madriu.

Les émergences se font toujours au niveau de la zone de contact entre deux bancs calcaro-schisteux ou au contact filon de quartz/sédimentaire.

La cible qui apparaît la plus favorable au recaptage des eaux thermales à faible profondeur est située à l'aplomb de la zone intensément faillée dans la partie basse du Riu Madriu.

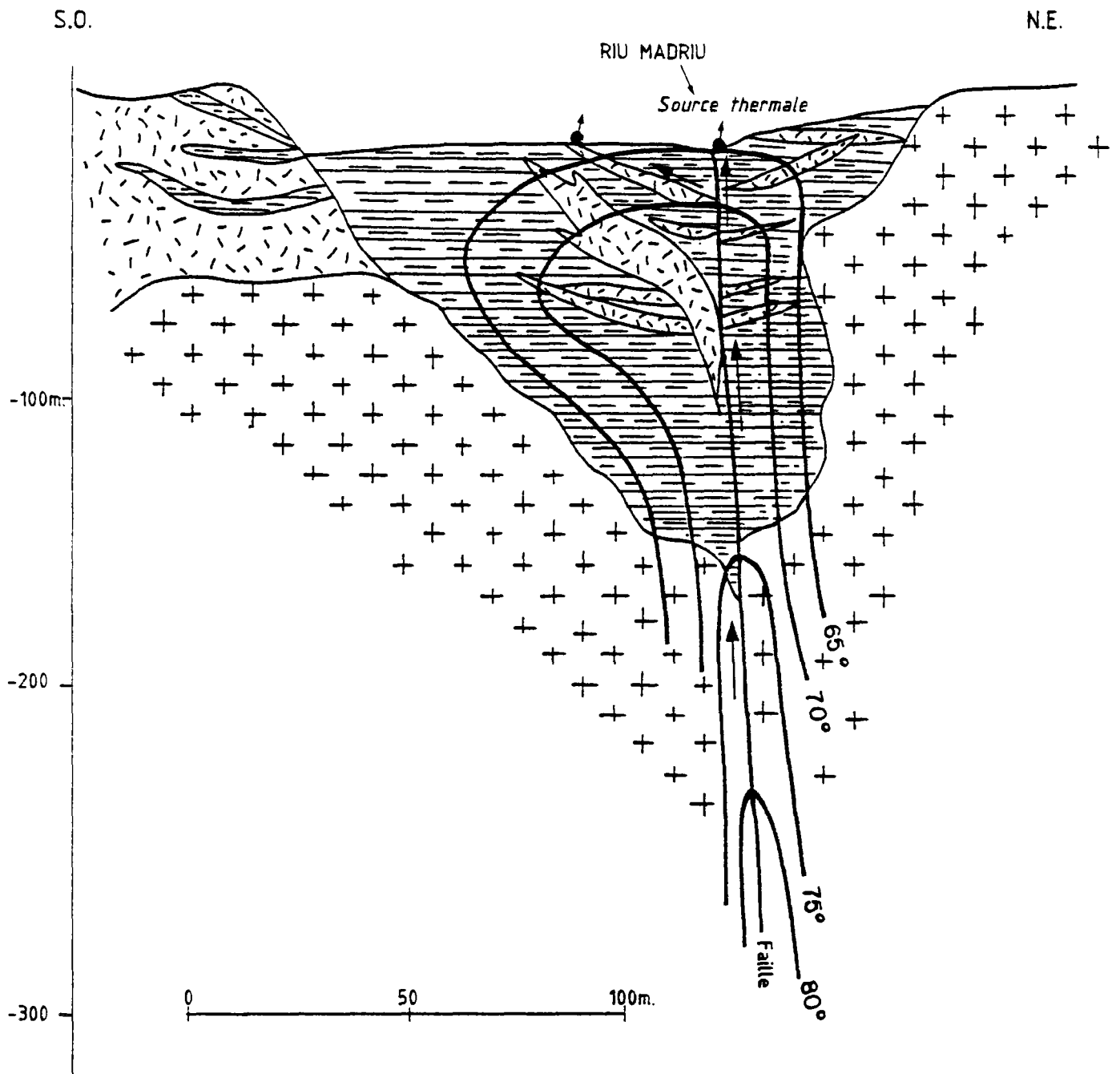


FIG. 16

MODELISATION DU SYSTEME HYDROTHERMAL DES ESCALDES
ET DISTRIBUTION DES ISOTHERMES SUIVANT UNE COUPE PARALLELE
AU RIU VALIRA

7 - PROPOSITION DE PROGRAMME DE FORAGE

7.1. - TECHNIQUE DE FORAGE PRECONISEE

Compte tenu du type de formation à traverser (micaschistes indurés, calcaires métamorphisés) et de la faible profondeur des ouvrages, la technique du forage à l'air au "marteau fond de trou" semble la mieux adaptée. Elle permet en outre de relever les vannes d'eau en cours de forage et de préserver au maximum les caractéristiques hydrogéologiques des horizons traversés.

D'autre part, pour limiter les pertes de charge en exploitation à un niveau acceptable, un diamètre de forage de 6" 1/4 (6" minimum) a été retenu.

Il est important, toutefois, de noter que dans ce cas de figure, l'artésianisme est supposé nous affranchir de l'installation d'une pompe d'exhaure.

Exemple à 50 m³/h

Forage à 150 m en 4" 1/4	$\Delta P \approx 0,25 \text{ kg/cm}^2$
" " 6" 1/4	$\Delta P \approx 0,05 \text{ kg/cm}^2$
Forage à 300 m en 4" 1/4	$\Delta P \approx 0,50 \text{ kg/cm}^2$
" " 6" 1/4	$\Delta P \approx 0,07 \text{ kg/cm}^2$

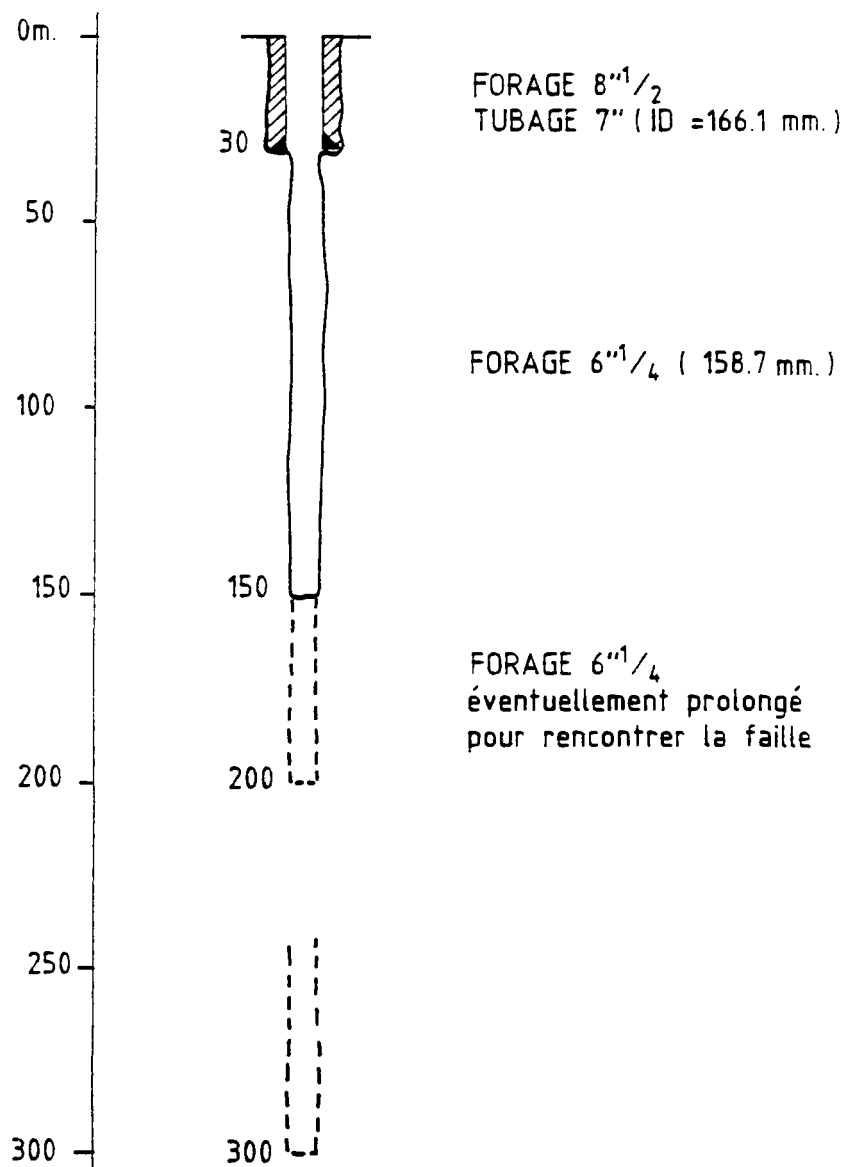
La limitation des pertes de charge permettra d'exploiter les ouvrages au mieux de leur débit.

7.2. - PROGRAMME DE FORAGE RESUME (fig. 17)

- . Superficie de la plateforme de forage : 250 m² environ.
- . Mise en place par génie civil, ou par l'entreprise de forage, d'un tubage technique provisoire quelconque (tube, buse en béton, etc...) couvrant les alluvions superficielles. Ce tubage devra permettre le passage d'un outil 8" 1/2.

FIG. 17

PROGRAMME TECHNIQUE DE FORAGE



Température = 60 - 80°C (85°C max.)
Salinité = 3g/l
Pression en tête = 3Kg/cm²
Débit = 50 m³/h artésien

Méthode de forage : Marteau fond de trou
Éventuellement Rotary

Phase 8" 1/2

Forage en 8" 1/2 jusqu'à 30 m de profondeur environ.

Mise en place d'un tubage 7", 17 lbs/ft, API, grade K55 (ou similaire) et cimentation de ce tubage sur toute sa hauteur.

Phase 6" 1/4

Forage en 6" 1/4 de 30 à 150-200 m.

En cas de nécessité, le forage pourra être prolongé jusqu'à un maximum de 300 m (éventuellement en rotary).

Note : En cas de venue importante, une vanne permettant le passage de l'outil pourra être installée sur la bride du tubage 7". Cette vanne devra permettre le passage de l'outil 6" 1/4.

Tête de puits

Le tubage 7" recevra une bride permettant l'installation d'une vanne de contrôle. Cette vanne permettra le passage d'un outil 6" 1/4 et résistera à une pression de travail de l'ordre de 5 kg/cm².

Essais

Un essai de débit aura lieu en fin de forage pour permettre de mesurer la pression et le débit artésien disponible sur l'ouvrage et les caractéristiques du fluide géothermal (température, salinité).

7.3. - DEVIS ESTIMATIF

Forage 8" 1/2 0 à 30 m Tubage 7" 17 # API K55

Open hole 30 à 300 m Ø 6" 1/4

Forage destructif réalisé au marteau fond de trou jusqu'à 200 m puis éventuellement approfondi jusqu'à 300 m.

Génie civil.....	100 000 F HT	
Amenée-Repli	100 000 F HT	
Forage 0-200 m	100 000 F HT	
Forage 200-300 m.....	90 000 F HT	
Tubage 7" 0-30 m.....	6 450 F HT	
Cimentation.....	10 000 F HT	
Bride de base (+ vanne).....	10 000 F HT	
Essais.....	50 000 F HT	
Divers imprévus 5 %.....	23 322 F HT	
TOTAL.....	489 772 F HT	arrondi à <u>500 000 F HT</u>

8 - RECOMMANDATIONS

Compte tenu des caractéristiques de la ressource géothermale estimée aux Escaldes, une exploitation rationnelle peut être envisagée par le biais d'un forage de recaptage en petit diamètre, à faible profondeur (200 à 300 m).

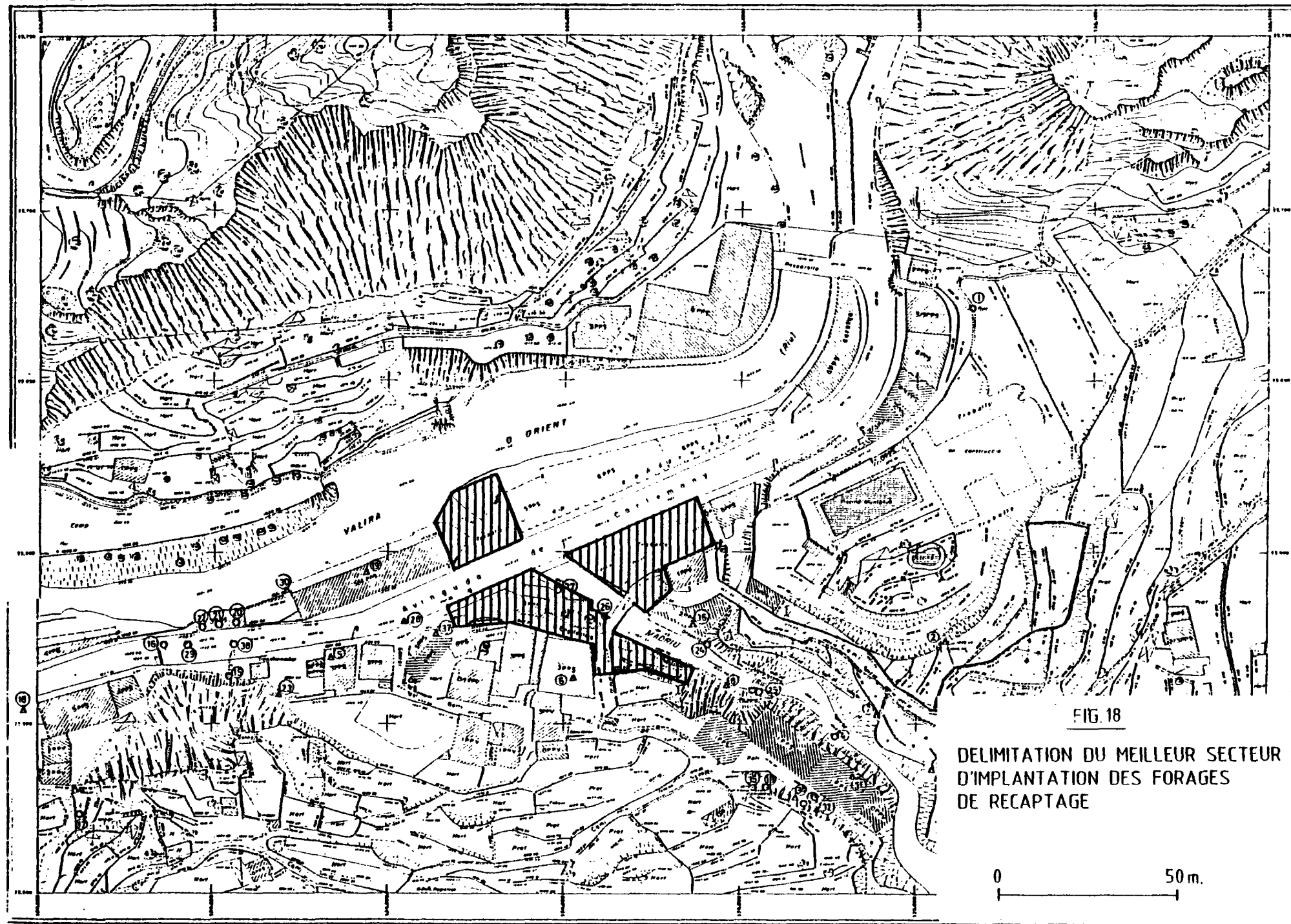
Si le débit obtenu à la suite du premier forage s'avère insuffisant, un second puits peut être implanté dans les mêmes conditions techniques.

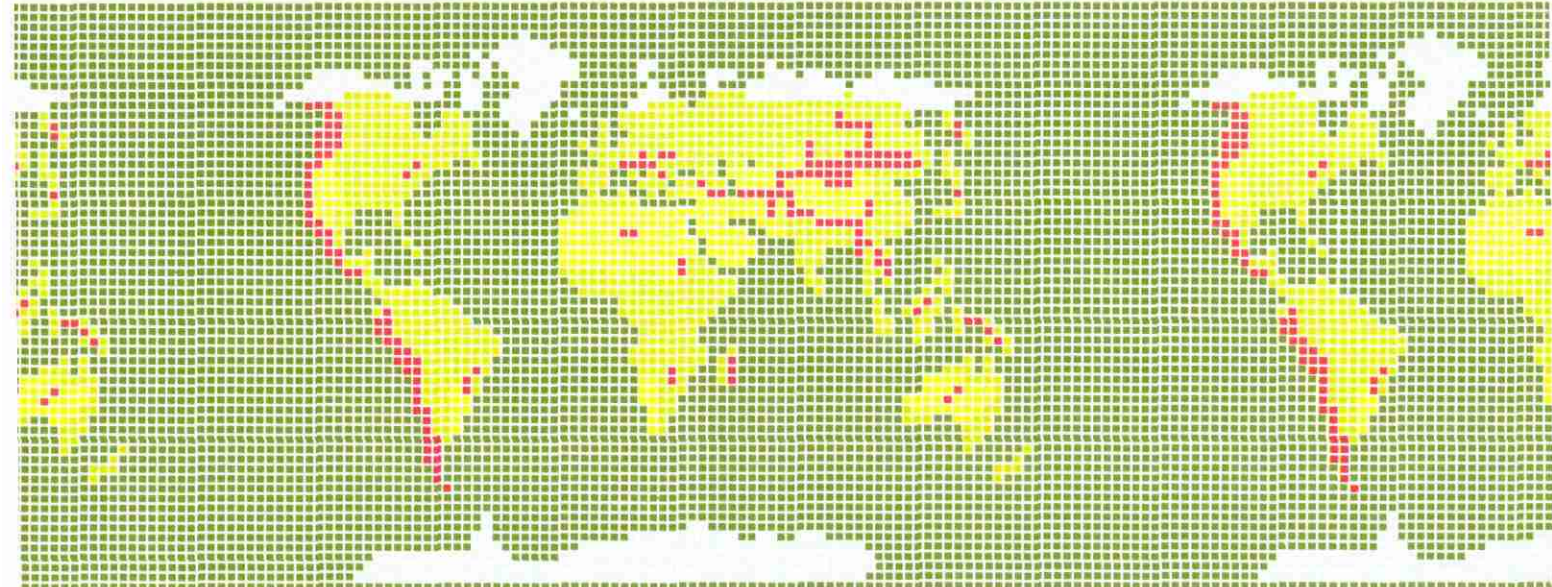
L'implantation des plateformes de forage nécessite une superficie au sol difficile à obtenir dans le contexte très urbanisé des Escaldes. Le secteur d'implantation qui apparaît le plus favorable, tant au niveau de la réalisation technique que de la zone d'intérêt géologique, est situé dans la partie basse du Riu Madriu, entre l'ancien Pont de Pierre et le Riu Valira (fig. 18).

Moyennant certains aménagements de génie civil, la réalisation d'un ou deux forages est possible sur les rives du Riu Madriu.

Il convient maintenant de mieux délimiter les périmètres d'installation d'une machine de forage montée sur camion en fonction des accès et de l'appartenance des terrains (privés ou communaux).

En tout état de cause, le recaptage par forage des eaux thermales des Escaldes s'avère indispensable, quelle que soit l'option d'utilisation retenue par la suite (thermalisme et/ou chauffage urbain).





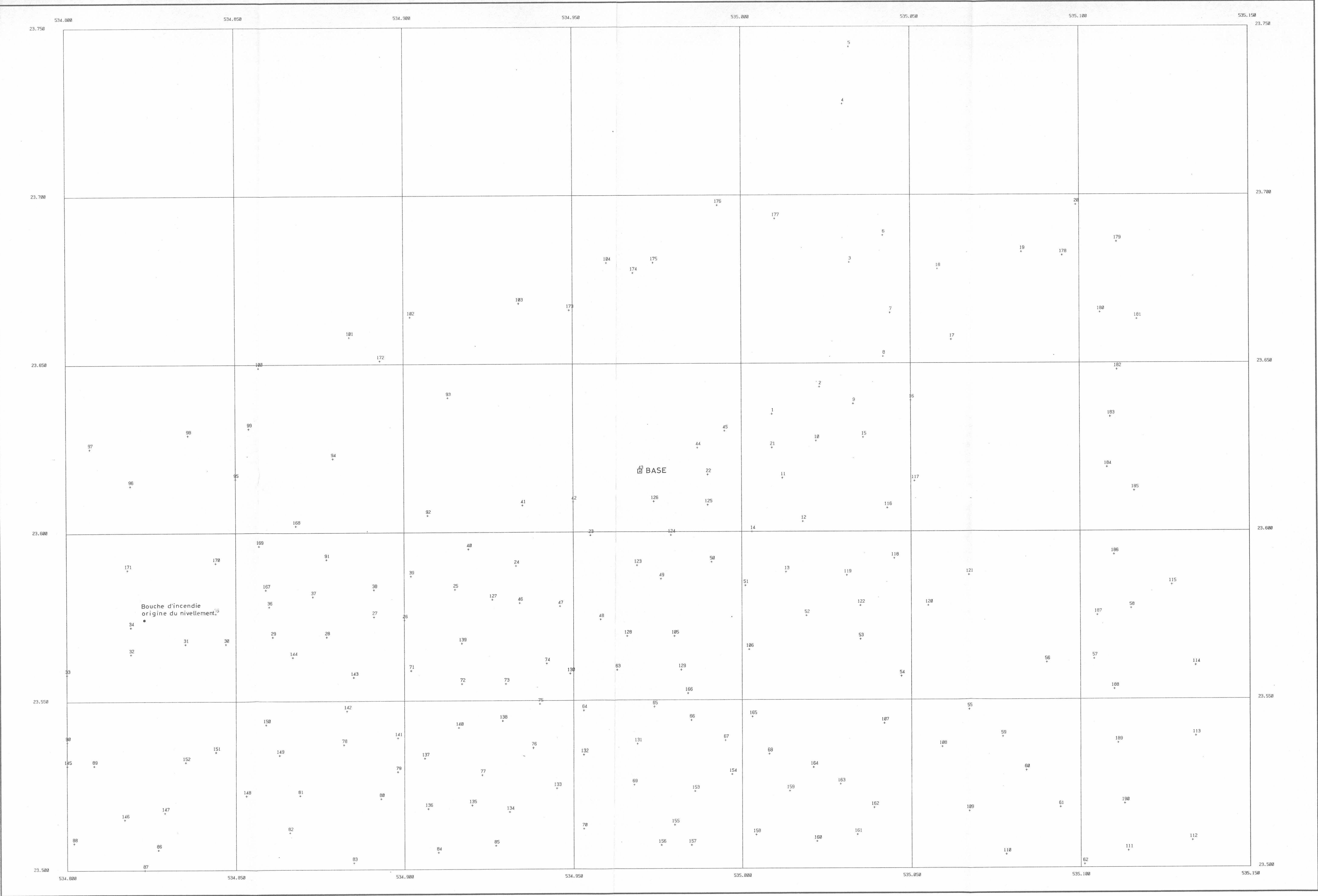


PLANCHE : 1

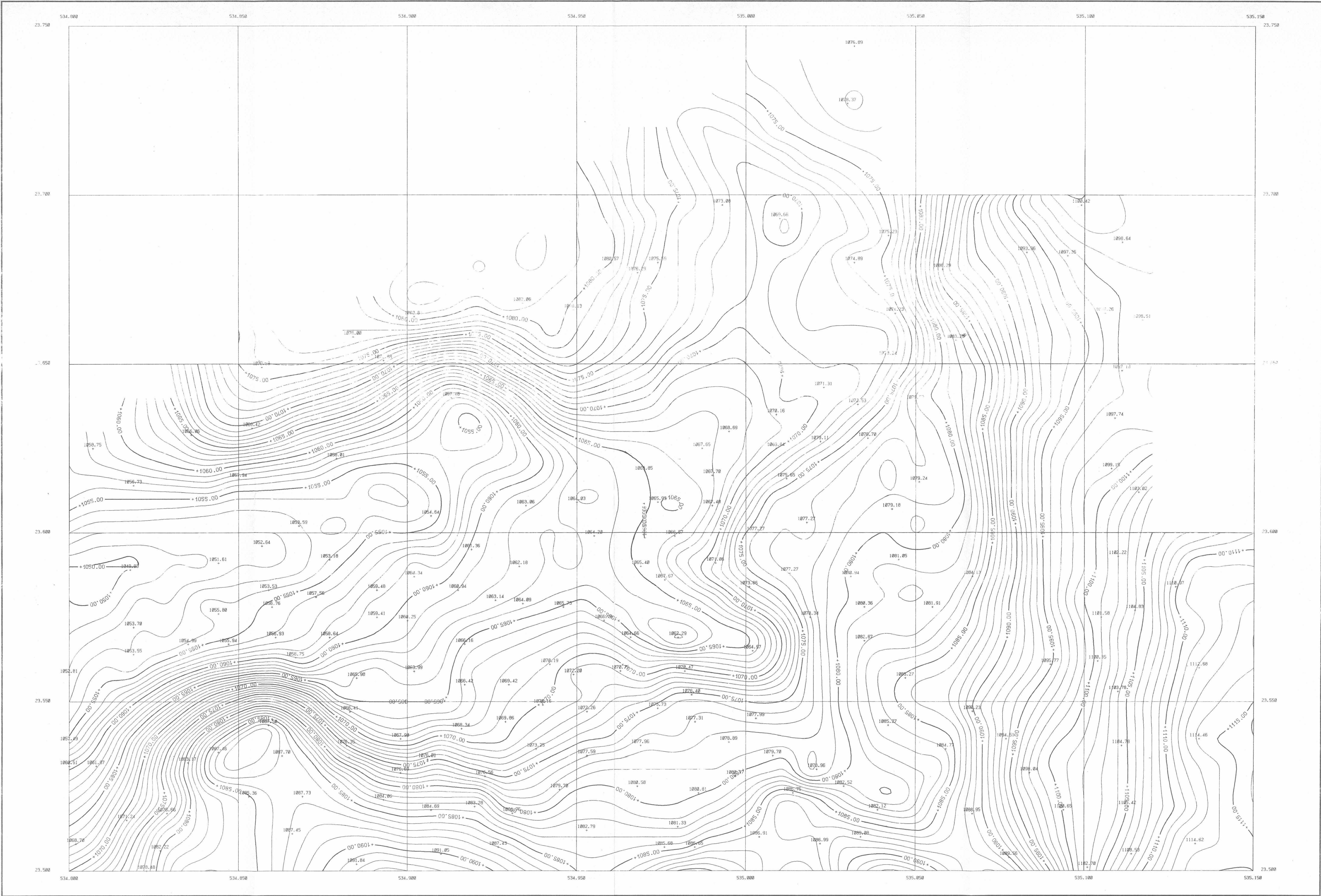
BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE

ANDORRE
"LES ESCALDES"
PLAN DE SITUATION

+ Position du point gravimetrique et son numero

ECHELLE: 1/500.
0. 0.010 0.020 0.030 0.040 0.050 KM

ETABLI LE : FEVRIER 1984 84 GPH 013



BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE

ANDORRE

"LES ESCALDES"

PLAN DES ALTITUDES

1093.96
+ Altitude du point

COTATION :

— 1.00 M
— 5.00 M

PAS DE LA GRILLE EN KM

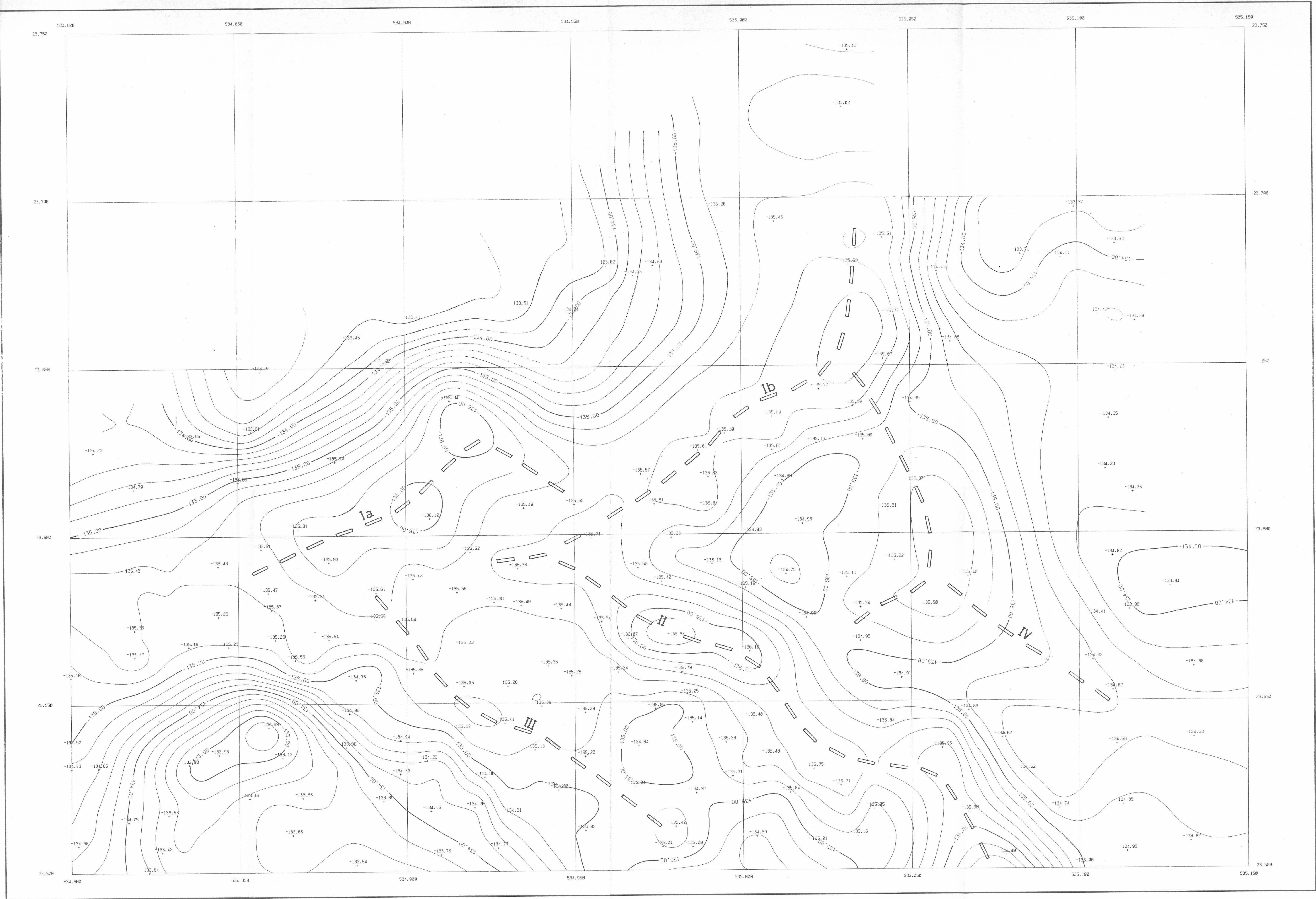
EN X 1.210
EN Y 0.210

ECHELLE: 1/500.



ETABL. LE : FEVRIER 1984

84 GPH 013



BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE

ANDORRE "LES ESCALDES"

PLAN DE L'ANOMALIE DE BOUGUER
D=2,7

— Axe léger

COTATION :

— 0.20 MEG
— 1.00 MEG

DES DE LA GRILLE EN KM

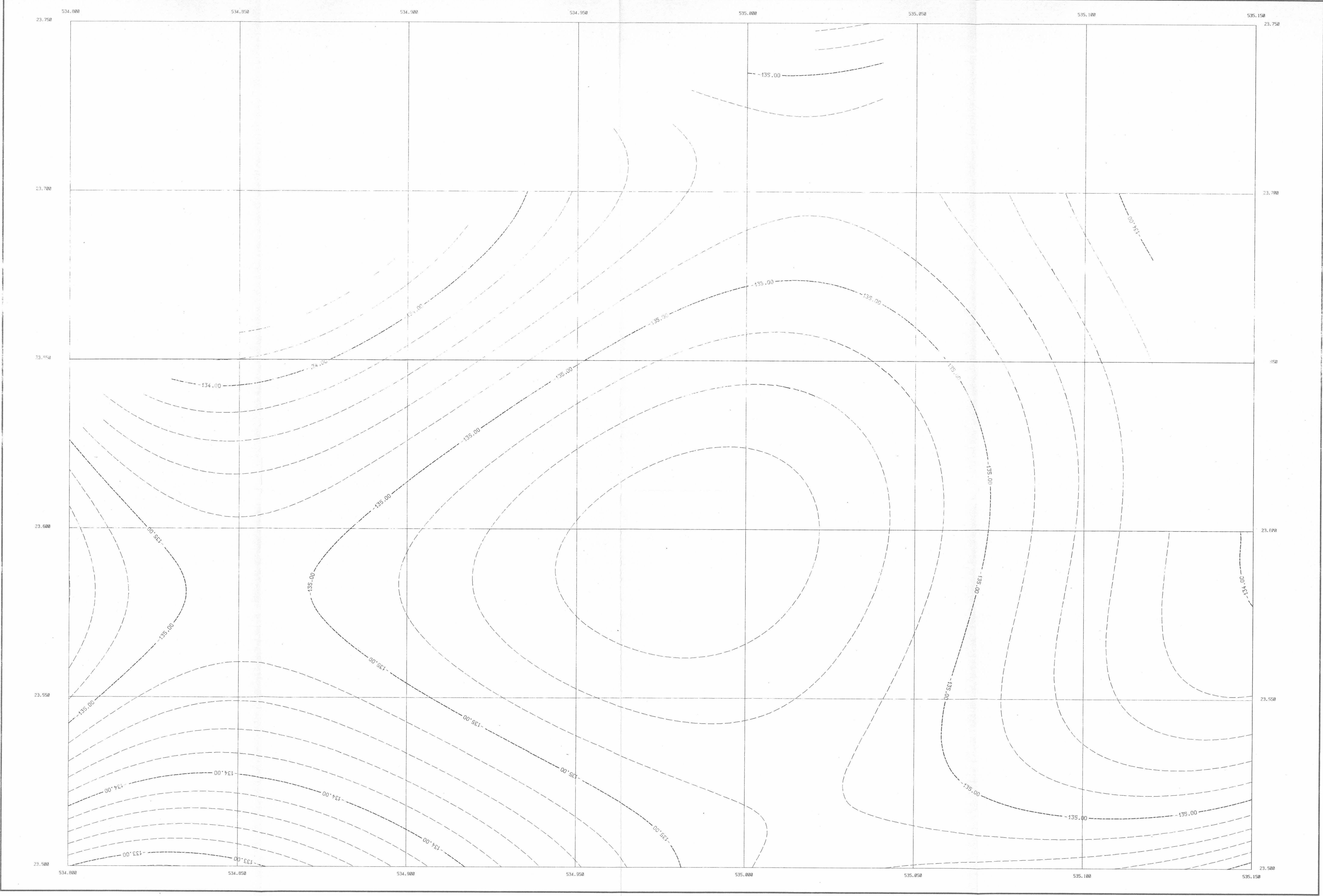
EN X : 0.010
EN Y : 0.010

ECHELLE : 1/500.



ETABLI LE • FEVRIER 1984

84 GPH 013



BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE

ANDORRE
"LES ESCALDES"
REGIONAL
POLYNOME ORDRE 4

NOTATION :

--- 0.10 MGAL
--- 1.00 MGAL

PAS DE LA GRILLE EN KM

EN X 0.010
EN Y 0.010

ECHELLE: 1/500.



ETABLI LE : FEVRIER 1984

84 GPH 013

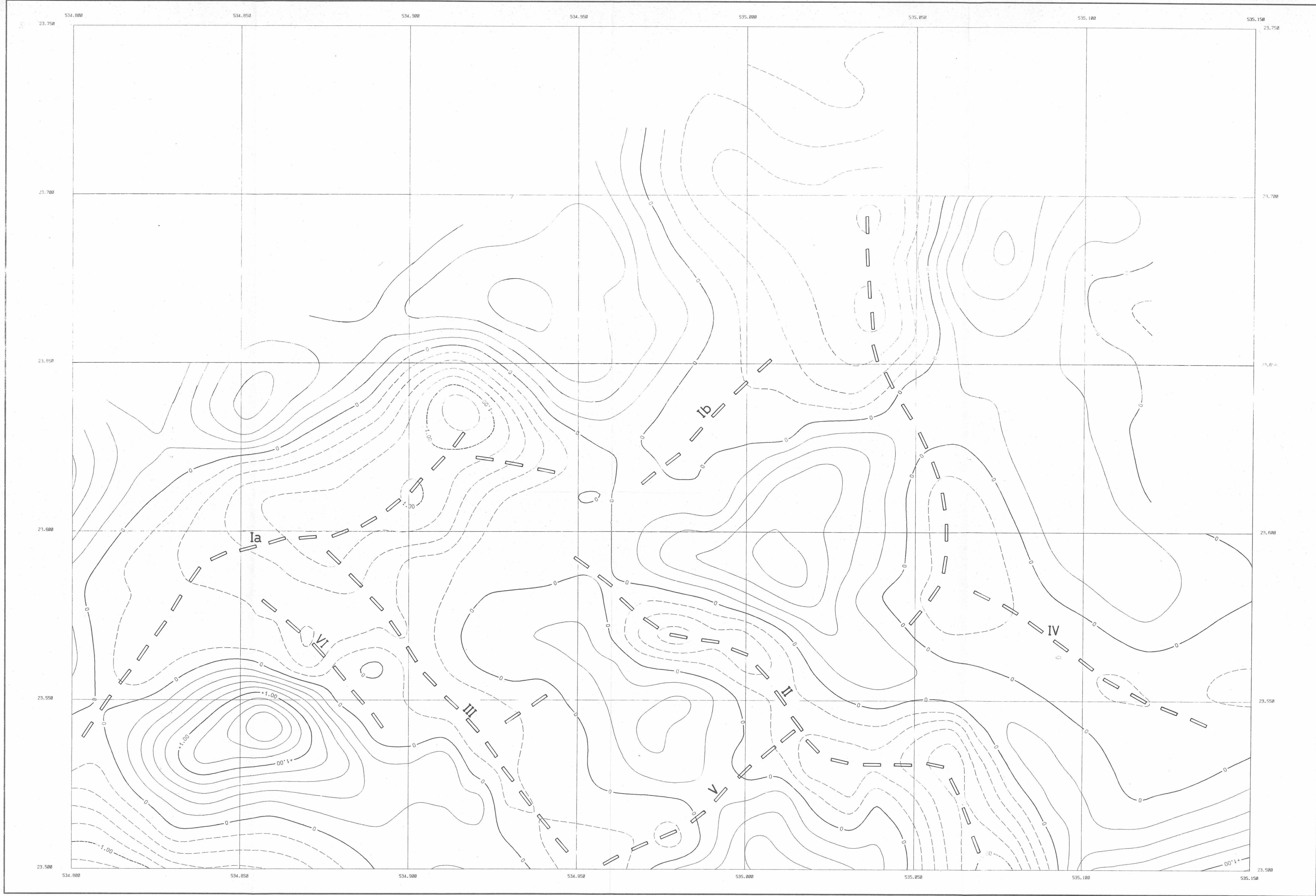


PLANCHE : V

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE

ANDORRE
"LES ESCALDES"
RESIDUELLE
POLYNOME ORDRE 4

— Axe léger

COTATIONS :
- - - 0.20 MGR
- - - 1.00 MGR

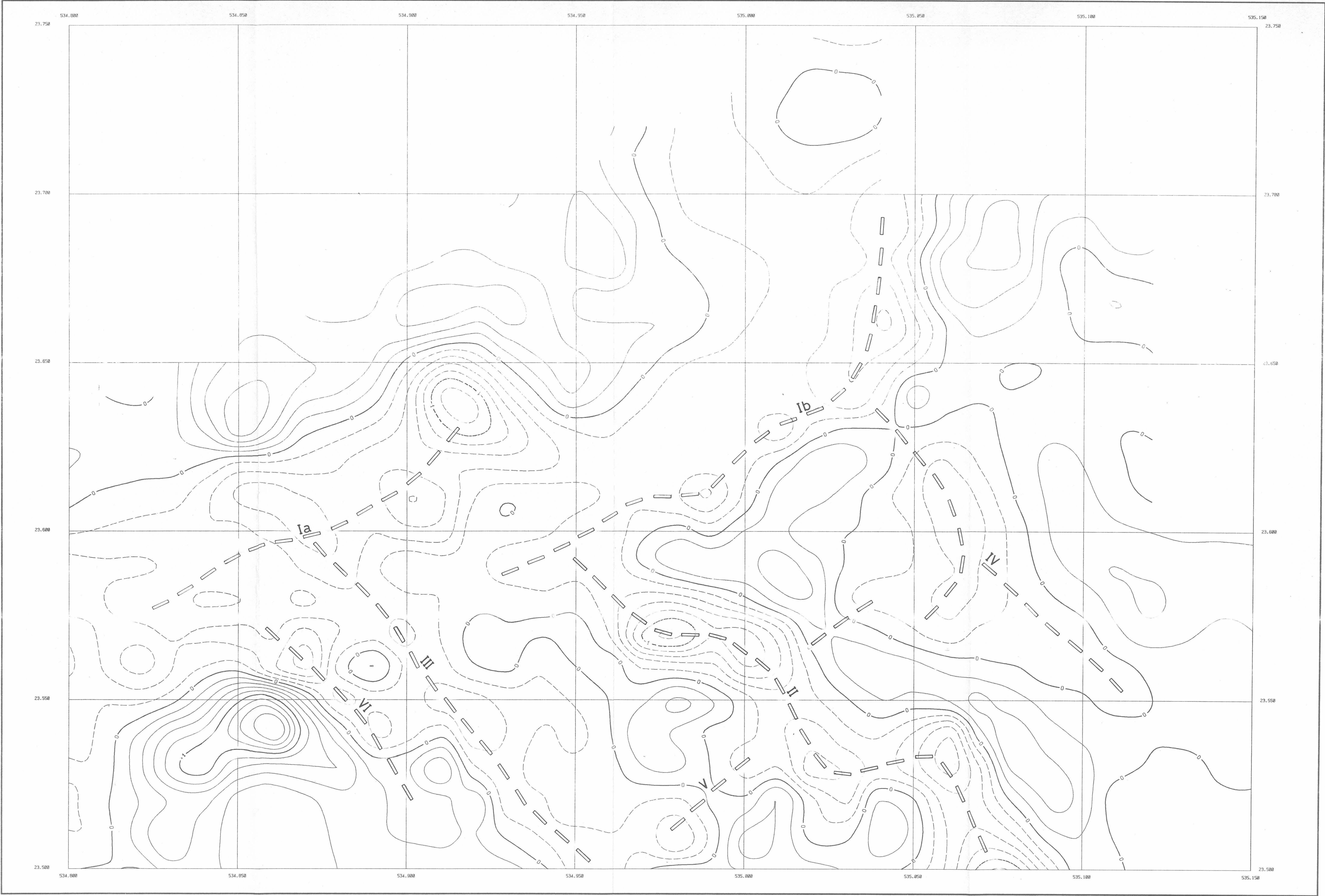
PAS DE LA GRILLE EN KM
EN X 0.010
EN Y 0.010

ECHELLE : 1/500.

0 0.010 0.020 0.030 0.040 0.050 KM

ETABLI LE : FEVRIER 1984

84 GPH 013



BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES
DEPARTEMENT GEOPHYSIQUE

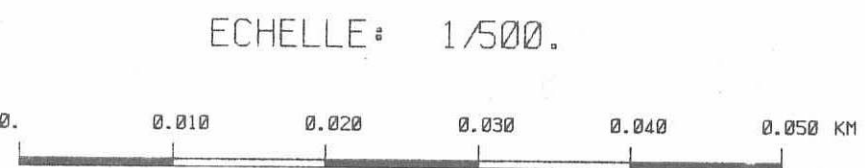
ANDORRE

"LES ESCALDES"

GRADIENT VERTICAL GRAVIMETRIQUE AU SOL

— Axe léger
COTATION : MGAL
—— 0,2 mgal/km
—— 1 mgal/km

PAS DE LA GRILLE EN KM
EN X 0,010
EN Y 0,010



ETABLI LE : FEVRIER 1984

84 GPH 013