



HAL
open science

Application du magnétomètre différentiel à double résonance à la prospection minière sur des gîtes métallifères alpins

Jacques Pocachard

► **To cite this version:**

Jacques Pocachard. Application du magnétomètre différentiel à double résonance à la prospection minière sur des gîtes métallifères alpins. Minéralogie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1977. Français. NNT: . tel-00745719

HAL Id: tel-00745719

<https://theses.hal.science/tel-00745719>

Submitted on 26 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GEOLOGIE GRENOBLE UJF



D

050 030495 5

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

POCACHARD,

1^{er}
Grenoble

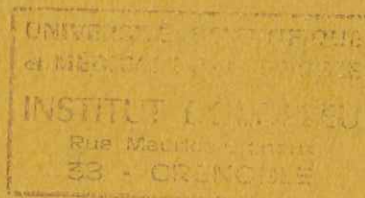
24 FEV. 1977

L

**APPLICATION DU MAGNETOMETRE DIFFERENTIEL
A DOUBLE RESONANCE A LA PROSPECTION MINIERE
SUR DES GITES METALLIFERES ALPINS.**

par **Jacques POCACHARD**

THESE pour obtenir le grade
de Docteur de Spécialité.
Spécialité: géologie appliquée



Soutenue le 23 Février 1977 devant la commission d'examen

Président :	R MICHEL	professeur
Examineurs :	P VIALON	professeur
	H DABROWSKI	maître-assistant
	A SALVI	chef de la division Magnétométrie CEN Grenoble
	P LEMERCIER	chef du groupe GAMCIS CEN Grenoble

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

**APPLICATION DU MAGNETOMETRE DIFFERENTIEL
A DOUBLE RESONANCE A LA PROSPECTION MINIERE
SUR DES GITES METALLIFERES ALPINS.**

par **Jacques POCACHARD**

THESE pour obtenir le grade
de Docteur de Spécialité.

Spécialité: géologie appliquée

Soutenue le 23 Février 1977 devant la commission d'examen

Président :	R MICHEL	professeur
Examineurs :	P VIALON	professeur
	H DABROWSKI	maître-assistant
	A SALVI	chef de la division Magnétométrie CEN Grenoble
	P LEMERCIER	chef du groupe GAMCIS CEN Grenoble

... Une lueur jaune, des bruits sourds de chaussures heurtant le rocher, un coup sec. Robert ramasse un éclat de roche, puis me le montre. Chouette caillou! Oh, ce n'est pas une pièce de musée mais pour nous cela peut être beaucoup plus. C'est un rendez-vous sur la place de Gières à six heures du matin, deux heures de route, un bon casse-croûte avant d'entrer dans la mine et dès que l'obscurité nous entoure, l'imagination...

Beaucoup de souvenirs mais aussi de l'espoir de rencontrer à nouveau des Robert, Marcel, Gilles, François, Jean-Luc, Sylvie, Nicolas, Alain, Pierre, Jean-François, Henri, Michel, Danielle, Jean-Paul, Francis, Charles, Monique, Jean-Pierre, Pierrette,...

Merci aussi à Messieurs MICHEL, VIALON, DABROWSKI, SALVI et LEMERCIER.

- T A B L E D E S M A T I E R E S -

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u>	1
 <u>CHAPITRE 1 : PRINCIPES FONDAMENTAUX DU MAGNETISME</u>	
1.1. Champ magnétique.....	3
1.1.1. Définition du moment magnétique.....	3
1.1.2. Champ magnétique créé par un aimant.....	4
1.1.3. Champ magnétique créé par un courant.....	4
1.1.4. Unités.....	4
1.2. Propriétés magnétiques de la matière.....	5
1.2.1. Intensité d'aimantation, susceptibilité magnétique.....	5
1.2.2. Moment magnétique à l'échelle de l'atome.....	5
1.2.2.1. Moment magnétique de spin.....	5
1.2.2.2. Moment magnétique orbital.....	5
1.2.3. Diamagnétisme.....	7
1.2.4. Paramagnétisme.....	7
1.2.5. Ferromagnétisme.....	8
1.2.6. Ferrimagnétisme.....	9
1.2.7. Antiferromagnétisme.....	9
1.2.8. Hystérésis.....	10
1.2.9. Conclusion.....	10
 <u>CHAPITRE 2 : MAGNETISME DES ROCHES</u>	
2.1. Aimantation des minéraux.....	11
2.1.1. Nature du minéral.....	11
2.1.2. Susceptibilité magnétique.....	12
2.1.3. Anisotropie magnétocristalline.....	12
2.1.4. Magnétostriction.....	15

	<u>Pages</u>
2.2. Aimantation des roches.....	15
2.2.1. Aimantations rémanentes.....	15
2.2.1.1. Aimantation rémanente isotherme.....	16
2.2.1.2. Aimantation thermo-rémanente.....	16
2.2.1.3. Aimantation rémanente chimique.....	16
2.2.1.4. Aimantation rémanente détritique.....	17
2.2.2. Susceptibilité magnétique des roches.....	17
 <u>CHAPITRE 3 : CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE</u>	
3.1. Eléments du champ magnétique terrestre.....	18
3.2. Champ interne.....	18
3.3. Champ externe.....	19
3.4. Champ géomagnétique.....	19
 <u>CHAPITRE 4 : APPAREILS DE MESURE</u>	
4.1. Déviation de l'aiguille aimantée.....	20
4.1.1. Mesure directe.....	20
4.1.1.1. Balance de Schmidt.....	20
4.1.1.2. Balance magnétique de torsion.....	21
4.1.2. Mesure par compensation.....	21
4.2. Flux magnétique.....	22
4.3. Résonance nucléaire et électronique.....	23
4.3.1. Principe général.....	23
4.3.2. Prépolarisation et précession libre.....	23
4.3.3. Polarisation dynamique.....	24
4.3.4. Pompage optique.....	25
 <u>CHAPITRE 5 : UTILISATION DU MAGNETOMETRE DIFFERENTIEL A HAUTE SENSIBILITE SUR LE TERRAIN</u>	
5.1. Répartition de l'appareillage. Caractéristiques.....	26

	<u>Pages</u>
5.1.1. Station de référence.....	26
5.1.2. Equipe mobile.....	27
5.1.3. Station de mesure.....	27
5.1.4. Caractéristiques.....	27
5.2. Méthodes d'investigation.....	28
5.2.1. Méthodes d'enregistrement.....	28
5.2.1.1. Enregistrement en profil continu.....	28
5.2.1.2. Enregistrement point par point.....	28
5.2.2. Type de structure recherchée. Etude des paramètres.....	29
5.2.2.1. Profondeur de la source magnétique.....	29
5.2.2.2. Volume et forme de la structure magnétique.....	30
5.2.2.3. Intensité d'aimantation.....	30
 <u>CHAPITRE 6 : TRAITEMENT DES DONNEES PAR INFORMATIQUE</u>	
6.1. Prétraitement.....	31
6.1.1. Profils rectilignes parallèles.....	32
6.1.2. Profils en ligne brisée.....	33
6.1.3. Mesures point par point.....	34
6.2. Rendu des résultats.....	34
6.2.1. Tracé de profils.....	35
6.2.2. Cartographie.....	35
6.2.3. Intérêt du lissage par doublage.....	35
6.2.4. Travail sur de petits secteurs.....	36
6.3. Interprétation des résultats.....	36
6.4. Conclusion.....	37
 <u>INTRODUCTION AUX CAMPAGNES DE PROSPECTION MAGNETIQUE DANS LE MASSIF DE BELLEDONNE</u>	
.....	38
 <u>CHAPITRE 7 : AMAS DE PYRRHOTITE DE CHAMPIARD - SAINT-LEGER</u>	
7.1. Contexte géologique.....	40

	<u>Pages</u>
7.2. Prospection magnétique.....	41
7.2.1. Janvier 1975. Campagne de prospection.....	41
7.2.1.1. Préparation.....	41
7.2.1.2. Passage de la sonde.....	41
7.2.2. Résultats.....	42
7.2.2.1. Analyse des profils 187, 22, 1.....	42
7.2.2.2. Analyse des profils 228, 103, 124, 254, 290, 311, 332, 145.....	43
7.2.2.3. Analyse du profil 268.....	43
7.2.2.4. Analyse des profils 213, 187, 166, 145, 82, 61,40.....	44
7.2.2.5. Analyse de la carte de profils magnétiques.....	44
7.2.2.6. Conclusions sur l'analyse des résultats.....	45
7.3. Essai d'interprétation par modèles.....	46
7.3.1. Interprétation des anomalies paires.....	46
7.3.2. Interprétation des anomalies impaires.....	47
7.3.2.1. Phénomènes magnétiques au niveau des amas.....	48
7.3.2.2. Puissance de l'amas.....	48
7.3.2.3. Extension en profondeur de l'amas.....	49
7.3.2.4. Pendage de l'amas.....	50
7.3.2.5. Distance entre la sonde et l'amas.....	50
7.3.2.6. Interprétations des profils 22, 1, 268.....	50
7.3.2.7. Conclusions.....	52
 <u>CHAPITRE 8 : FILON DE NOGUILLAN</u>	
8.1. Contexte général.....	54
8.1.1. Chaîne des Hurtières.....	54
8.1.2. Filon de Noguillan.....	56
8.1.2.1. Géométrie du gisement.....	56
8.1.2.2. Minéralisation.....	56
8.2. Topographie, étirement des minéraux, schistosité, fracturation de la chaîne des Hurtières.....	57

	<u>Pages</u>
8.2.1. Topographie, étirement des minéraux.....	57
8.2.2. Fracturation.....	58
8.2.2.1. Interprétation photogéologique.....	58
8.2.2.2. Détermination des familles de fractures.....	59
8.2.3. Schistosité.....	60
8.2.4. Conclusions sur l'étude géologique.....	61
8.3. Prospection magnétique.....	62
8.3.1. Juin 1975. Campagne de reconnaissance.....	62
8.3.1.1. Préparation.....	62
8.3.1.2. Passage de la sonde.....	63
8.3.1.3. Résultats.....	63
8.3.1.4. Anomalies dues au filon.....	63
8.3.1.5. Extension du filon en direction.....	64
8.3.2. Septembre 1975. Prospection fine.....	64
8.3.2.1. Méthodes employées.....	65
8.3.2.2. Zone forestière.....	66
8.3.2.2.1. Description du terrain.....	66
8.3.2.2.2. Résultats de la prospection.....	66
8.3.2.2.3. Analyse du secteur 1.....	67
8.3.2.2.4. Analyse du secteur 3.....	68
8.3.2.2.5. Analyse du secteur 2.....	69
8.3.2.3. Zone d'alpage.....	69
8.3.2.3.1. Description du terrain.....	69
8.3.2.3.2. Résultats.....	69
8.3.2.3.3. Extension du filon en direction.....	70
8.3.2.3.4. Analyse de l'anomalie à l'Est de la zone.....	70
8.3.2.3.5. Essai d'interprétation rapide d'une carte magnétique.....	71
8.4. Conclusions.....	71
8.4.1. Proposition d'un modèle pour le filon de Noguillan.....	71

	<u>Pages</u>
8.4.1.1. Origine sédimentaire. Première minéralisation..	71
8.4.1.2. Fracturation, orientation des structures, deuxième minéralisation.....	72
8.4.2. Perspectives en vue d'une future prospection.....	73
8.4.3. Apport de la prospection magnétique sur ce site.....	73
 <u>CHAPITRE 9 : FILON DES ROGNIoux</u>	
9.1. Contexte géologique.....	76
9.2. Travaux antérieurs.....	76
9.3. Prospection magnétique.....	77
9.3.1. Préparation en laboratoire.....	77
9.3.2. Repérage des profils.....	78
9.3.3. Prélèvement des mesures magnétiques.....	78
9.3.3.1. Installation du matériel.....	78
9.3.3.2. Evolution de l'équipe mobile.....	79
9.3.3.3. Marche de l'appareillage.....	79
9.3.4. Résultats.....	79
9.4. Conclusion.....	80
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	81
<u>CONCLUSIONS POUR L'AVENIR</u>	85
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	88

INTRODUCTION

Automne 1973, le site de Saint-Georges des Hurtières en Maurienne, fit l'objet d'une campagne de prospection. On choisit d'étudier les anomalies magnétiques dues au complexe filonien riche en fer, de ce gisement. C'est ainsi qu'une équipe du groupe GAMCIS (division Magnétométrie du LETI, CEN Grenoble), entra en contact avec les problèmes miniers alpins. Très vite, les résultats obtenus s'avérèrent insuffisants face à l'étendue et à la complexité du gisement. Le principal défaut vint du manque de données magnétiques. Paradoxalement, un des atouts majeurs du magnétomètre utilisé réside dans son acquisition de données très rapide. Il nous faut incriminer plutôt la jeunesse de la méthode employée et l'hiatus entre tout phénomène naturel et son explication. Suite à ces problèmes, il se créa une collaboration entre H. DABROWSKI, de l'Institut Dolomieu à Grenoble, et le groupe GAMCIS.

Dans un premier temps, il fut décidé de l'étude de sites miniers alpins présentant un intérêt scientifique autant que méthodologique. Trois gisements furent prospectés : les amas de pyrrhotite de Saint-Léger (Maurienne), le filon à sidérite-blende de Noguillan (Maurienne) et le filon à galène-blende-chalcopryrite des Rognioux (Beaufortin).

La prise de mesures sur le terrain est obtenue par un appareillage mis au point par la division magnétométrie du LETI. Le dépouillement et l'interprétation sont facilités par une infrastructure informatique.

On procéda en outre à une amélioration des programmes préexistants et à l'élaboration de chaînes de programmes dans le but triple, de suivre l'évolution du matériel de prise de mesures, d'assouplir certaines contraintes auxquelles sont astreints les prospecteurs et de se diriger vers des problèmes d'interprétation.

chapitre 1

PRINCIPES FONDAMENTAUX DU MAGNETISME

1.1. CHAMP MAGNETIQUE

Le champ magnétique peut être créé soit par un aimant, soit par un déplacement de charges électriques.

1.1.1. Définition du moment magnétique

Les masses magnétiques m et m' , fictions mathématiques, sont définies par la force d'attraction ou de répulsion qu'elles exercent l'une sur l'autre :

$$F = c \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2} \quad (\text{Loi de Coulomb})$$

c étant une constante, r la distance entre les masses m et m' .

La masse magnétique attirée par le Nord est positive ($+m$). A l'opposé, on a une masse négative ($-m$).

Deux masses $+m$ et $-m$ séparées par une distance Δl forment un dipôle, sorte d'aimant élémentaire. Le moment magnétique d'un tel dipôle est :

$$\vec{M} = m \cdot \Delta\vec{l} \quad (\Delta\vec{l} \text{ est orienté de } -m \text{ vers } +m)$$

1.1.2. Champ magnétique créé par un aimant

Dans un repère Oxy (figure 1), un dipôle de moment M et centré sur O, crée en un point A (r, a) un potentiel magnétique :

$$U = \frac{\vec{M} \cdot \vec{r}}{r^3}$$

Le champ magnétique H dérive de U :

$$\vec{H} = - \text{grad } U$$

Ses composantes radiale et tangentielle sont :

$$H_r = \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{2M \cos a}{r^3} \quad ; \quad H_t = \frac{\partial U}{r \partial a} = \frac{M \sin a}{r^3}$$

1.1.3. Champ magnétique créé par un courant

Lorsque des charges électriques se déplacent, il se crée un courant de densité :

$$\vec{i} = \rho \vec{v} \quad (\rho \text{ est la charge par unité de volume, } v \text{ sa vitesse de déplacement})$$

Il apparaît alors un champ magnétique H satisfaisant à la loi de Maxwell-Ampère :

$$\vec{i} = \text{rot } H$$

1.1.4. Unités

Dans le système MKSA, l'unité du champ magnétique est l'Ampère par mètre. Traditionnellement, c'est le système CGS qu'on emploie : le champ magnétique a alors pour unités l'oersted et son sous-multiple le gamma.

$$1 \text{ oersted} = 10^5 \text{ gammas}$$

1.2. PROPRIETES MAGNETIQUES DE LA MATIERE

Tout corps, quelles que soient la pression et la température, manifeste des propriétés magnétiques : dans un champ magnétique externe, il présente une réaction. Il n'y a pas de corps amagnétique au sens étymologique du terme. En pratique, cette expression est utilisée pour désigner, à l'intérieur d'un contexte, une substance ayant une susceptibilité magnétique négligeable.

1.2.1. Intensité d'aimantation, susceptibilité magnétique

On définit l'intensité d'aimantation comme suit :

$$\vec{J} = \frac{d\vec{M}}{dv}$$

Une substance, placée dans un champ magnétique \vec{H} , acquiert une intensité d'aimantation \vec{J} :

$$\vec{J} = k\vec{H}$$

k étant la susceptibilité magnétique.

k rapporté à une unité de volume (1 cm^3), c'est la susceptibilité spécifique κ :

$$d\vec{M} = \kappa \cdot \vec{H} \cdot dv \quad (1)$$

k rapporté à une unité de masse (1 g), c'est la susceptibilité massique χ :

$$d\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \cdot dm \quad (2)$$

Si ρ est la masse volumique (g/cm^3) :

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho}$$

Comme le champ magnétique, l'intensité d'aimantation s'exprime en oersteds : k est un nombre sans dimension. Les relations (1) et (2) entraînent que κ est aussi sans dimension, alors que χ est donné en cm³/g.

L'induction magnétique qui caractérise un corps d'aimantation \vec{J} placé dans un champ \vec{H} , est :

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{J}$$

1.2.2. Moment magnétique à l'échelle de l'atome

1.2.2.1. Moment magnétique de spin

Les nucléons et les électrons tournent sur eux-mêmes et réagissent sous l'action d'un champ magnétique extérieur. Leur moment magnétique est inversement proportionnel à leur masse :

$$M_{\text{spin}} = \frac{e \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m} \quad (\text{e et m sont la charge et la masse, h est la constante de Planck})$$

Les protons et les neutrons ont des masses très supérieures à celle des électrons. Leur moment magnétique pourra être négligé en première approximation.

1.2.2.2. Moment magnétique orbital

Un électron tournant autour du noyau, crée un petit courant circulaire. Ce courant s'assimile à un dipôle magnétique de moment :

$$M_{\text{orbital}} = n \cdot \frac{e \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m} \quad (\text{n est un nombre entier})$$

Si une couche électronique est complète (liaisons ioniques, covalence, atome isolé), les moments des électrons s'annulent entre eux. Le moment magnétique d'un atome est dû alors aux couches internes incomplètes.

1.2.3. Diamagnétisme

Soumis à un champ magnétique, les électrons subissent des forces et de ce fait les orbites qu'ils décrivent s'en trouvent modifiées. Il se crée un moment magnétique extrêmement faible s'opposant au champ inducteur. Le diamagnétisme, dont la théorie revient à LANGEVIN, est un phénomène général de la matière. Il s'explique "par un mécanisme intérieur à la molécule, tout à fait indépendant de l'agitation thermique des molécules, et par suite de la température".

La susceptibilité des corps diamagnétiques est très faible ($\pm 10^{-6}$ u.é.m. CGS). Elle est indépendante du champ externe et de la température.

Exemples : Les gaz sauf l'oxygène, l'or, l'argent, le mercure, l'eau et de nombreux composés organiques.

1.2.4. Paramagnétisme

Pour observer le phénomène diamagnétique, il faut que l'atome contienne un nombre suffisant d'orbites, disposées avec une symétrie suffisante pour que son moment magnétique soit nul. A l'inverse, s'il existe une asymétrie dans la disposition des orbites électroniques et des spins des électrons, l'atome possède, outre la propriété diamagnétique, un moment résultant \vec{M} .

Un champ magnétique externe tend à aligner les moments des atomes, tandis que l'agitation thermique tend à les désordonner. A température normale, le champ inducteur cessant, les effets magnétiques disparaissent. La susceptibilité k est inversement proportionnelle à la température absolue T :

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (\text{Loi de CURIE})$$

C étant la constante de CURIE.

A température normale, χ varie entre 10^{-6} et 10^{-3} u.é.m. Un grand nombre de substances présentes dans les roches ont une susceptibilité de cet ordre.

1.2.5. Ferromagnétisme

Pour certains corps paramagnétiques, lorsque la température diminue, l'agitation thermique fait de même et le champ induit tendra à subsister quand le champ externe disparaîtra. Il y a apparition d'une rémanence.

Les interactions entre électrons d'atomes voisins peuvent être fortes et par un effet d'alignement, leur moment magnétique crée un champ interne WJ . C'est l'hypothèse de base de la théorie de WEISS.

On a alors :

$$J = \chi (H + WJ)$$

La loi de CURIE est modifiée :

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (T_c = WC \text{ est la température au point de CURIE})$$

Pour une température inférieure à T_c , on observe une aimantation spontanée J_s en l'absence de tout champ.

Un corps ferromagnétique est un corps paramagnétique qui s'aimante spontanément sous l'action de son propre champ interne.

Ces surprenantes propriétés magnétiques ne sont pas tant à chercher dans la nature des corps ferromagnétiques que dans une caractéristique physique commune : leur division en domaines de WEISS (figure 3a). Chaque domaine comprend un grand nombre d'atomes et possède une aimantation spontanée J_s orientée par le réseau cristallin, en l'absence d'un champ magnétique externe. Sous l'effet d'un champ \vec{H} croissant, les domaines dont l'aimantation se rapproche le plus de la direction de \vec{H} se développent aux dépens des autres (figure 3b), \vec{J}_s devenant progressivement parallèle à \vec{H} (figure 3c). Pour un champ \vec{H} suffisamment fort, l'aimantation, de microscopique qu'elle était, devient macroscopique et saturée. Il est à remarquer que l'agrandissement des domaines peut être gêné par des impuretés ou des défauts du réseau.

1.2.6. Ferrimagnétisme

Au lieu d'avoir un seul réseau de vecteur \vec{J}_s parallèle au champ externe, les corps ferrimagnétiques sont caractérisés par deux réseaux antiparallèles (figure 3d).

Les ferrites (Fe_2O_3 , MO) sont ferrimagnétiques. Pour la magnétite (Fe_2O_3 , FeO), le fer trivalent est aimanté dans les deux sens, le fer divalent dans un sens. L'aimantation bien connue de ce minéral est due au fer divalent (NEEL 1948).

1.2.7. Antiferromagnétisme

Si les deux réseaux antiparallèles se compensent exactement, le corps est antiferromagnétique (figure 3c). Au point de NEEL (équivalent du point de CURIE des ferro et ferrimagnétiques), la susceptibilité passe par un très fort maximum. De part et d'autre de cette température, elle devient très faible : la substance a des propriétés paramagnétiques.

Le fer trivalent étant aimanté dans les deux sens, l'hématite ($Fe_2O_3 \alpha$) devrait être antiferromagnétique. En réalité, les défauts du réseau et les impuretés de magnétite lui imprime un léger ferrimagnétisme. Il en est de même pour la limonite, l'ilménite et la pyrrhotite.

Remarque : Pour la suite, ces trois derniers types de substances seront regroupés sous le terme de substances ferromagnétiques.

1.2.8. Hystérésis

Pour les substances ferromagnétiques, l'aimantation est aussi fonction de l'histoire de l'échantillon. Un des phénomènes d'hystérésis est le suivant : à température constante, un échantillon placé dans un champ magnétique variant entre deux valeurs opposées (+ H_m) et (- H_m) (figure 2) (H_m est choisi tel que J_m soit voisin de l'intensité d'aimantation de saturation J_s), acquiert une aimantation rémanente J_r . Le champ induit subsiste alors, lorsque le champ inducteur disparaît. On l'appelle le champ rémanent.

1.2.9. Conclusion

Dans le contexte d'une prospection magnétique classique, l'effet d'un corps diamagnétique est quasiment nul. Si la substance est paramagnétique (J varie entre 1 et 100 gammas), le champ induit est parallèle au champ magnétique terrestre et provoque une faible anomalie. Dans le cas d'une magnétite ($J_s = 500$ oersteds), le champ rémanent a une orientation quelconque et peut aller jusqu'à provoquer une inversion du champ total sur une surface de dimension régionale (Mine de fer de Mauritanie, magnétite de Kiruna en Suède).

chapitre 2

MAGNETISME DES ROCHES

La matière, quelle que soit sa nature, possède des propriétés magnétiques. Pour une roche, c'est au niveau du minéral que l'on discutera. La nature d'un minéral, sa taille, son réseau, les déformations, les variations qu'il peut subir et enfin son pourcentage dans la roche sont autant de paramètres influençant son aimantation.

2.1. AIMANTATION DES MINERAUX

2.1.1. Nature du minéral

Les silicates sont soit paramagnétiques comme les olivines, les pyroxènes, la biotite, les grenats, les amphiboles, soit diamagnétiques comme le quartz et les feldspaths.

La calcite et la dolomite sont diamagnétiques.

Outre la pyrrhotite, les minéraux ferromagnétiques sont tous des oxydes.

A l'échelle ionique, Si, Al, Mg, Ca, Na, K, Ti, P ne possèdent pas de moment magnétique.

2.1.2. Susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique varie d'un minéral à un autre, mais aussi de façon notable pour un même minéral. Ainsi pour la blende, k varie de $-0,2 \cdot 10^{-6}$ à $519 \cdot 10^{-6}$ u.é.m. A. BETEKTINE (1968) note que les variétés ferrifères contiennent de fines inclusions de pyrrhotite. Celles-ci peuvent être responsables de la susceptibilité élevée d'un minéral considéré comme diamagnétique.

La mesure de la susceptibilité magnétique se fait sur un échantillon : C'est une mesure ponctuelle insuffisante pour être significative d'un minéral. Une bonne représentation de la susceptibilité d'un minéral consisterait à multiplier le nombre d'échantillons et à établir un histogramme des valeurs obtenues, suivi d'une étude statistique (écart type...).

Le tableau 1 récapitule très grossièrement des susceptibilités trouvées chez divers auteurs. Il révèle de grandes imperfections et l'aspect précis de certaines valeurs peut induire en erreur. La notion de minéral ne fait pas intervenir les caractéristiques magnétiques. Exceptionnellement, le pourcentage en fer associera des variétés d'un minéral à un changement des propriétés magnétiques : en reprenant l'exemple de la blende, la cléiophane est diamagnétique tandis que la marmatite possède une susceptibilité beaucoup plus élevée. D'autres facteurs, abordés un peu plus loin, engendrent des variations considérables de la susceptibilité pour un même minéral. Les valeurs du tableau 1 ne peuvent être prises comme données exactes pour l'étude d'un site, il ne faut voir ici que des ordres de grandeur.

2.1.3. Anisotropie magnétocristalline

Les caractéristiques magnétiques d'un minéral ferromagnétique dépendent de sa géométrie cristalline. Excepté quelques cas d'isotropie, les courbes (figure 4 a-b) montrent que le cristal s'aimante plus facilement selon un axe que selon les autres, et ceci en fonction de la nature de la substance.

On définit ainsi une anisotropie magnétocristalline.

- TABLEAU 1 -

Susceptibilités magnétiques des minéraux en 10^{-6} u.é.m CGS
tirées principalement de A.S. POVARENNYKH
G.I. KRUGLYAKOVA

Pour une raison pratique, les mesures sont rapportées à l'unité de masse.

<u>SILICATES :</u>		
Aegyrine..... 85	-Hornblende Fe.... 120	-Rhodonite..... 127
Amphibole Fe. 38 à 120	-Lépidolite..... 8,6 à 46	-Scapolite..... 2,5 à 2,7
Augite..... 130	-Muscovite..... 1 à 6	-Sphène..... 22,1
Béryl..... 0,68	-Orthose..... - 0,376	-Topaze..... - 0,42
Biotite..... 23 à 80	-Phlogopite..... 5 à 8	-Tourmaline.... 1 à 9
Braunite..... 120 à 145	-Pyrope-almandin.. - 11 à 124	-Tourmaline Fe. 22 à 31
Dioptase..... 8,8	-Pyrophyllite.... 0,0	-Zinnwaldite... 4,0
Epidote..... 23,9	-Pyroxène Fe..... 26 à 130	-Zircon..... 0,131
Grossulaire- andradite.... 13 à 93	-Quartz..... - 0,46	
<u>SULFURES :</u>		
Bismuthite... - 3,85	-Cinabre..... 0,2 à 1,9	-Marcasite..... 1,0 à 20
Blende..... 1,2 à 25	-Cobaltite..... 0,92	-Molybdénite... 8,5
Bornite..... 8,0 à 14	-Covellite..... - 0,20	-Pyrite..... 20 à 5300
Chalcocite... - 0,18	-Cubanite..... 400	-Pyrrhotite.... 15000 à 28000
Chalcopyrite. 0,4 à 200	-Galène..... - 0,35	-Stibine..... - 0,87
<u>ARSENIO-SULFURES :</u>		
Cobaltite.... 0,92	-Mispickel..... 3,3 à 8,0	-Orpiment..... 0,10
<u>ARSENIURES :</u>		
Niccolite.... 3,8 à 12		

- TABLEAU 1 (suite) -

<u>SULFATES :</u>		
Anhydrite.... - 1,6	-Celestite..... -0,338	-Mélantérite... 41,9
Barytine..... - 0,306	-Gypse..... - 1,0	
<u>OXYDES :</u>		
Cassitérite.. - 0,08	-Hématite..... 40 à 9860	-Manganite..... 51
Chromite..... 53 à 1200000	-Ilménite..... 113 à 140000	-Psilomélane... 270
Corindon..... - 0,34	-Limonite..... 100 à 200	-Pyrolusite.... 25 à 52
Franklinite.. 7000	-Maghémite..... 100 000	-Rutile..... 2,0
Goethite..... 21 à 25	-Magnétite..... 40000 à 2000000	-Spinnelle..... 0,62
Hausmanite... 58 à 1600	-Cristal de magnétite..... 6300000 à 24000000	-Jacobsite..... 25000
<u>CARBONATES :</u>		
Aragonite.... -0,41	-Dolomite..... 0,92	-Sidérite..... 56 à 300
Azurite..... 10,5 à 19	-Malachite..... 8,5 à 15	-Smithsonite... 1,4 à 2,2
Calcite..... - 0,377	-Rhodocrosite.... 138	
<u>CHLORURES :</u>		
Carnallite... - 0,6	-Halite..... - 1,8	- Sylvite - 1,2 à 1,0
<u>PHOSPHATES :</u>		
Apatite..... - 2,64	-Monazite..... 18,9	
<u>TELLURES :</u>		
Sylvanite.... - 1,2	-Mélonite..... 36	

- TABLEAU 1 (suite 2) -

<u>TUNGSTATES :</u>		
Ferrowolframite. 66 à 95	-Wolframite.... 240	
<u>FLUORURE :</u>		
Fluorine..... 0,285		
<u>ELEMENTS :</u>		
Argent..... - 0,21	-Diamant..... - 0,49	-Plomb..... - 0,12
Arsenic..... - 0,31	-Graphite..... - 6,2	-Soufre..... - 0,49
Bismuth..... - 1,35	-Or..... - 0,14	-Tellure..... - 0,31
Cuivre..... - 0,09		

2.1.4. Magnétostriction

L'aimantation d'un corps ferromagnétique est affectée par les déformations du cristal. Ce phénomène de magnétostriction, évolue différemment selon les axes cristallins (figure 5). Il agirait sur l'interaction des atomes composant le réseau.

2.2. AIMANTATION DES ROCHES

2.2.1. Aimantations rémanentes

L'aimantation des grains ferromagnétiques inclus dans la roche, dépend, en plus des caractères cristallins notés précédemment :

- du champ magnétique terrestre,
- de la température de formation des roches,
- des réactions chimiques ultérieures.

2.2.1.1. Aimantation rémanente isotherme (ARI)

Certaines roches (les laves par exemple) contiennent des grains extrêmement petits et ferromagnétiques. Leur division en domaines de WEISS, qui a pour effet de diminuer très nettement leur aimantation spontanée, est alors impossible. Il en résulte que leur champ coercitif (champ magnétique nécessaire à l'annulation de Js) est très élevé, de l'ordre de la centaine d'oersteds. Le champ magnétique terrestre ne peut modifier cette aimantation. A l'inverse, si la roche est grenue (granite), les grains auront leur champ coercitif très diminué. Placé dans le champ magnétique terrestre, elle acquiert une forte aimantation rémanente isotherme, fonction de log (t), t étant le temps. L'ARI, appelée plus particulièrement aimantation rémanente visqueuse, suit les directions du champ externe, en direction, sens et intensité.

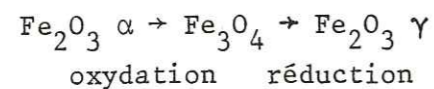
2.2.1.2. Aimantation thermo-rémanente (ATR)

Une roche se refroidissant (montée d'un magma), prend une aimantation thermo-rémanente proportionnelle au champ magnétique ambiant, d'une part, et au pourcentage de grains ferromagnétiques inclus, d'autre part. Elle est acquise entre la température au point de CURIE et une température inférieure T. Intensité et orientation sont fixées et restent stables au-dessous de T.

2.2.1.3. Aimantation rémanente chimique (ARC)

La transformation d'une roche, dans un champ magnétique externe, fait apparaître un minéral magnétique. Il se crée une aimantation rémanente chimique. Cette transformation peut être :

- une isomérisation : Hématite ($Fe_2O_3 \alpha$) → Maghémite ($Fe_2O_3 \gamma$)
- une dissociation : Pyrite (FeS_2) → Pyrrhotite ($Fe_{1-x}S$)
- une oxydation ou une réduction :



Ce dernier exemple illustre l'évolution des oxydes ferreux d'un sol (Leborgne 1960). Si ce sol est alternativement humide puis sec, ces réactions se produisent et entraînent une aimantation rémanente chimique croissante, proportionnelle au champ magnétique terrestre.

2.2.1.4. Aimantation rémanente détritique (ARD)

Lors d'un processus de sédimentation, les particules possédant un moment magnétique permanent \vec{M} se déposent, \vec{M} tendant à être parallèle au champ magnétique terrestre. La roche ainsi constituée, acquiert une aimantation rémanente détritique.

2.2.2. Susceptibilité magnétique des roches

La faible proportion de grains ferromagnétiques dans les roches leur confère dans le champ magnétique terrestre des susceptibilités proches de celles des substances paramagnétiques (tableau 2).

De manière schématique, le rapport passe de 100 pour un basalte, à 10 pour un granite, puis enfin à 1 pour un calcaire.

- TABLEAU 2 -

Susceptibilités magnétiques des roches en 10^{-6} u.é.m CGS

<u>ROCHES ERUPTIVES :</u>			
Basaltes :	680 à 16 000	- Diabases :	80 à 420
Gabbros :	440 à 4 100	- Diorites :	3 000
Dolérites et péridotites :	2 000	- Porphyres :	20 à 500
<u>ROCHES METAMORPHIQUES :</u>			
Serpentinites :	2 250 à 14 000	- Gneiss :	10 à 2 000
Ardoises :	40 à 3 000	- Schistes :	23 à 240
<u>ROCHES SEDIMENTAIRES :</u>			
Schistes :	40 à 50	- Grès :	0 à 200
Argilites :	20	- Dolomies :	1 à 15
Argilites Fe :	200	- Calcaires :	0 à 10
		- Anhydrite-gypse :	-2 à 10

chapitre 3

CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

Le champ magnétique mesuré en un point du globe est la somme d'un champ extérieur à la terre solide, faible et rapidement variable, et d'un champ interne plus intense et plus stable.

3.1. ELEMENTS DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

C'est le vecteur induction magnétique \vec{B} qui est mesuré, mais il est préférable de garder la notion de champ magnétique. En se fiant au système qui a tendance à se normaliser, on lui attribue la lettre T (Total field).

Le vecteur \vec{T} est repéré dans un système d'axes (Oxyz), Ox étant dirigé vers le Nord géographique, Oy vers l'Est et Oz vers le bas (figure 6), \vec{H} est la composante de \vec{T} dans le plan horizontal (Oxy) et \vec{Z} sa composante verticale. L'inclinaison I est définie par l'angle (\vec{H}, \vec{T}) , la déclinaison D par (\vec{Ox}, \vec{H}) .

3.2. CHAMP INTERNE

Le champ interne peut être assimilé à un champ créé par un dipôle de moment magnétique :

$$M = 0,311 R^3 \quad (R \text{ est le rayon de la terre})$$

On en déduit une intensité d'aimantation de 0,08 oersted, faible, comparée à celles des ferromagnétiques. Il produit un champ, appelé champ dipôle, variant entre 62 200 gammas aux pôles magnétiques et la moitié sur l'équateur magnétique. Leur position évolue dans le temps, ce qui se traduit par une variation séculaire de quelques gammas suivant le lieu.

En effectuant sur un grand nombre de points du globe la différence entre le champ magnétique observé et le champ dipôle calculé, il a été mis en évidence des "anomalies mondiales" de plusieurs milliers de kilomètres pouvant atteindre 20 000 gammas.

La présence dans la croûte terrestre de roches plus ou moins magnétiques, crée à la surface des anomalies du champ. Elles se limitent autour de leur source et n'ont pas une influence notable sur le champ magnétique à l'échelle du globe. Le champ magnétique créé par de tels phénomènes peut avoir une intensité comparable à celle du champ dipôle.

3.3. CHAMP EXTERNE

Le champ magnétique externe est lié à l'activité solaire : il est très variable. On distingue trois types de fluctuations de ce champ :

- les fluctuations diurnes peuvent atteindre 20 gammas dans la journée,
- les variations brusques de plusieurs dizaines de gammas sont assez exceptionnelles,
- la variation annuelle ne dépasse guère 10 gammas.

3.4. CHAMP GEOMAGNETIQUE

Compte tenu de tous ces phénomènes, le champ magnétique terrestre, qu'on appelle aussi champ géomagnétique, peut varier entre 25 000 et 75 000 gammas. Dans la région grenobloise, les caractéristiques du champ magnétique sont actuellement :

D = 6 degrés ; I = 63 degrés ; T = 46 000 gammas

chapitre 4

APPAREILS DE MESURE

La déviation d'une aiguille aimantée en fonction du champ magnétique ambiant permet de découvrir des gisements de magnétite à l'aide d'une simple boussole. Toujours en se basant sur cette propriété très concrète, des appareils plus sophistiqués furent mis au point dès le début du vingtième siècle et restèrent pendant 40 ans, l'outil essentiel de la prospection magnétique au sol. Depuis plus de 20 ans, deux autres principes servent de base à la conception de magnétomètres : pour les uns, la proportionnalité directe entre le champ magnétique et son flux, pour les autres, l'influence de ce champ sur les particules de l'atome.

4.1. DEVIATION DE L'AIGUILLE AIMANTEE

Les appareils à aimant ne mesurent qu'une seule composante du champ magnétique (Z ou H), soit par lecture directe, soit par un système de compensation.

4.1.1. Mesure directe

4.1.1.1. Balance de Schmidt

La balance verticale de Schmidt fut très utilisée en prospection minière (figure 7). L'aiguille aimantée est mobile autour d'un

axe horizontal O, passant au milieu de la ligne des pôles. Le centre de gravité légèrement décentré, maintient l'aiguille dans sa position horizontale. Positionnée par l'opérateur dans le plan du méridien magnétique, afin d'éliminer tout effet de la composante H, l'aiguille est soumise à un couple d'origine magnétique et est déviée d'une valeur angulaire α , proportionnelle à la composante verticale du champ ambiant.

Les balances sont sensibles à la température. Il est nécessaire d'évaluer la correction à chaque mesure. Outre sa faible sensibilité (5 gammas), les mesures sont ponctuelles et chacune prend au minimum 5 minutes. Elles nécessitent une mise en station de l'appareil pour chaque point de mesure et deux opérateurs ne sont pas de trop dans de telles opérations.

4.1.1.2. Balance magnétique de torsion

Le Q.H.M. (Quartz Horizontal Magnetometer) permet de mesurer la composante H du champ magnétique terrestre. Une aiguille aimantée de moment M, est fixée à un fil de quartz de coefficient de torsion c. Dans un premier temps, elle est placée selon le méridien magnétique, la torsion est alors nulle. On tourne le bâti de 2π , l'aiguille a tourné d'un angle b. On en déduit H par la relation :

$$H = \frac{2 \pi c}{M \sin b}$$

Le Q.H.M. mesure H à 1 gamma près. Son emploi est facile et plus rapide que le précédent (2 minutes par mesure). Son utilisation dans les régions septentrionales est limitée, étant donné que les effets magnétiques dus à H diminuent quand on s'approche des pôles.

4.1.2. Mesure par compensation

Le couple créé par l'effet d'un champ T sur une aiguille de moment M est :

$$c = \vec{M} \wedge \vec{T}$$

Afin d'amener ce couple à une valeur c_0 , on crée un champ T_0 en déplaçant un aimant tel que :

$$c_0 = \vec{M} \wedge (\vec{T} - \vec{T}_0)$$

C'est cette valeur T_0 qui est mesurée. Sur le terrain, ce système permet des mesures plus rapides.

4.2. FLUX MAGNETIQUE

L'exploitation des magnétomètres à "vanne de flux" (fluxgate) en prospection minière, démarra après son développement prometteur durant la seconde guerre mondiale comme engin de détection sous-marine.

Deux solénoïdes parallèles, sont chacun composés d'un noyau en mumétal (hystérésis vertical mince) et d'un bobinage primaire. Ils sont parcourus en sens inverse par un courant alternatif de fréquence f, dont l'intensité est telle que l'aimantation soit saturée deux fois par cycle. Un enroulement secondaire entoure les deux solénoïdes. Si le champ magnétique externe est nul, par raison de symétrie, le flux traversant le secondaire est nul. En présence d'une composante H_x du champ, selon l'axe de la sonde, les cycles d'hystérésis décrits dans les deux noyaux diffèrent et le flux total n'est plus nul : une force électromotrice de fréquence 2f apparaît aux bornes de l'enroulement secondaire. Par l'intermédiaire d'une autre bobine compensant cet effet, on mesure les variations de l'intensité du courant parcourant cette dernière et proportionnelles à la composante H_x .

Comme les précédents, cet appareil mesure une composante du champ. Son avantage réside dans le fait que l'opération n'est pas affectée par un mouvement mécanique.

En prospection au sol, il existe des magnétomètres à vanne de flux portable par un seul opérateur. Le noyau saturé nage librement selon une orientation verticale : c'est la composante Z que l'on mesure. Leur sensibilité est comparable à celles des balances. Une mesure prend une minute et est donnée directement en gammas. Des corrections en fonction de la température sont nécessaires, si on veut un travail précis.

4.3. RESONANCES NUCLEAIRE ET ELECTRONIQUE

Les magnétomètres basés sur le principe de la résonance électronique ou nucléaire, mesurent, tous, le champ magnétique total. La théorie en est complexe et ne sera donnée que de façon sommaire.

4.3.1. Principe général

La résonance magnétique est liée au paramagnétisme ordinaire. Les porteurs de moment magnétique de spin M et de moment cinétique I, placé dans un champ magnétique T, possèdent des sous-niveaux d'énergie. La variation de T entraîne des transitions entre ces sous-niveaux qui se traduisent par une émission ou une absorption d'un rayonnement électromagnétique de fréquence :

$$f = \frac{MT}{2 \pi \hbar I} \quad (\hbar \text{ est la constante de Planck})$$

Le rapport $g = \frac{MT}{\hbar I}$, appelé rapport gyromagnétique est une constante définie très exactement suivant le porteur. Il en résulte que la fréquence f, appelée fréquence de LARMOR, est directement proportionnelle au champ total T. Mesurer f revient, à un facteur constant près, à mesurer T.

Dans le champ magnétique terrestre, la séparation en énergie des niveaux est faible. Il en résulte une inégalité de population très faible, un nombre de transitions négligeable et un rayonnement électromagnétique à la fréquence de LARMOR techniquement indécélable. Afin de palier à ce problème, trois types de magnétomètres de prospection au sol ont été conçus :

porteurs = protons $\left[\begin{array}{l} - \text{ les magnétomètres à prépolarisation et précession libre,} \\ - \text{ les magnétomètres à polarisation dynamique,} \end{array} \right.$

porteurs = électrons $\left[- \text{ les magnétomètres à pompage optique} \right.$

4.3.2. Prépolarisation et précession libre

Avant une mesure, les protons sont polarisés dans un champ fort. Les niveaux sont alors largement écartés et les inégalités de

populations très prononcées. Ce champ fort est interrompu, seul persiste le champ terrestre. Les niveaux se rapprochent tandis que l'inégalité des populations subsiste un instant. Pendant ce laps de temps, la mesure entre les niveaux donne la fréquence de LARMOR, fonction du champ magnétique ambiant, et le signal obtenu est amplifié du fait de cette forte inégalité.

Ces appareils fonctionnent donc de manière discontinue. Ils ont une sensibilité de 1 gamma. Un opérateur suffit à leur maniement. Le magnétomètre à protons portable GEOMETRIX Modèle G-816 répond à ces caractéristiques.

4.3.3. Polarisation dynamique

Le magnétomètre différentiel à haute sensibilité réalisé par la division Magnétométrie du LETI, utilise le système de polarisation dynamique par un phénomène de double résonance (ABRAGAM 1961). Dans un liquide contenant protons et électrons, de l'énergie est fournie aux électrons. Il existe des transferts d'énergie entre électrons et protons, qui se traduisent par une augmentation très forte du magnétisme des protons. A des niveaux d'énergie, fonction du champ magnétique ambiant, est associée une inégalité de populations correspondant à un champ nettement plus fort. On retombe ainsi dans le type précédemment décrit à la différence que polarisation et mesure de la fréquence sont des phénomènes simultanés, d'où l'avantage d'un fonctionnement en continu. Le capteur associé à un amplificateur, constitue un filtre dont la fréquence est proportionnelle au champ magnétique à mesurer. Ce filtre peut piloter un oscillateur comme le ferait un quartz. L'ensemble oscillateur convertit de façon continue le champ en une fréquence.

Les variations du champ magnétique à mettre en évidence sont en général très faibles (quelques gammas) devant le champ géomagnétique (50 000 gammas). Etant donné le rapport direct entre champ et fréquence, il s'agit de mesurer celle-ci avec une grande résolution. La solution classique consiste à multiplier la fréquence puis à la compter pendant un temps relativement long. L'aspect discontinu d'un tel procédé empêche la mise en valeur concrète de la polarisation dynamique. Il a donc fallu concevoir un fréquencemètre propre aux problèmes posés, et qui peut mesurer soit un champ total soit directement la différence de deux champs.

4.3.4. Pompage optique

Le procédé par pompage optique a été inventé par A. KASTLER (1950). Il ne sera pas développé ici. Les radiations lumineuses créées par une modification du magnétisme des électrons passent à travers de la vapeur d'un élément (césium, rubidium, hélium métastable). La lumière transmise est détectée par une cellule photoélectrique.

Il existe un magnétomètre à vapeur de césium réalisé par "Varian Associates". Un seul opérateur manipule cet appareil. La sensibilité est de 0,1 gamma.

chapitre 5

UTILISATION DU MAGNETOMETRE DIFFERENTIEL A HAUTE SENSIBILITE SUR LE TERRAIN

5.1. REPARTITION DE L'APPAREILLAGE - CARACTERISTIQUES

La mesure différentielle est obtenue directement à partir de la mesure simultanée de deux valeurs de champ, en des lieux différents. Ce principe, ajouté à certaines contraintes matérielles, exige une répartition de l'appareillage en trois parties distinctes (figure 8) :

- une station de référence,
- une équipe mobile,
- une station de mesure et d'enregistrement.

5.1.1. Station de référence

Composée d'un capteur alimenté par batterie, la station de référence est positionnée de préférence dans un secteur n'ayant pas un gradient magnétique élevé. Dans le cas d'une zone filonienne à prospecter, elle sera fixée sur la roche encaissante. Ce capteur enregistre en continu le champ total qui varie dans le temps. Il permet d'éliminer ce type de variation.

5.1.2. Equipe mobile

Deux personnes sillonnent la zone prospectée. La première porte un capteur tandis que l'autre isole l'émetteur à 10 mètres de celui-ci pour éviter toute pollution magnétique. Le matériel mobile est alimenté par batterie. Le capteur est soumis au champ magnétique ambiant, variant dans le temps et dans l'espace. Il est relié dans la plupart des cas, par radio à la station de mesure, ce qui laisse une grande liberté de mouvement à l'équipe mobile.

5.1.3. Station de mesure

Soit le cas où il y a liaison radio entre les deux capteurs et la station de mesure. Deux mesures arrivent simultanément sur les récepteurs de télémesure. Le fréquencemètre effectue la différence entre ces deux valeurs, ce qui a pour effet d'éliminer les variations temporelles du champ magnétique et de restituer l'anomalie propre à la zone étudiée. La mesure différentielle est fournie à une perforatrice de bandes. Sur une baie de visualisation lumineuse s'inscrit cette même mesure. Enfin, un enregistreur graphique met en évidence les variations du champ.

L'alimentation est assurée par un groupe électrogène (220 V) ou par des batteries (24 V). L'opérateur qui dirige la réception et l'enregistrement des résultats, maintient une liaison radiophonique avec l'équipe mobile, dans le but d'acquérir les données topographiques.

5.1.4. Caractéristiques

- Mesures de champ (1 capteur): entre 30 000 gammas et 70 000 gammas.
- Mesures de différence de champs (2 capteurs): entre - 70 000 gammas et + 70 000 gammas.
- Sensibilité : 0,01 gamma.
- Température de fonctionnement : - 20 °C à + 50 °C.
- Cadence de sortie des mesures : 1 mesure ou 2/seconde.
- Alimentation : 12 V continu/8 W; station de mesure : 220 V alternatif ou 24 V continu/40 W.

- Poids : sonde (capteur + amplificateur) : 4 kg; ensemble émetteur : 5 kg; fréquencemètre : 11 kg.

5.2. METHODES D'INVESTIGATION

Le déroulement d'une campagne de prospection sur un site minier est soumis aux difficultés dues à la topographie, à la végétation, et aux contraintes de l'appareillage. Suivant la structure recherchée, la méthode d'investigation tiendra compte de ces divers paramètres.

5.2.1. Méthodes d'enregistrement

5.2.1.1. Enregistrement en profil continu

La prise de mesures continue le long d'un profil permet une évolution rapide. L'enregistrement des mesures se fait toutes les demi-secondes. Ainsi pour un profil de 120 mètres et une équipe mobile se déplaçant à 1 m/s, on obtient 241 mesures en deux minutes. La sonde est fixée horizontalement sur une claie à deux mètres du sol.

Si cette méthode est très indiquée sur un terrain facile, elle impose une forte préparation sous couvert forestier. La marche de l'équipe mobile doit être régulière et la sonde ne doit pas heurter d'objet, au risque de provoquer un effet parasite. Cela nécessite un passage libre sur 2,5 mètres de hauteur et accessible à des marcheurs.

Chaque repère (des piquets en général) est annoncé à l'opérateur de la station de mesure. Celui-ci provoque manuellement leur enregistrement sur la bande perforée et les inscrit sur le papier de l'enregistreur.

5.2.1.2. Enregistrement point par point

La prise de mesures point par point est utilisée sur des terrains empêchant une évolution continue le long d'un profil. La végétation et le relief en sont essentiellement les causes. Au niveau de chaque repère, la sonde est amenée en position stable pendant quelques secondes. Ce temps permet à l'opérateur de noter la mesure. Cette méthode ne crée pas de contrainte particulière dans le port de la sonde : celle-ci est transportée,

couchée au bout d'une perche et est hissée à 4 mètres à l'aplomb des repères. Cette hauteur de prise élimine une partie des effets superficiels en faveur des structures magnétiques plus profondes. Ainsi, l'échantillonnage des mesures n'a nul besoin d'être aussi dense que dans le cas précédent. On verra qu'une prise à 4 mètres sur un maillage de 5 m x 5 m donne des résultats convenables (paragraphe 8.3.2.2.). 25 mesures seront échantillonnées sur un profil de 120 mètres en plus de 10 minutes.

Une adaptation de l'ensemble capteur-amplificateur associé serait souhaitable afin de porter la distance sonde-sol à 5 ou 6 mètres.

5.2.2. Type de structure recherchée - Etude des paramètres

5.2.2.1. Profondeur de la source magnétique

Une des principales difficultés de la prospection au sol réside dans l'élimination des effets superficiels parasites. En se référant aux relations liant les composantes H_r et H_t du champ magnétique créé par un dipôle en un point et la distance r entre le dipôle et le point, on note que lorsque r augmente, le champ décroît en $1/r^3$ (paragraphe 1.1.2.). Un objet métallique produit à 2 mètres de la sonde un effet de 100 gammas. A 4 mètres, on enregistre plus que 12,5 gammas. 8 mètres au-dessous de cet objet, une structure minéralisée provoque dans le premier cas une anomalie de 100 gammas, dans le deuxième cas, une anomalie de 58 gammas. On voit l'intérêt d'éloigner la sonde de la surface du sol dans un cas pareil. Mais on se heurte très vite à des problèmes techniques et financiers.

En reprenant cet exemple, on note que les effets dus à la structure profonde, sont plus étendus que ne le sont ceux de l'objet métallique superficiel. En éliminant les anomalies de courtes périodes au profit des autres, le résultat obtenu est comparable à un éloignement de la sonde par rapport au sol. Cette méthode de filtrage, critiquable, est très employée en prospection magnétique par traitement informatique. Un exemple (figure 28 b) pris sur la zone prospectée du filon de Noguillan, montre qu'il est possible quelquefois d'effectuer ce filtrage uniquement par examen visuel d'une carte magnétique.

5.2.2.2. Volume et forme de la structure magnétique

Quand on peut assimiler une structure magnétique à un dipôle, le champ induit par cette structure est directement proportionnel à son volume (paragraphe 1.1.2. et 1.2.1.). L'éloignement des masses magnétiques $-m$ et $+m$ se traduit par une diminution de l'influence contradictoire de l'une par rapport à l'autre, et donc par une augmentation de la variation du champ magnétique. L'accroissement des surfaces "contenant" les masses magnétiques libres, crée aussi une augmentation du champ magnétique.

5.2.2.3. Intensité d'aimantation

Très souvent, en prospection magnétique, les paramètres recherchés sont d'ordre géométrique. C'est par approches successives et en accumulant un maximum de données au départ que l'on progresse vers des solutions. L'intensité d'aimantation est une de ces données. C'est une valeur intrinsèque de la structure recherchée. Comme a priori celle-ci n'est pas palpable, il faut envisager de raisonner sur des valeurs de J fausses. Afin d'obtenir une valeur approchée, on peut la déduire du champ magnétique créé par des échantillons dont on connaît tous les paramètres géométriques. Ces échantillons sont souvent pris sur la partie affleurante d'une structure minéralisée. La campagne de Saint-Léger (paragraphe 7.3.2.6.) a mis en évidence des propriétés magnétiques de la pyrrhotite très sensibles à l'altération météorique. Ainsi, si ces mesures présentent un intérêt certain, elles peuvent aussi induire en erreur.

chapitre 6

TRAITEMENT DES DONNEES PAR INFORMATIQUE

Une semaine de prospection permet l'acquisition de plusieurs dizaines de milliers de mesures magnétiques sur un terrain favorable. Le dépouillement de cette campagne fait appel à des opérations simples : conversion octal-décimal, échantillonnage systématique des valeurs de champ, interpolation d'autres valeurs... Il est évident qu'un travail comme celui-ci est très fastidieux, vu le grand nombre de mesures. L'emploi de l'ordinateur se justifie pleinement dans ce cas.

Le traitement s'effectue en trois étapes :

- le prétraitement
- le rendu des résultats
- l'interprétation

6.1. PRETRAITEMENT

A partir des données prises dans un format adapté à l'appareillage de mesure sur le terrain, on génère des valeurs dans un autre format adapté au traitement par ordinateur.

Suivant le type de prospection choisi, on distingue trois cas :

- profils rectilignes parallèles,
- profils en ligne brisée,
- mesures point par point.

6.1.1. Profils rectilignes parallèles

Sur le terrain, sont enregistrés par bande numérique :

- les valeurs de champ T (ou de différence de champs ΔT) prises à intervalle de temps régulier,
- les repères indiquant les début et fin de profils, et les marques topographiques rencontrées par l'équipe mobile.

A la station de mesure, l'opérateur introduit de la façon la plus automatisée possible, les coordonnées de ces marques. Dans le cas précis des profils rectilignes parallèles, celles-ci sont équidistantes. Il suffit donc de donner pour chaque profil, les coordonnées de la première marque et l'équidistance des repères. La zone prospectée devra au préalable être située dans un système d'axes (coordonnées LAMBERT par exemple) et être orientée par rapport au Nord magnétique.

On admet que l'équipe mobile se déplace à vitesse constante entre deux repères, le plus souvent distants de 10 mètres. Par interpolation linéaire, on transforme donc un ensemble de valeurs équidistantes dans le temps en un ensemble de valeurs équidistantes dans l'espace. L'équidistance est un paramètre du prétraitement à la disposition de l'opérateur. On peut corriger ainsi par le calcul, les différences de vitesse de déplacement qui ont nécessairement eu lieu (ralentissement dû à la traversée d'un ruisseau par exemple) au cours de l'ensemble de la prospection.

A l'issue du prétraitement les données de chaque profil se présentent de la façon suivante :

- Identification du profil (numéro),
- Coordonnées cartographiques du premier point,

- Equidistance des repères,
- Succession des valeurs T ou ΔT (en moyenne, 51 points pour un profil de 100 mètres).

Une évolution récente du matériel de terrain visait à l'alléger et à simplifier son alimentation (24 V continu sur batteries au lieu de 220 V alternatif par groupe électrogène). Parallèlement on a cherché à diminuer la quantité de bandes perforées générées, en adoptant un format plus compact. Les programmes de prétraitement ont été refaits puisqu'ils devaient traiter des données d'un format différent. Mais le principe et les étapes qui les acheminent vers un format de sortie commun restent les mêmes. Ce nouveau matériel a été utilisé pour la prospection du filon des Rognioux (paragraphe 9.3).

6.1.2. Profils en ligne brisée

Lors d'une reconnaissance rapide d'un site, les prospecteurs se déplacent le long de grands profils (paragraphe 8.3.1.). Une préparation de la zone à prospecter n'est pas forcément nécessaire, les repères pouvant être quelconques (maisons, pierriers, bosquets d'arbres...).

L'enregistrement des valeurs magnétiques et des repères est identique au cas précédent.

Entre deux repères, l'équipe mobile marche selon une ligne droite à vitesse régulière. Ici aussi le format sortie comportera une série de valeurs équidistantes dans l'espace, mais seulement entre deux repères. Par ailleurs, le maillage de la zone est tout à fait quelconque; il sera nécessaire de porter les coordonnées de chaque marque.

Les données prétraitées de chaque profil sortent suivant le format suivant :

- Identification du profil,
- Coordonnées de chaque repère,
- Equidistance des valeurs pour chaque segment,
- Succession des valeurs T ou ΔT .

6.1.3. Mesures point par point

Entre deux repères, aucune valeur n'est enregistrée. Lorsque le capteur se trouve à l'aplomb d'une marque, en position stable, la valeur est :

- soit relevée manuellement par l'opérateur,
- soit enregistrée sur bande numérique.

Les problèmes d'équidistance sont résolus d'avance : le maillage de la zone est régulier et le facteur temps n'intervient pas dans la prise des mesures. A l'aide d'un simple programme, on achemine ces données vers un format sortie identique à celui des profils rectilignes parallèles.

6.2. RENDU DES RESULTATS

Les résultats peuvent être présentés sous deux formes :

- le tracé de profils,
- la cartographie.

Jusqu'à présent, on a dû tenir compte du matériel informatique très peu puissant dont on dispose. Il est principalement limité pour trois raisons :

- l'unité centrale a une faible taille mémoire,
- la table traçante est analogique, donc peu précise, et ne peut effectuer des travaux que de petites dimensions (25 cm x 30 cm).
- il n'existe pas de mémoire de masse (bandes magnétiques ou disques).

Ces inconvénients amènent des contraintes qui ont pour objet de compliquer les programmes. On traite ainsi une campagne de mesures par secteur, que l'on juxtapose ensuite.

Le prétraitement a éliminé un certain nombre de mesures. D'autre part, les valeurs interpolées, par définition, n'ont pas été réellement mesurées sur le terrain. La visualisation des résultats par l'une des deux formes pré-citées ne sera qu'une image approchée de la réalité.

6.2.1. Tracé de profils

Dans un système d'axes rectangulaires où est porté d'une part le lieu des points mesurés, d'autre part la valeur ΔT (ou T), on obtient une évolution du champ magnétique suivant l'axe du profil.

Pour une zone prospectée suivant une maille régulière on dispose d'un réseau de valeurs. Il est possible d'y tracer un profil magnétique suivant une orientation favorable pour mettre en valeur telle anomalie. Il suffit que le profil ait une certaine densité de valeurs, pour être significatif (figure 9).

Le tracé en ligne brisée, est limité au seul parcours emprunté par l'équipe mobile (figure 25). Ce trajet sert de référence aux variations de ΔT (ou de T). Afin de recaler les anomalies sur un fond topographique, les repères sont matérialisés par des croix.

6.2.2. Cartographie

La cartographie magnétique consiste à tracer des lignes équichamp, appelées isogammes.

Le programme disponible actuellement est capable de tracer une carte magnétique à partir d'une maille régulière. Pour qu'un tel travail soit significatif, il est nécessaire que les secteurs à tracer aient une densité de points mesurés minimale. Dans le domaine minier, pour une prise de mesure à 2 mètres (maille de 5 m x 2 m), la densité est de 1071 points par hectare (figure 33b), pour une prise à 4 mètres (maille de 5 m x 5 m), 441 points par hectare (figure 28 b).

6.2.3. Intérêt du lissage par doublage

Après le prétraitement, par l'artifice que constitue l'interpolation de valeurs en fonction de quatre points linéaires, on augmente la densité de points d'une zone prospectée. Si on effectue des doublages suivant la direction des profils d'une part et entre ces profils d'autre part, on obtient un effet de lissage sur les profils magnétiques et sur les isogammes (figure 10).

Entre les profils, le doublage apporte une information supplémentaire, quoique artificielle. Mais il peut paraître aberrant à première vue d'augmenter le nombre de points suivant les profils si ceux-ci ont été effectués par méthode continue. En fait, l'opérateur choisit le nombre de valeurs à prélever le long du profil dans la phase de prétraitement (paragraphe 6.1.1.), en fonction des dimensions de la structure recherchée. Ceci a pour effet de filtrer les anomalies suivant leur période (paragraphe 5.2.2.1.).

6.2.4. Travail sur de petits secteurs

Si on veut étudier une anomalie localisée dans un petit secteur, il est possible d'extraire totalement les données qui s'y rapportent.

6.3. INTERPRETATION DES RESULTATS

Un volume de matière aimantée uniformément est une structure magnétique tridimensionnelle. La perturbation magnétique associée est une notion spatiale. Dans un plan, les isogammes sont des courbes resserrées au voisinage du corps, traduisant généralement un effet positif (bosse), puis négatif (creux).

Dans certains cas, fréquents en géologie, la structure peut être définie par sa section (filons, compartiments faillés). La structure est dite cylindrique et les effets magnétiques déterminés dans le plan de la section, se conservent par translation. Les structures tridimensionnelles s'apparentent parfois à des structures cylindriques d'extension limitée. A égale distance des sections limites, les effets sont peu différents du cas théorique illimité si cette distance atteint deux fois la plus grande dimension de la section.

Les effets d'une structure magnétique sont très sensibles suivant ses dimensions et sa position dans l'espace. On verra l'influence de ces divers paramètres dans l'étude du gisement de Saint-Léger - Champfiard (paragraphe 8.3.2.2.4.). Ainsi, des profils magnétiques de même allure peuvent être l'effet de corps magnétiques de formes différentes. C'est à ce niveau qu'intervient l'étude géologique.

Actuellement, deux programmes d'interprétation sont opérationnels : CUBMAG et CYLMAG. Ils calculent les variations du champ magnétique d'une structure magnétique et les restituent sous forme de profils. CUBMAG opère sur des structures tridimensionnelles et ne peut travailler que sur un plan horizontal. CYLMAG prend en compte un profil topographique quelconque dont les effets se superposent à ceux de la structure minéralisée, considérée comme cylindrique dans ce cas.

6.4. CONCLUSION

Après un apprentissage des rudiments du FORTRAN, la mise au point des programmes (figure 11) s'est répartie sur six mois. Il n'a été traité que des problèmes de dépouillement et de représentation des données de terrain. Les diverses chaînes de programmes créées ont pour objet :

- l'adaptation de l'infrastructure informatique au nouvel appareillage,
- la reconnaissance rapide d'un site,
- l'évolution des prospecteurs sur des terrains difficiles,
- l'amélioration du rendu des résultats,
- la mise en évidence et l'isolement d'anomalies présentant un intérêt.

INTRODUCTION AUX CAMPAGNES DE PROSPECTION MAGNETIQUE DANS LE MASSIF DE BELLEDONNE

Les trois sites étudiés au cours de ce travail, se situent dans le massif de Belledonne qui s'étend entre Grenoble et Alberville, sur une centaine de kilomètres. Les gisements de Saint-Léger et de Noguillan sont sur la rive gauche de l'Arc à proximité du village d'Epierre. Le filon des Rognioux où se déroula la troisième prospection se trouve dans la partie septentrionale de la chaîne de Belledonne (massif du Beaufortin), sur le flanc Nord-Est du Grand-Mont.

L'étude pétrographique grandement entamée par C. BORDET (1957) donne les éléments de base à toute investigation minière. Il n'y a pas à revenir sur cette étude en détail. Simplement, on distinguera :

- deux séries primaires métamorphiques, l'une à caractère basique d'origine volcano-sédimentaire au SE, l'autre à caractère acide d'origine sédimentaire, au NW, recoupées par des intrusions granitiques,

- une série sédimentaire secondaire bordant au Nord les séries primaires.

Les principales directions tectoniques sont sensiblement parallèles à l'axe de la chaîne. Son évolution structurale ne sera abordée que dans un cadre local.

La carte magnétique de France au 1/1 000 000, seul document relatant des données magnétiques sur la chaîne de Belledonne n'a pas été un instrument de travail (à une exception près) n'étant pas en rapport immédiat avec les diverses études effectuées (altitude de vol, échelle).

L'étude des indices de pyrrhotite de Champfiard Saint-Léger a été menée comme suit :

- Campagne de mesures,
- Traitement et rendu des résultats,
- Interprétation par modèles théoriques.

Ces modèles, calculés en fonction des observations géologiques, ont permis d'analyser les effets dus :

- à la structure minéralisée comme sa nature, son pendage, sa puissance, son extension en profondeur, son orientation.
- au relief et plus particulièrement à la pente des profils et à ses variations brutales.
- à la distance point de mesure - source magnétique.

Les prospections successives du filon de Noguillan ont été menées de façon moins théorique. Le but principal était l'extension du gisement. Le faciès du minerai, la géométrie de l'affleurement amena tout naturellement, mais non sans quelques hypothèses au départ, à replacer ces minéralisations dans le contexte structural de la chaîne des Hurtières.

Les difficultés dues au terrain et à la végétation, très variables suivant le site, entravent les prospecteurs dans leur progression. Diverses méthodes sont mises au point à force d'expériences et si les phénomènes naturels de toutes sortes peuvent être contraignants, il est possible quelquefois d'en tirer certains avantages. C'est le cas du filon des Rognioux, où la campagne de mesures se déroula sur terrain enneigé.

chapitre 7

AMAS DE PYRRHOTITE DE CHAMPIARD SAINT-LEGER

Carte IGN : La Rochette 5-6

A	x = 908,420	y = 356,990	z = 436
B	x = 908,230	y = 356,830	z = 540
C	x = 908,180	y = 356,820	z = 547

Commune de Saint-Léger

Sur la rive gauche de l'Arc, à 1500 mètres au SW du village d'Epierre, ont été repérés trois indices minéralisés A, B et C. Ils s'alignent sur 400 mètres dans une pente moyenne de 40 degrés sous le hameau de Champfiard, en forêt.

7.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE (figure 12)

La pyrrhotite, massive, semble se présenter sous forme d'amas. A l'affleurement, sa puissance ne dépasse pas 4 mètres. L'altération en surface est très poussée, ce qui donne aux indices une couleur jaune caractéristique. Associée à la pyrrhotite, la chalcopirite apparaît en proportion non négligeable.

P. COURT (1971) observe que "les épontes sont soulignées par du quartz écrasé,...". L'examen de l'indice C montre bien une mise en place de ces amas à la faveur d'une fracture SW - NE pentée 45 W. Cette structure est marquée par une paroi rocheuse se développant vers le Sud. Au Nord, les indices B puis A entrent dans une zone d'éboulis et de roches fauchées, sur une pente régulière, et s'alignent suivant une direction SW - NE.

Tout ce secteur minéralisé est situé dans le granite d'Epierre, terminaison orientale du massif granitique des Sept-Laux. C. BORDET (1957) décrit cette roche comme suit : "granite leucocrate... structure grenue nettement cataclastique".

Toutes ces observations sommaires marquent les relations étroites existant entre les amas minéralisés et les structures tectoniques régionales. Mais là n'est pas le but de l'étude qui va suivre. C'est plutôt sur une analyse des effets magnétiques en fonction des variations topographiques et pétrographiques que le problème fut abordé.

7.2. PROSPECTION MAGNETIQUE

7.2.1. Janvier 1975 - Campagne de prospection

7.2.1.1. Préparation

La zone étudiée étant très accidentée, le travail de préparation fut orienté vers une méthode point par point. 20 profils, d'une centaine de mètres chacun, furent implantés transversalement à un axe minéralisé SW - NE supposé (figure 12). 400 repères, à raison de un tous les 5 mètres nécessitèrent 4 jours de travail à 2 personnes, avec un hectomètre et une boussole. Le levé topographique de la zone, effectué au RDS Wild et au To Wild prit deux journées.

7.2.1.2. Passage de la sonde

Les premières mesures furent prises en méthode différentielle. Les fluctuations importantes enregistrées par la sonde de référence et dues à la proximité d'une ligne de chemin de fer alimentée en courant continu, empêchaient toute réduction. D'autre part, l'importance de l'anomalie

associée à l'indice C (supérieure à 100 gammas) par rapport à la variation au cours du temps du champ magnétique, a permis de renoncer aux mesures différentielles.

La sonde mobile est portée verticalement, à deux mètres du sol. La station de réception est installée en rive droite de l'Arc, 200 mètres avant d'arriver au hameau du Colombet. La campagne a duré 3 jours.

7.2.2. Résultats

Les données de terrain sont traitées de façon à visualiser les profils un par un dans un système d'axes rectangulaires (Ox, Oh); Ox étant l'"axe topographique", Oh l'"axe magnétique" (figure 13). Le maillage de la zone est irrégulier : on ne peut élaborer une carte d'isogammes à partir des données de terrain. On utilise alors le programme restituant les profils en ligne brisée sur carte topographique (figure 14).

7.2.2.1. Analyse des profils 187, 22, 1 (figure 13 b.i.j)

A l'affleurement, l'indice A est plus gros que B et surtout C. Or, il s'avère que l'amplitude associée à A ne dépasse pas 50 gammas, tandis que B et C créent respectivement des anomalies de 260 et 190 gammas. Deux arguments au moins peuvent expliquer ce phénomène paradoxal :

- L'altération météorique a profondément pénétré dans l'amas minéralisé A, du fait qu'il est en relief dans la pente à l'inverse de B et de C. La pyrrhotite s'est alors décomposée en limonites, et a perdu sa forte aimantation.

- Si le volume de A est assez bien défini, les volumes de B et de C sont hautement hypothétiques. Dans ce cas, il est permis de penser que les anomalies dues aux minéralisations A, B et C sont en rapport direct avec leur volume. Cette deuxième explication n'a pas l'avantage d'être vérifiée comme la première, sur le terrain, mais aucune observation, a priori, ne va contre.

L'anomalie du profil 1 à l'aplomb de C, est la résultante des effets topographiques et de l'amas minéralisé. De plus, les déblais d'un grattage provoquent des fluctuations importantes en aval de l'affleurement.

Le profil topographique 22 au-dessus de l'affleurement B, n'est pas accidenté. Une telle pente ne peut engendrer qu'une variation linéaire du champ magnétique en supposant que la nature pétrographique ne varie pas. Par déduction, l'anomalie impaire enregistrée à proximité de B peut être uniquement due à la pyrrhotite. L'analyse du profil 187 à proximité de A amène à la même conclusion.

7.2.2.2. Analyse des profils 228, 103, 124, 254, 290, 311, 332, 145 (figure 13 e-l-m-n-q-r-s-d)

A l'exception du profil 145, ces profils marquent tous un point commun : une anomalie positive à l'aplomb d'une brusque augmentation de la pente, en progressant vers l'Ouest. Sur le profil 228, l'anomalie associée à un muret de 1,5 mètre atteint 70 gammas. A proximité de pentes très raides, atteignant parfois la verticale sur une dizaine de mètres, l'amplitude atteint plusieurs centaines de gammas : c'est le cas des profils 103, 124, 254, 290. Ce relief s'adoucit au sud : les anomalies des profils 311 et 332, quoique aussi étendues que les précédentes, ne dépassent pas 100 gammas.

Toutes ces ruptures de pente ont une extension horizontale supérieure à 10 mètres. Au niveau du profil 145, un escarpement rocheux n'a pratiquement aucun effet sur le capteur. Cette structure topographique est en fait très limitée dans l'espace, à la différence des précédentes.

En conclusion, l'augmentation brutale de la pente en progressant vers l'Ouest, semble se traduire par une forte augmentation du champ magnétique.

7.2.2.3. Analyse du profil 268 (figure 13 p)

On note à l'aplomb d'une rupture de pente importante, une augmentation du champ magnétique interrompue brutalement par une anomalie impaire très forte. Les deux hypothèses précédentes apportent une explication simple à ce phénomène : une anomalie provoquée par une structure minéralisée, masque l'effet topographique de moindre amplitude.

Au niveau du repère 285, on observe un filon de quartz de 50 centimètres de puissance. Il se peut qu'il corresponde à une éponte d'un amas responsable des 1300 gammas d'amplitude.

7.2.2.4. Analyse des profils 213, 187, 166, 145, 82, 61, 40
(figures 13 a-b-c-d-f-g-h)

Les variations du champ magnétique enregistrées dans la partie NE de la zone prospectée n'excèdent pas quelques dizaines de gammas. Mis à part le profil 187, elles ont comme cause unique et apparente, la topographie : une augmentation de la pente entraîne un accroissement du champ magnétique et vice versa.

Par ailleurs, on note une tendance générale des profils magnétiques vers une diminution du champ total lorsqu'on s'éloigne vers le NW. En établissant une moyenne arithmétique à partir des profils 213, 187, 166, 145, 82, 61, 40, on obtient une décroissance de 30 gammas pour une progression de 100 mètres vers le NW. Cette variation peut s'inscrire dans le cadre d'une anomalie régionale. La carte magnétique de France met en évidence une anomalie centrée sur le col du Glandon. Au-dessus d'Epierre, son effet décroît de 0,1 gamma par centaine de mètres en allant vers le NW. Compte tenu des conditions de prise de mesures très différentes (altitude de prise : 5000 mètres, parcours de l'avion horizontal), il est intéressant de remarquer que les gradients ont le même signe. Conclure qu'il y avait une relation directe entre l'anomalie du col du Glandon et la décroissance du champ total observé à 2 mètres du sol, à Saint-Léger, serait très hasardeux.

Le contact entre le granite d'Epierre et les schistes de la série verte, situé à quelques centaines de mètres de la zone prospectée, crée probablement des effets magnétiques. La relation entre ces effets et la décroissance de T n'est pas impossible.

7.2.2.5. Analyse de la carte de profils magnétiques (figure 14)

Les effets magnétiques de fortes amplitudes sont distribués à partir de l'indice B, le long de l'escarpement rocheux en allant vers le Sud. Celui-ci disparaît au-delà du profil 332 ainsi que les grandes anomalies.

Une ligne droite N55 joint les indices A et B :

- au niveau du profil 145, elle correspond exactement à la rupture de pente,

- elle passe à l'aplomb de l'anomalie impaire du profil 268,

- immédiatement à l'Ouest de cette ligne, on constate un accroissement du champ magnétique total, quoique très limité dans le secteur Nord.

Les ruptures de pente, très brutales entre les profils 1 et 290, et celle du profil 145, s'alignent aussi dans l'ensemble suivant une direction N55. Elles sont accompagnées de roches mylonitisées, altérées, riches en oxydes de fer, en chlorites et en quartz. Les mesures des plans de fracture oscillent entre N30 et N60 avec un pendage Ouest qui tend vers la verticale au sud. C'est le rejet du compartiment NW vers le haut qui provoque la rupture de pente et de ce fait l'anomalie positive. Sur les profils du secteur Nord, l'accroissement peu accusé du champ à l'Ouest de la ligne N55 serait peut-être dû au même phénomène, le rejet étant beaucoup plus faible. Une couverture d'éboulis et de roches fauchées empêche de vérifier cette hypothèse.

Les anomalies impaires sont au nombre de 4. Deux d'entre elles sont voisines, les deux autres sont isolées. Cela confirme assez bien la notion d'amas minéralisés le long d'une zone de fracturation intense. L'indice A provoque des effets sur le profil 187 uniquement. 15 mètres plus au sud, l'anomalie a pratiquement disparu. Le capteur a enregistré suivant le profil 22, des effets magnétiques importants à proximité de l'affleurement B. Par contre, le profil 40 n'est nullement affecté par une variation de champ du même ordre. A priori, la corrélation entre les profils 1 et 22 est possible, mais l'observation du terrain montre qu'il n'existe pas de continuité entre les amas B et C. Enfin, l'amplitude de 1300 gammas acquise à l'aplomb du repère 285 n'est pas réitérée sur le profil 290.

7.2.2.6. Conclusions sur l'analyse des résultats

S'il est quelquefois possible avec les moyens dont on dispose dans cette étude de se faire une idée de la géométrie du gisement, les caractéristiques magnétiques intrinsèques des roches en présence demeurent totalement inconnues. On ne peut donc attribuer un caractère de loi physique aux observations précédentes. Mais, par ailleurs, elles sont issues de phénomènes concrets, géologiques et magnétiques, et doivent servir de référence à toute démarche interprétative.

7.3. ESSAI D'INTERPRETATION PAR MODELES (paragraphe 6.3.)

La présence de minéralisations en amas incite à utiliser le programme CUBMAG relatif aux structures tridimensionnelles, mais celui-ci ne travaille que sur terrain horizontal. Une structure cylindrique (figure 15) de 1 m x 1 m avec une aimantation $J = 10$ gammas crée des anomalies très différentes selon l'inclinaison du profil par rapport à l'horizontale. L'équipe mobile a travaillé dans un terrain à 45 degrés. Ces différentes courbes montrent bien qu'on ne peut absolument pas approximer la zone des profils à un plan horizontal dans le but d'utiliser CUBMAG. Dès lors, il sera impossible de construire des modèles reproduisant fidèlement la structure réelle des amas, à l'aide du programme CYLMAG.

Par contre, les éléments topographiques tel que le muret au niveau du profil 228, la grande rupture de pente au sud de l'indice B, ont une dimension transversale au profil assez grande pour qu'ils soient assimilés à des structures cylindriques.

7.3.1. Interprétation des anomalies paires

Précédemment (paragraphe 7.2.2.2.), on a attribué à l'effet topographique une forte augmentation du champ magnétique. Cela suppose que de part et d'autre des ruptures de pente, la roche possède une aimantation uniforme.

La structure (figure 16) symbolisant une rupture de pente provoquée par le muret de soutènement, au niveau du profil 228, a une susceptibilité apparente de 10^{-3} u.é.m, possible pour un granite. Son effet est calculé le long du profil en pointillé, semblable au profil 228. On obtient une anomalie paire positive, où les variations du champ et de l'extension des effets sont respectivement du même ordre de grandeur. Ce modèle est très discutable et peut faire l'objet d'une critique fondamentale : un corps de 1,5 mètre ne peut être raisonnablement décrit par un profil point par point dont les mesures s'échelonnent tous les 5 mètres, pour une hauteur de prise de 2 mètres, et cela surtout si la zone prospectée comporte des gradients élevés comme c'est le cas ici. Entre deux points de mesure, les valeurs sont interpolées, ce qui donne à la courbe un aspect de profil continu. Sur le terrain, au même endroit, le champ magnétique peut varier tout autrement.

Etant donné les conditions de mesure, pour avoir une visualisation correcte des anomalies, il faut que les structures correspondantes créent des effets se faisant ressentir sur plusieurs dizaines de mètres.

Il faut alors envisager l'étude de structures plus importantes telles que les ruptures de pente brusques à l'aplomb des profils 124, 254, 290, 311, 322 (figures 13 m-n-q-r-s). En supposant que la roche soit identique sur tout le profil, on obtient pour tous les modèles une anomalie paire positive de même ordre de grandeur que les résultats in situ. Toutefois ceux-ci, pour une même extension de l'anomalie, ont une plus grande amplitude. Pour expliquer ce phénomène, on peut avancer l'hypothèse suivante. Une faille suppose, par définition, un déplacement relatif des deux compartiments. La littérature (paragraphe 2:2.2.) fait état de variations très sensibles de l'aimantation mesurée sur des échantillons, en fonction du lieu de prélèvement. Les anomalies des profils 124, 254, 290, 311, 332 peuvent être causées alors par la résultante d'un effet topographique et d'un effet dû à un changement des propriétés magnétiques de part et d'autre de la zone faillée, changement provoqué par une variation du pourcentage en grains ferromagnétiques (la pyrrhotite en l'occurrence). L'argumentation géologique est insuffisante et les mesures d'aimantation sur échantillons inexistantes, pour pouvoir bâtir un tel modèle.

7.3.2. Interprétation des anomalies impaires

Le levé géologique (figure 14) des amas de pyrrhotite ne permet pas d'extrapoler en profondeur leur volume et leur position. Il indique toutefois que les amas semblent s'étirer selon une direction SW - NE, le long d'une faille inclinée vers l'Ouest entre 40 degrés et la verticale.

Les valeurs enregistrées sont fonction d'un grand nombre de paramètres physiques. Afin de caler les courbes (figure 13) sur certaines structures, on fera varier successivement :

- la puissance des amas,
- l'extension en profondeur,
- le pendage de la minéralisation,
- la distance entre la sonde et le sommet de l'amas.

La variation du champ magnétique est directement proportionnelle à l'intensité d'aimantation J . Pour une variation de J , la forme globale d'une anomalie ne changera pas. On attribue donc à l'aimantation une valeur arbitraire $J_1 = 600$ u.é.m équivalent à une susceptibilité de 6.10^{-3} u.é.m, possible pour une pyrrhotite. Les modèles sont construits dans une roche encaissante d'aimantation $J_2 = 100$ u.é.m. Le contraste résultant sera :

$$DJ = J_2 - J_1 = 500 \text{ u.é.m}$$

Pour ne considérer que les effets dus aux minéralisations, le profil topographique est considéré comme rectiligne. Il est orienté à 60 degrés vers l'Ouest avec une inclinaison de 45° vers le SE.

7.3.2.1. Phénomènes magnétiques au niveau des amas

L'anomalie créée par une structure est due uniquement aux masses magnétiques situées à sa périphérie (figure 17 a). La densité magnétique σ à la surface de la structure est égale à J_n (J_n est la projection de l'aimantation \vec{J} sur la droite portant \vec{n} , vecteur normal aux faces du corps). Les lignes de champ entrent par les faces 2 et 3, sortent par les faces 1 et 4. Les masses négatives ont une densité forte sur 2, moins forte sur 3.

Les masses positives ont une densité forte sur 4, moins forte sur 1. Si on considère une masse négative isolée dans un champ magnétique \vec{T} (figure 17 b), l'effet créé sera soit une augmentation de \vec{T} (position A), soit une diminution (position B). L'effet est inverse pour une masse positive. En conséquence, pour les modèles établis suivant les conditions précédentes, les masses négatives donneront uniquement des anomalies positives, les masses positives uniquement des anomalies négatives.

7.3.2.2. Puissance de l'amas (figure 18)

La structure .1. a une épaisseur de 6 mètres. Son extension en profondeur est limitée à 7 mètres. L'anomalie impaire créée, est de la même forme que celles enregistrées sur le terrain : du SE vers le NW, le champ magnétique passe par un minimum puis par un maximum.

Une augmentation de l'épaisseur se traduit au niveau des points calculés par trois phénomènes :

- Les valeurs extrêmes s'éloignent de la valeur moyenne.
- L'anomalie s'étend.
- Les angles a et b augmentent, d'où une augmentation des gradients $dT_{min}/dx = tg a$ et $dT_{max}/dx = tg b$.

La structure .2. a une épaisseur plus faible que la précédente. Les masses magnétiques de signes opposés se rapprochant, l'effet des masses négatives est contrarié par celui des masses positives et vice versa. Cela a pour conséquence la diminution de l'amplitude d'une part et des gradients dT_{max}/dx , dT_{min}/dx , d'autre part.

Inversement, si la distance entre les deux pôles est très grande comparativement à la distance structure - point calculé, les gradients dT/dx tendent vers l'infini et l'amplitude atteint une valeur limite où l'influence d'un pôle sur un autre est nulle.

7.3.2.3. Extension en profondeur de l'amas (figure 19)

La puissance de la structure minéralisée est fixée à 9 mètres. Elle est inclinée à 45 degrés vers le NW. Son extension en profondeur est limitée à 8 mètres (1^{er} cas), puis à 16 mètres (2^{ème} cas) et enfin à 25 mètres (3^{ème} cas). Cette progression engendre une faible augmentation de l'amplitude, une extension de l'anomalie et une diminution des angles a et b, donc des gradients dT_{min}/dx et dT_{max}/dx .

L'extension en profondeur de l'amas revient à agrandir les faces 3 et 1 (figure 17 a) : leurs effets se ressentent plus loin, de part et d'autre de la structure. Dans un même temps, l'influence contradictoire des masses négatives sur les masses positives et vice versa, augmente : les variations dT_{min}/dx et dT_{max}/dx sont moins brutales pour une extension en profondeur plus grande.

La structure .2. est deux fois plus grande que la structure .1., tandis que l'amplitude extrême n'augmente que de 20 % : la variation essentielle du champ magnétique est provoquée par la zone minéralisée la plus proche de la sonde.

7.3.2.4. Pendage de l'amas (figure 20)

La structure prend trois positions : verticale (1^{er} cas), 45°NW (2^{ème} cas) et horizontale (3^{ème} cas).

L'angle a augmente, l'angle b diminue : la courbe perd sa symétrie. Le gradient dT_{max}/dx devient plus faible tandis que dT_{min}/dx croît. La structure déversée vers le NW, étend ses effets dans la même direction.

7.3.2.5. Distance entre la sonde et l'amas (figure 21)

La partie supérieure de la structure magnétique est successivement placée à 2 mètres (1^{er} cas), 7 mètres (2^{ème} cas), 12 mètres (3^{ème} cas) et 17 mètres (4^{ème} cas), du tracé fictif de la sonde. Cet éloignement se traduit par une diminution rapide de l'amplitude extrême et par une extension de l'anomalie (paragraphe 5.2.2.1.).

7.3.2.6. Interprétations des profils 22, 1, 268 (figures 13 i-j-p)

Il est illusoire de penser qu'arrivé au terme de cette étude, il soit permis de tracer la forme réelle des structures minéralisées : d'une part le programme d'interprétation CYLMAG n'est pas tout à fait adapté à l'étude du site, d'autre part, il y a une méconnaissance presque totale des caractéristiques magnétiques du granite et de la pyrrhotite.

Les anomalies enregistrées s'étendent sur plusieurs dizaines de mètres et sont d'une amplitude suffisante pour que l'on puisse avancer qu'une mesure tous les 5 mètres donne une image significative des effets des amas.

Il existe enfin une autre source possible d'erreurs liée aux conditions de travail de l'équipe mobile. Malgré tous les efforts de l'opérateur, la distance sonde-sol ne reste jamais rigoureusement constante lorsque le terrain est en pente et accidenté. Dans ce cas les effets créés par le modèle, même s'ils étaient l'image fidèle de la réalité, ne seraient donc pas nécessairement identiques aux effets expérimentaux.

Lorsqu'on progresse vers le NW, la décroissance du champ magnétique est plus rapide en aval de la structure qu'en amont. Cela confirme le fait

que les amas sont inclinés vers le NW. L'asymétrie peu accusée de la courbe entraîne un pendage supérieur à 40 degrés.

En discutant sur l'amplitude et l'extension des anomalies en fonction des différents paramètres décrits précédemment, on émettra trois hypothèses. La forme, assez bien définie par l'indice A, et le pendage seront supposés constants pour les indices B, C et D (D est l'amas présumé par l'anomalie du profil 268).

Hypothèse 1 :

- Les trois amas B, C et D sont affleurants ou subaffleurants, ce qui est conforme aux observations géologiques,

- Les volumes sont identiques,

- L'intensité d'aimantation varie d'un indice à un autre.

La faible anomalie à proximité de l'indice A est probablement due à une altération très poussée de la pyrrhotite (figure 13 b). Ce minerai est facilement altérable et on peut s'attendre à ce que les variations d'amplitude au niveau des profils 22, 1 et 268 soient en rapport direct avec le degré d'altération. L'enveloppe quartzeuse, à l'aplomb de l'indice D, peut avoir un rôle d'écran imperméable. La pyrrhotite inaltérée, située en dessous, garde ses propriétés magnétiques. Les amas B et C, affleurent plus nettement et sont soumis à un phénomène d'altération plus intense : de 1300 gammas pour l'amas D, l'amplitude ne dépasse guère 250 gammas pour B et C.

Cette hypothèse a l'avantage de correspondre d'une part au contexte géologique local, d'autre part aux modèles bâtis. Mais elle ne rend pas compte de l'extension des anomalies.

Hypothèse 2 :

- L'intensité d'aimantation est constante d'un indice à un autre,

- Les volumes sont identiques,

- Les positions en profondeur diffèrent.

L'éloignement d'une source magnétique se traduit par la diminution de l'amplitude et par un étalement de l'anomalie. En conséquence, l'amas D serait la structure la plus proche du sol. Or, il s'avère qu'il est le seul à ne pas affleurer. Pour les amas B et C, on remarque que l'amplitude et l'extension diminuent simultanément, ce qui n'est pas conforme avec une variation en profondeur.

Hypothèse 3 :

- L'intensité d'aimantation est constante d'un indice à un autre,

- Les volumes ne sont pas identiques,

- Les distances amas-sonde sont les mêmes.

Le volume augmentant, l'amplitude et l'extension de l'anomalie augmentent aussi. On en déduit que les volumes de B et de D sont supérieurs au volume C. Les données géologiques ne contredisent pas cette hypothèse, mais celle-ci ne permet pas de discuter des volumes de B et de D entre eux.

7.3.2.7. Conclusions

La première hypothèse a permis de distinguer l'amas D des deux autres. La troisième isole C des amas B et D. Par recoupement et en analysant toutes les données précédentes, est envisagée l'hypothèse suivante :

La mise en place de la pyrrhotite s'est effectuée à la faveur d'une zone faillée N55. La minéralisation n'a pas une structure continue, elle se présente sous forme d'amas plongeant vers l'Ouest. Les amas reconnus ont des dimensions de l'ordre du mètre. Ils sont affleurants ou subaffleurants. Par volume croissant, il vient tout d'abord l'indice C, puis l'indice D et enfin B.

L'étude faite n'élimine pas la possibilité d'existence d'autres amas situés à des profondeurs plus grandes : au niveau des grandes ruptures de pente, les fortes anomalies enregistrées peuvent masquer les effets de ces amas éventuels. D'autre part, la méthode employée limite très rapidement la profondeur d'investigation à une dizaine de mètres. La reconnaissance de nouvelles structures magnétiques imposerait :

- une connaissance des intensités d'aimantation,
- une densité de points plus forte (resserrement des profils),
- une atténuation des effets superficiels en élevant la hauteur de la sonde.

Au terme de cette étude sur les minéralisations de Chamfiard Saint-Léger, l'apport de la magnétométrie peut se résumer sous la forme d'un bilan :

- La fracture N55 se distingue sur tous les profils la recoupant, par des anomalies variant de plusieurs centaines de gammas à quelques unités.

- Malgré l'absence de mesures d'aimantation sur échantillon, une démarche logique à partir des variations du champ total rend compte de l'altération météorique variable suivant les amas.

- Un quatrième amas est probablement situé sous le profil 268. Etant donné la forte amplitude de l'anomalie, il ne doit guère être altéré.

- Si la forme et le volume n'ont pu être défini précisément, la localisation dans l'espace, le pendage et les dimensions relatives des amas ont été déterminés grâce à une série de modèles corrélés aux résultats expérimentaux.

chapitre 8

FILON DE NOGUILLAN

Carte IGN : La Rochette 1-2

x = 904,600 y = 59,310 z = 1510

Commune de Saint-Alban des Hurtières

Le filon affleure en forêt sur le versant Est du Pic de la Loze. Une route, partant du Col du Grand Cucheron, passe à 50 mètres en contre-bas.

8.1. CONTEXTE GENERAL

B. CABROL (1967) a abordé le problème minier du Massif des Hurtières en poussant surtout ses investigations vers l'inventaire des indices minéralisés. L'un d'eux est précisément le filon de Noguillan. C'est donc en reprenant sa thèse que le sujet sera abordé.

8.1.1. Chaîne des Hurtières

Le massif des Hurtières, dominant le confluent de l'Arc et de l'Isère, est coïncé entre deux accidents majeurs N50 : la faille du Grésivaudan au Nord, empruntant la vallée du Haut-Gelon et le

"Synclinal Médian" au Sud, passant par le Col de la Perche et le talweg du Mont-Bruant (figure 23 a). Il s'étend sur une surface de (15 x 5) km². Son unique crête orientée N30 s'abaisse du Sud au Nord de 2000 mètres à 300 mètres.

La roche qui compose la quasi-totalité de ce massif, est un micaschiste plus ou moins chloriteux de la série acide (cf. introduction aux campagnes de prospection). C. BORDET (1957) fait remarquer que cette formation a une épaisseur de l'ordre du millier de mètre. Ces deux constatations incitent à considérer ce massif comme un bloc dont les caractéristiques mécaniques sont constantes en tout point. Ainsi les phénomènes tels que des réfractations de fractures, sont absents, ce qui facilite la comparaison de plusieurs secteurs. C'est un argument quant à l'intérêt d'une étude structurale.

Le quartz et les carbonates, en quantité notable, sont disséminés dans ces micaschistes à faciès très monotone, sous forme de filonnets recoupant ou non la schistosité.

Les indices minéralisés sont constitués principalement de sulfures dans une gangue quartzo-carbonatée. Ils font de la chaîne des Hurtières, par leur nombre et au vu de l'importance de certains, une de nos principales régions métallogéniques alpines.

Une intrusion granitique limite les micaschistes au niveau du Synclinal Médian. Ce granite leucocrate est fortement orienté SW - NE.

Au Nord de la faille du Grésivaudan, les séries calcaires et marneuses du Lias apparaissent brutalement.

Le matériel de remplissage des failles majeures (Grésivaudan et Synclinal Médian) comporte des éléments triasiques.

Les glaciations quaternaires ont apporté des éléments morainiques : l'alpage de Noguillan est un placage morainique situé sur un replat.

8.1.2. Filon de Noguillan (figure 27)

B. CABROL (1967) consacre quatre pages à l'étude du filon. Après l'avoir situé et fait l'historique des travaux antérieurs, il définit la géométrie du gisement, analyse le minerai et émet des perspectives quant au tonnage.

8.1.2.1. Géométrie du gisement

La minéralisation est distribuée selon un axe E-W : les directions mesurées, varient entre N120 dans la partie haute du filon et N90 dans la partie basse.

Cette structure recoupe des micaschistes dont la schistosité moyenne est N20.

La partie affleurante, seule connue, s'étend sur 200 mètres, hachée par des failles de directions imprécises, puis disparaît brutalement aux deux extrémités.

B. CABROL (1967) écrit : "la puissance varie de 1 mètre dans la partie inférieure (sidérite prépondérante) à 3 mètres dans la partie supérieure (riche en blende)".

8.1.2.2. Minéralisation

La gangue est formée de quartz et de sidérite.

B. CABROL (1967) écrit : "le caractère le plus frappant de ce minerai est la brèche de sidérite cimentée par de la blende brune.... Les paragenèses proposées sont les suivantes :

1^{ère} venue : quartz + sidérite + pyrite

Fracturation

2^{ème} venue : blende, chalcopryrite, galène, pyrrhotite".

8.2. TOPOGRAPHIE, ETIREMENT DES MINERAUX, SCHISTOSITE, FRACTURATION DE LA CHAINE DES HURTIERES

Les anomalies magnétiques résultent des contrastes existant entre des volumes ayant des caractéristiques magnétiques différentes. Ceci amène à penser que si nous voulons établir des relations géologiques avec ces phénomènes, il faudra envisager de considérer des éléments géométriques observables sur le terrain.

D'autre part, on imagine mal la présence fortuite d'un gisement. Sa mise en place résulte d'une association de facteurs favorables à une minéralisation, à un dépôt. Ce gisement fait partie d'un contexte géologique. L'analyse des éléments de ce contraste peut entraîner une meilleure connaissance du gîte.

C'est ainsi que fut entrepris, dans le cadre de l'étude du filon de Noguillan et en parallèle avec la prospection magnétique, une analyse des structures sur toute la chaîne des Hurtières.

Pour éviter des erreurs dues aux glissements fréquents sur les versants et aux fauchages, la progression s'est faite le long de la crête, seule zone relativement plate.

8.2.1. Topographie, étirement des minéraux

La ligne de crête des Hurtières, levée en plan à partir de la carte topographique I.G.N. (figure 22 a), a une orientation générale N30. A ses extrémités, elle tend à s'aligner avec la faille du Grésivaudan au Nord et le Synclinal Médian au Sud, en dessinant une forme en S. L'observation sur le terrain de dépressions importantes transverses à la crête est frappante (figure 22 b). En plus de cela, son profil topographique met en évidence une dépression centrale (col du Grand Cucheron - col du Petit Cucheron), flanquée de deux points hauts : un au Sud, un au Nord.

Une vingtaine de mesures portant sur l'axe d'étirement des minéraux ont été prélevées entre le col du Grand Cucheron et le Sommet de la Grand Cha. Elles se tiennent dans une fourchette de plus ou moins 5 degrés autour d'une direction N35. Le pendage moyen est de 15 degrés vers le Nord. Cet axe

d'étirement s'identifie quasiment à la direction générale de la crête. Comme on pourra le montrer en discutant des plis et de la schistosité (paragraphe 8.2.3.), ce parallélisme n'est pas la conséquence d'un hasard.

Un matériau homogène soumis à la traction s'allonge, s'amincit dans sa partie médiane et se rompt suivant une cassure transverse à son axe d'étirement. Le massif des Hurtières, constitué uniquement de micaschistes, a une zone centrale à faible altitude : celle-ci peut correspondre à un amincissement. Les dépressions transverses sont assimilables à des plans de rupture de la crête. On voit ici la possibilité d'un étirement N30-35 de tout le massif. Mais attention ! La topographie peut être la résultante d'autres phénomènes.

8.2.2. Fracturation

8.2.2.1. Interprétation photogéologique (figure 23 a)

Les photographies aériennes I.G.N. de la mission 1956 Bonneville - Saint-Jean de Maurienne ont servi de base à ce travail. L'observation s'est faite à l'aide d'un stéréoscope. On relève par un trait sur la carte topographique, des alignements de types divers représentés par des ruptures de pente, des talwegs, des zones creuses. Les mesures de plans de fracture effectuées le long de la crête ont montré que ces alignements peuvent être pris comme l'intersection de la surface topographique avec ces plans de fracture.

A l'exception des fractures NO, les pendages observés sont tous forts et déversent vers l'Est et le SE, ce qui amène à identifier la direction d'un alignement à la direction du plan de fracture correspondant.

Avant toute exploitation des résultats, il s'agit de faire la critique de la méthode. Ce travail est hautement subjectif : l'oeil "se fait" plus facilement à une certaine famille d'alignements qu'à une autre; l'éclairage du site et la direction du vol mettent en relief certains alignements au détriment des autres. Mais, néanmoins, il faut compter sur l'effet statistique de la méthode pour atténuer les oublis ou les erreurs non systématiques.

Le plan de fracture observé sur photographie aérienne, n'est pas souvent palpable sur le terrain : le relief mou des micaschistes dû à des éboulis fréquents, à des fauchages, ne permet d'émettre qu'une impression. Par contre, nous pouvons dire que c'est la forte densité de plans de fracture qui entraîne l'existence des alignements. Ils révèlent alors des volumes allongés, débités par une famille de fractures, et s'il y a rejet, celui-ci est la somme de tous les petits rejets au niveau de chacune d'elles.

8.2.2.2. Détermination des familles de fractures (figure 23 b)

A partir de la carte interprétative (figure 23 a), on relève la direction et la longueur de chaque trait. Ces traits sont groupés en familles, 10 degrés par 10 degrés, à l'intérieur desquelles on fait la somme arithmétique des longueurs. La rosace obtenue indique, en pourcentage et en direction, la distribution des plans de fractures.

Mais cette présentation des résultats, apparemment très expressive, est très sensible aux erreurs systématiques. Les alignements NO ne sont pas très visibles sur photographies aériennes. Il a fallu prêter une attention toute particulière pour les discerner. Peut-être les a-t'on favorisées par rapport aux autres.

Enfin, il faut ajouter que la rosace n'exprime que des taux de fractures liés à leur direction et non pas un degré d'importance des déformations en fonction des plans de fractures relevés. Une étude plus approfondie sur la fracturation réserverait très certainement quelques surprises quant à la forme de la rosace obtenue ici (ROBERT 1976).

Fractures N90 : Ces fractures sont ouvertes et souvent minéralisées. On verra par l'étude des anomalies magnétiques sur le filon de Noguillan (paragraphe 8.1.2.), que cette famille N90 est en fait très variable en direction. Il s'agit de fractures d'extension.

Fractures N50 : Un grand nombre de ces fractures se cantonnent dans les zones proches des deux accidents majeurs, mais il faut en noter la présence aussi à proximité de la crête. Ces fractures à tendance fermée, comportent tout de même des minéralisations peu importantes.

Fractures N35 : A un pourcentage de 6 % correspondent deux familles : N30 et N40. La linéation d'étirement des minéraux est N35 20 N. Les quelques mesures faites sur ce plan de fracture indiquent N35 90. Ce sont des fractures fermées et elles contiennent donc l'axe d'étirement.

Fractures NO : Elles ne sont pas fréquentes sur le terrain. Leur pendage varie de 30 degrés vers l'Est à un pendage Ouest en passant par la verticale. On remarque que cette famille a un spectre mince et un fort pourcentage, isolé très nettement des autres.

8.2.3. Schistosité

80 mesures ont été effectuées sur des plans de schistosité (S1), le long de toute la chaîne des Hurtières. Reportées sur canevas de WULF, elles sont localisées principalement vers N20 50E (figure 24 a). Toutefois, on a mesuré assez fréquemment des plans S1 orientés soit N50, soit N175. Existe-t-il plusieurs schistosités ?

Tout le long de la crête, on note la présence de plis et surtout de microplis. Les plans axiaux, déterminés sans grande précision, semblent correspondre au plan général de la schistosité (N20 50E). Les axes de pli varient autour de N35 20N, direction d'étirement des minéraux. Sur le canevas de WULF, on constate que l'axe de pli moyen est situé quasiment sur la représentation cyclographique du plan axial. Ainsi, S1 s'identifie à une schistosité de plan axial, les plis étant fortement déversés vers l'Ouest et leur axe incliné vers le Nord. L'intersection des plans plissés (S0) avec S1 détermine l'axe du pli. Ces deux derniers paramètres étant connus, on en déduit la position des pôles de S0.

L'affleurement de micaschistes ($x = 905,240$ $y = 65,130$ $z = 1440$) (figure 24 b) permet de justifier l'hypothèse d'une schistosité de plan axial. La stratification apparaît nettement par l'alternance de bancs compétents et de bancs incompétents. La schistosité, transverse aux couches plissées, suit les lois de la réfraction. Elle est parallèle au plan axial, mais a tendance à se développer en éventail depuis l'intérieur du pli. La dispersion extrême des mesures sur le canevas de WULF, entre N50 et N160, peut être attribuée en partie aux plans S1 dans les bancs compétents tandis que dans les couches à aspect plutôt phylliteux, S1 ne subit pas un changement d'orientation très appréciable.

Avec ce phénomène de réfraction vient s'ajouter une autre cause de dispersion des mesures : une reprise ultérieure de la schistosité localisée dans certains secteurs :

- Vers le col de la Perche, le plan de schistosité relevé est souvent N50 90, comme le Synclinal Médian.

- Là où on note la présence de fractures Nord-Sud semblant jouer un rôle tectonique important - B. CABROL (1967) montre leur importance dans la géométrie du gisement de Saint-Georges des Hurtières - il s'avère que les plans de schistosité N-S sont relativement fréquents.

Mais cette réorientation n'est pas généralisée sur tout le massif. Dans la plupart des cas, la fracturation et surtout les fractures d'extension, n'affectent pas la schistosité : le filon de Noguillan la recoupe très nettement.

Les plis sont affectés par une schistosité de plan axial. Tous les deux montrent un aplatissement perpendiculaire au plan axial N20 50E et par conséquent à l'axe de pli moyen N35 20N. Cet axe de pli, parallèle à la crête, correspond donc à une direction d'étirement. Ceci s'avère justifié par l'existence de fractures d'extension transverses (déformation cassante) et par l'étirement des minéraux (déformation ductile). Tous ces phénomènes peuvent être envisagés dans une même phase de déformations. La schistosité de plan axial relevée dans les séries liasiques voisines, sur la route de Montendry correspond à celle des micaschistes.

Voici quelques arguments amenant la contradiction sur le fait de voir dans cette schistosité un phénomène datant du primaire (BORDET 1957, CARME 1971). Loin de vouloir réfuter cette dernière hypothèse, qui reste la plus probable, il faut noter que nombre d'auteurs ayant travaillé sur la série satinée restent évasifs quant à la schistosité et qu'une étude détaillée et concrète serait la bienvenue dans ces prochaines années.

8.2.4. Conclusions sur l'étude géologique

Si on désire obtenir une interprétation valable d'anomalies magnétiques causées par des structures géologiques, il s'agit de bien

connaître le terrain au départ et d'avoir une idée sur l'importance magnétique de ces diverses structures. Ainsi on peut penser qu'en fonction du remplissage, les fractures N90 seront bien marquées; les fractures N50 le seront de façon discontinue, tandis que les fractures N35 n'auront aucun effet magnétique. On ne peut rien dire des fractures N0. La schistosité a une direction quasi constante à Noguillan, les effets faibles qu'elle pourrait créer si elle variait franchement sont donc nuls. La nature ferrugineuse des divers minéraux laisse présager une aimantation du filon supérieure à celle de l'encaissant.

8.3. PROSPECTION MAGNETIQUE

8.3.1. Juin 1975 - Campagne de reconnaissance (figure 25)

Le but de cette campagne est :

- de tester les effets magnétiques du filon,
- de couvrir une large zone pour cerner toute extension dans le plan où la sonde progresse.

8.3.1.1. Préparation

Le stage de topographie, effectué par les étudiants du D.E.A. 1975 de géologie appliquée à Grenoble, a permis de lever une zone de 50 hectares autour du filon, à l'aide de théodolites et de planchettes.

L'implantation des repères, le long de profils NS, a été faite avec un "topofil" (5 à 10 % d'erreur).

On distinguera deux zones : l'alpage à l'Est, la forêt à l'Ouest. L'alpage a été sillonné par des profils de 600 mètres, repérés tous les 60 mètres et distants les uns des autres de 40 mètres. Dans sa partie Nord, ces profils ont été doublés par une autre série intermédiaire. En forêt, des profils de 300 mètres ont été repérés tous les 30 mètres, par manque de visibilité. L'espacement entre deux profils est de 30 mètres aussi. Tous ces profils ont été établis de part et d'autre d'une ligne médiane correspondant à l'axe du filon.

8.3.1.2. Passage de la sonde

L'évolution sous couvert forestier fut difficile, c'est pourquoi la sonde fut placée à un mètre du sol. Mais, à cette distance, les effets magnétiques superficiels sont importants et masquent en partie les effets, plus faibles, dus aux structures plus profondes.

Au niveau du filon affleurant, cet inconvénient s'accroît par la présence de nombreuses halles contenant des objets métalliques (rails, câbles, tuyaux). En certains endroits, le filon fut complètement disloqué par un défilage intensif et anarchique dans les années 60.

Dans l'alpage, des habitations très localisées, une conduite forcée et quelques clôtures électriques ont causé des anomalies parasites.

Pendant 5 jours, l'équipe mobile a parcouru 15 kilomètres de profils, à 1 m/s en moyenne. L'enregistrement s'est fait par méthode différentielle. La sonde de référence a été placée à 4 mètres, dans l'alpage à 50 mètres au SE de la source. La station de mesure était en contrebas du filon sur la route.

8.3.1.3. Résultats

Les profils étant en ligne brisée, on ne dispose que d'une carte de profils magnétiques, tracée par l'ordinateur. Les effets du filon à un mètre de distance ont une amplitude de 100 gammas environ. Des anomalies de cet ordre là ne se rencontrent qu'à l'approche des affleurements minéralisés. Partout ailleurs, elles ne dépassent pas 20 gammas, à l'exception des effets parasites.

8.3.1.4. Anomalies dues au filon (figure 26)

On distingue les anomalies de forte amplitude et de faible extension, dues aux objets métalliques superficiels, et les anomalies plus plates mais plus étendues, créées par des sources magnétiques plus profondes.

Dans la partie Est du filon, l'anomalie est centrée sur l'affleurement. Le fond magnétique est calme et, globalement, ne varie pas

de part et d'autre du filon. Outre l'anomalie médiane, il n'existe donc pas de structure magnétique individualisant la zone au Sud du filon, de la zone au Nord.

De l'Est vers l'Ouest on constate que :

- l'amplitude des effets diminue en même temps que la teneur en fer décroît,

- l'anomalie s'étale et la puissance du filon augmente.

Il y a coïncidence parfaite entre les enregistrements magnétiques et les résultats géologiques.

8.3.1.5. Extension du filon en direction

La corrélation des anomalies ne dépassant pas 20 gammas, entre des profils distants de 20 ou de 40 mètres et effectués à 1 mètre du sol, est tout à fait impossible. De plus, on sait que les premiers mètres de terrain sont faits de matériel morainique, donc très hétérogène. Quoiqu'on puisse attribuer une grande partie des anomalies à ces formations quaternaires, une série d'entre elles aurait tendance à s'aligner dans la partie Nord de l'alpage.

En conclusion sur cette campagne de reconnaissance, on peut souligner le fait que les grandes anomalies sont localisées uniquement sur le filon déjà connu.

8.3.2. Septembre 1975 - Prospection fine

La première prospection laisse beaucoup de problèmes en suspens quant à la géométrie du gisement. Dans le but de les éclaircir, la deuxième campagne portera sur deux zones choisies par quelques aspects géologiques et les résultats précédents. Les profils se suivront à raison de un tous les 5 mètres.

Les zones ont été choisies à l'Est et à l'Ouest du filon. La majeure partie du filon a été éliminée parce que trop abîmée et trop polluée

magnétiquement. L'extrémité minéralisée Ouest a été sauvegardée. Puis après le replat des tranchées, à 30 mètres au sud, une succession de blocs quartzeux stériles affleurent suivant une direction N90 (figure 27). Ces deux observations déterminèrent la zone en forêt. A l'Est, on décide de couvrir les alignements discernés en Juin au Nord de l'alpage de Noguillan. Le bed-rock n'affleurant quasiment pas, on se confie à ces seuls résultats pour délimiter cette zone.

8.3.2.1. Méthodes employées

En forêt :

Une zone de 260 m x 120 m, débutant 10 mètres au-dessus de la galerie supérieure, s'étend vers l'Ouest en direction de la butte 1653, sur un tapis d'éboulis. Elagage, repérage, et levé topographique à l'aide d'une boussole et d'un hectomètre prirent 6 jours, 3 à une personne, 3 à deux.

La sonde, située à 4 mètres du sol, se déplaça point par point, sur un maillage de 5 m x 5 m, ce qui donne un total de 1400 valeurs. La campagne dura 4 jours.

Une petite journée suffit pour le levé géologique et enfin une demi-journée fut nécessaire pour le dépiquetage.

Sur l'alpage :

Cette zone débute au niveau de la route et s'étend suivant l'axe cote 1653 - extrémité N.E de l'alpage. Ses dimensions sont 200 m x 550 m. Elle est constituée de prés et de marécages, repérée et topographiée au théodolite To wild et à l'hectomètre, sur un maillage de 10 m x 10 m. L'équipe mobile se déplaça en profils continus N.S ou S.N par tranche de 50 mètres. Ces profils, distants de 5 mètres, totalisent une vingtaine de kilomètres. Ils nécessitèrent 5 jours et demi de campagne.

Le levé géologique et le pointage de toute source magnétique ont pris une journée. De même pour le dépiquetage.

8.3.2.2. Zone forestière

8.3.2.2.1. Description du terrain (figure 28 a)

La pente varie entre 10 degrés et 40 degrés mais le relief est mou en général. C'est pourquoi, l'effet magnétique dû à la topographie devant être négligeable, on assimile ce terrain à un plan. Il est recouvert d'un tapis d'éboulis et de micaschistes altérés sur place, variant de zéro à quelques mètres. On note l'absence de roche étrangère à la chaîne des Hurtières.

Un alignement de blocs quartzeux stériles, quelques escarpements rocheux sont orientés N90-100. Deux replats situés, l'un au niveau des tranchées, l'autre vers les derniers grattages au SW, s'alignent suivant une direction SW-NE.

La puissance du filon, à l'affleurement, diminue brusquement en passant une zone broyée, 20 mètres au-dessus de la galerie supérieure. La minéralisation est continue sur 25 mètres en allant vers l'Ouest puis fait place à des blocs éparses jusqu'à disparition totale au niveau d'un replat.

8.3.2.2.2. Résultats de la prospection (figure 28 b)

L'enregistrement se fait en méthode différentielle. La sonde de référence étant placée à 100 mètres au Nord du "Vieux chalet COMBET", dans l'alpage, à 4 mètres du sol. Le maillage régulier et suffisamment dense a permis d'élaborer des cartes d'équichamps. La plate-forme de forage ainsi que les haldes au Nord du filon ont été les seuls éléments perturbateurs de cette zone.

D'emblée, trois secteurs d'anomalie se distinguent (figure 29)

- secteur 1 : au N-E, le filon cause les plus fortes anomalies de la zone (34 gammas).

- secteur 2 : au SE, à l'aplomb d'une fracture ouverte N100, l'amplitude maximale est de 14 gammas.

- secteur 3 : dans toute la partie Ouest, c'est le calme magnétique (gradient très faible).

8.3.2.2.3. Analyse du secteur 1

Examen des profils (figure 30)

Sur le profil N6, l'effet parasite dû à la plate-forme de forage, a été supprimé.

Au niveau de N1, le filon a une puissance de 3 mètres à l'affleurement et l'anomalie enregistrée a une amplitude de 22 gammas. N2 traverse une zone broyée où toute minéralisation importante en surface, est absente. L'amplitude maximale du profil magnétique N2 est de 23 gammas. Même remarque pour N8, les caractéristiques de l'anomalie ne semblent pas correspondre aux dimensions de l'affleurement. A l'aplomb des profils N14, N15, N16, les derniers affleurements du filon n'engendrent aucun effet magnétique sensible. Ces arguments permettront d'avancer l'hypothèse suivante : les anomalies sont dues essentiellement à une masse minéralisée plus importante en profondeur. Ceci est confirmé par les résultats d'un forage au niveau de N6 : à partir de 18 mètres de profondeur et jusqu'à 36 mètres, profondeur à laquelle le forage a été interrompu, il a été relevé uniquement une roche composée de quartz et de sidérite.

C'est au niveau de N7 et N8 qu'on observe les maximums d'amplitude (34 gammas). En s'appuyant sur l'hypothèse précédente et en supposant que de N1 à N9 le pourcentage en corps ferromagnétiques ne varie pas, il en résulte un épaissement du filon en progressant vers l'Ouest. Par raison de dissymétrie des anomalies, on peut dire que cette structure a un pendage fort vers le Sud comme l'indique l'observation du filon au niveau de la galerie supérieure.

Examen de la carte (figure 28 b)

Les anomalies sur N1 et sur N2 sont décalées vers le Nord. La partie Est du filon s'interrompt brutalement sous N2, pour reprendre sous N3 10 mètres plus au sud. Cet arrêt de la minéralisation correspond à une zone broyée SW-NE. On envisage ici la possibilité d'une faille senestre

(figure 35 b). D'après B. CABROL (1967), le filon de Noguillan est sectionné par des failles N30. Il pourrait bien s'agir d'une de ces failles dans le cas présent.

Dans l'ensemble, les isogammes cernent le filon. Mais les derniers affleurements relevés à l'Ouest ne coïncident plus du tout avec de fortes anomalies. Les courbes orientées N110 à l'Est s'incurvent progressivement vers le Nord en laissant de côté les derniers affleurements. L'interruption brusque de l'anomalie associée à une réorientation des isogammes laissent présager, en se référant au contexte structural de la région, au rôle d'une zone faillée bloquant la minéralisation vers l'Ouest : elle aurait entraîné la forme en crochon du filon, dans un mouvement dextre (figure 35 b).

8.3.2.2.4. Analyse du secteur 3 (figure 31)

Ce secteur, calme du point de vue magnétique, est traversé par une étroite zone SW-NE à gradient plus élevé. Au NW de cette ligne, la différence (Tmobile - Tréférence) enregistrée est globalement inférieure à - 3 gammas. Au SE, cette même différence est supérieure en moyenne à - 3 gammas. Cette ligne coïncide en plus avec l'interruption de toute anomalie de quelques gammas d'amplitude. D'où la distinction d'un compartiment stérile au NW et d'un compartiment minéralisé au SE, sans autre particularité pétrographique. Il est fortement probable que la séparation soit de caractère tectonique : dans l'escarpement rocheux au Nord du filon, les fractures N50 50E observées abaissent les compartiments Nord. Le programme CYLMAG ne pouvant mettre en évidence que des rejets verticaux, c'est sur cette dernière observation que les modèles suivants ont été bâtis (figure 32).

Les courbes obtenues par modèles cylindriques ne sont à regarder que sous l'angle qualitatif : le paramètre distance sonde - sommet de la structure n'est pas sûr, or la figure 32 c montre des variations d'amplitude relativement importantes suivant ce paramètre. Ces courbes représentent des profils magnétiques faits perpendiculairement à la ligne de gradient élevé. Elles sont issues d'une structure assimilée à une faille N45 45-60E rejetant le compartiment NW vers le bas.

L'alignement des blocs de quartz stérile n'a donné lieu à aucune anomalie. Par ailleurs, il longe une anomalie située à 15 mètres au sud. Celle-ci, qui ne correspond à aucun indice minéralisé, est située au point de

concours de la structure SW NE précédente et d'une fracture N90, faisant l'objet du paragraphe suivant.

8.3.2.2.5. Analyse du secteur 2 (figure 28 b)

La fracture ouverte à l'aplomb de l'anomalie principale du secteur 2, est peu minéralisée. Il est vrai que cette observation n'a pu se faire que sur les bords de celle-là car le fond est rempli d'éboulis et de vieilles haldes. La présence de vieux grattages dans cette fracture atteste que les anciens ont probablement été guidés par des indices plus importants. Cette structure d'extension fait penser à ce que serait la fracture encaissant le filon de Noguillan si la minéralisation ne l'avait pas occupé. Cette image peut tenir lieu d'hypothèse en disant que l'anomalie est causée par une masse relativement peu importante, de même nature que le filon principal en profondeur (quartz + sidérite), mis en place à la faveur de la fracture N90. L'extension des effets étant assez restreinte, la minéralisation doit se situer dans les premiers mètres.

8.3.2.3. Zone d'alpage

8.3.2.3.1. Description du terrain (figure 33 a)

La pente varie entre 5 et 25 degrés, le relief est mou : on assimile la surface à un plan.

Un seul affleurement, 50 mètres à l'Est du "Vieux chalet COMBET", atteste de la présence de micaschistes sous un manteau morainique. Le bed-rock affleure aussi, 30 mètres à l'Est de la zone étudiée, dans le talweg. Ces deux observations permettent de penser que le dépôt quaternaire a quelques mètres d'épaisseur au plus. De nombreux blocs erratiques, provenant du verrou granitique d'Epierre, parsèment l'alpage. La composition très argileuse du terrain ne permet guère l'infiltration des eaux, ce qui donne de grandes zones marécageuses.

8.3.2.3.2. Résultats

Beaucoup de corps magnétiques parasites ont été relevés dans cette zone (figure 33 a) : habitations, ruines, conduite d'eau, rails, tôles, clôtures électriques.

L'enregistrement a été effectué en différentiel, la sonde de référence étant fixée dans l'alpage à 100 mètres au Nord du "Vieux chalet COMBET" et à 4 mètres du sol. L'amplitude maximale, à l'exception de tout effet parasite ne dépasse pas 30 gammas. Comme pour la zone forestière, l'ordinateur a pu sortir une carte d'isogammes significative.

8.3.2.3.3. Extension du filon en direction

Le secteur, limité entre la route et les chalets, est perturbé par des effets parasites. Quoi qu'il en soit, il s'en dégage qu'il n'existe aucune anomalie due à une structure magnétique tel que le filon. L'arrêt de la minéralisation correspond à une rupture de pente visible sur photographie aérienne et marquée sur le terrain par des zones d'éboulis (figure 27). Cette ligne sépare alpages et forêt.

La zone de gradient élevé au SW de ce secteur suit un canal de drainage. L'eau provient de la source "Fontaine froide" mentionnée par B. CABROL (1967). Cette eau lessiverait le filon et les micaschistes encaissants, puis sortirait par une fracture. Deux batées ont relevé la présence de quartz, micas, chlorites, tourmalines, grenats, pyrite et sidérite. Ce sont surtout les éléments pyriteux et sidéritiques qui adhèrent à un aimant. L'anomalie correspondant à ce drain, (construit par l'homme) ne peut être due à une structure géologique. Il est exempt de tout objet métallique. Par déduction, il ne reste comme source magnétique plausible que l'accumulation de grains magnétiques. C'est d'ailleurs dans la première zone calme du canal à partir de la source, que se situent les plus fortes anomalies.

8.3.2.3.4. Analyse de l'anomalie à l'Est de la zone

Cette anomalie rectiligne s'étire sur 200 mètres. Elle correspond exactement au tracé du ruisseau. Ce talweg est repérable sur photographie aérienne et a une direction N95. Deux hypothèses sur la source magnétique sont envisageables :

- Les effets ressentis sur 20 - 30 mètres peuvent être dûs à la présence de grains magnétiques dans le lit du ruisseau. Les micaschistes,

riches en pyrite sont lessivés par les eaux. Des particules sont entraînées et viennent se déposer dans l'alpage. Or ce ruisseau draine une grande surface, c'est la raison pour laquelle les batées qui ont été effectuées en ce lieu, recueillent un fort pourcentage de grains magnétiques.

- D'après le contexte général, la ligne photographique N95 correspond à une fracture d'extension. Une structure filonienne mince et assez proche du sol peut créer une telle anomalie.

8.3.2.3.5. Essai d'interprétation rapide d'une carte magnétique (figure 34)

Si on considère maintenant, non plus l'amplitude ni l'extension d'une anomalie, mais leurs directions préférentielles, il en ressort un système de lignes qui ne peuvent être interprétées par une quelconque structure dans la moraine. Au contraire, deux familles de lignes N50 et N100 prédominantes, s'intègrent parfaitement dans le système de fracturation des micaschistes, ici considérés comme le bed-rock.

Cette interprétation n'a qu'une valeur très subjective. Un travail plus minutieux serait nécessaire pour en accorder toute fiabilité.

8.4. CONCLUSIONS

8.4.1. Proposition d'un modèle pour le filon de Noguillan

8.4.1.1. Origine sédimentaire - Première minéralisation

L'examen de l'affleurement $x = 905,240$ $y = 65,130$ $z = 1440$ apporte un argument à l'origine sédimentaire des micaschistes (figure 24 b). Bien mis en relief par l'érosion, des bancs compétents de 50 cm alternent avec un matériau beaucoup plus friable. Mise à part la recristallisation métamorphique, l'analogie est frappante entre cette série et certaines séries marno-calcaires liasiques.

Dans les strates à aspect phylliteux, se sont mis en place d'importants amas de pyrite et de sidérite.

8.4.1.2. Fracturation, orientation des structures, deuxième minéralisation

L'hypothèse suivante s'inspire beaucoup du travail de J.P. ROBERT (1976). Le mouvement global du massif des Hurtières est dextre, dirigé par deux décrochements senestres N50 (figure 35 a) : la faille du Grésivaudan et le Synclinal Médian. Avec des failles N30, cisaillements de RIEDEL R dérivant de ces décrochements, ils délimitent le massif et lui donnent une forme amygdalaire. Il y a étirement suivant la ligne de crête qui concrétise la plus grande diagonale de l'amygdale. Transversalement, une contraction crée un plissement. L'axe du pli (la ligne de crête) a une forme en S (figure 22 a). Cette sigmoïdité peut être créée par des décrochements dextres N50 : au voisinage du Synclinal Médian vers le col de la Perche, le long de la crête (Grand Leyat, col du Grand Cucheron), on observe fréquemment ce type de décrochement. Les fractures d'extension T associées à ces derniers ont théoriquement une orientation N90 : c'est le cas du filon de Noguillan.

Le filon puissant d'un mètre et orienté N90 à l'Est, passe à l'Ouest à une puissance de 3 mètres et à N120. D'après les levés magnétiques (figure 28 b), en progressant toujours vers l'Ouest, son épaisseur augmente encore et son orientation tend vers un axe N-S. Il disparaît alors brusquement au NW de la ligne N55 repérée par un gradient magnétique légèrement plus élevé (figure 31). Sur le plateau du Vercors, J.P. ROBERT (1976) interprète la torsion des fractures T et leur épaissement comme suit : "cette torsion suggère d'une part que ces fractures ont une origine précoce dans l'ensemble des déformations accompagnant le décrochement et d'autre part qu'elles deviennent sigmoïdes étant entraînées par la rotation d'ensemble, il s'ensuit une augmentation de la valeur de l'angle que font les fractures T avec le décrochement majeur". En s'appuyant sur cette interprétation, on fera l'hypothèse suivante : une zone de décrochement dextre N55 est à l'origine de la fracture T N90 où s'est mis en place le filon de Noguillan. L'état de déformation persistant, le filon a subi une torsion dextre à proximité du décrochement (figure 35 b). La partie en crochon du filon est coincée entre deux plans de décrochement : N55 à l'Ouest, N30 à l'Est. Sans pouvoir expliquer sa présence ici, ce plan N30 est identique aux failles de RIEDEL R limitant l'amygdale.

Ces déformations s'accompagnent d'une remobilisation des amas ferreux et d'une seconde minéralisation très riche en blende.

8.4.2. Perspectives en vue d'une future prospection

Le système de fracturations étudié va de pair avec la mise en place des sulfures (blende, chalcopryrite). A l'Est, la minéralisation s'amincit et disparaît au niveau de la galerie inférieure. A l'Ouest, le filon s'interrompt brusquement. La partie de la fracture T coincée dans la zone de décrochement n'existe pas ou a été érodée. Il serait intéressant de prospecter au N-NW de cette zone, où il existe une probabilité non négligeable de rencontrer la branche W du filon.

8.4.3. Apport de la prospection magnétique sur ce site

Tout d'abord une critique : le manque de mesures sur échantillons ne nous a pas permis de vérifier par des modèles théoriques les hypothèses qui sont avancées.

La marche en profil continu a permis d'établir une carte magnétique précise des anomalies. La sonde étant portée à 2 mètres du sol, l'équidistance de 5 m des profils est appropriée à une prospection minière.

La prise de mesures à 4 mètres en point par point n'avait jamais été faite auparavant avec ce magnétomètre; elle s'est avérée efficace.

Le port de la sonde dans la forêt n'a pas été particulièrement soigné et pourtant il a été possible de mettre en évidence des anomalies de 2 gammas (figure 31 a). On peut penser que pour l'avenir, il sera possible d'obtenir une finesse des résultats bien supérieure, en améliorant les méthodes et en faisant un travail plus minutieux.

La haute sensibilité du magnétomètre et la méthode différentielle directe, ont permis de mettre en évidence tout un contexte géologique auquel appartient le filon de Noguillan :

- La terminaison Ouest du filon se manifeste par des isogammes orientés N100, s'incurvant régulièrement vers le Nord avec une extension transversale progressive des anomalies.

- Deux compartiments ayant un contraste magnétique faible s'individualisent de part et d'autre d'une faille N55 dextre bloquant la minéralisation vers l'Ouest.

- Les fractures N100 (filon et fracture au Sud du filon), largement ouvertes, sont très bien représentées sur carte magnétique. La fracture N55, minéralisée partiellement, est jalonnée de faibles anomalies. La fracture N30 (galerie supérieure) est stérile; seul le décrochement senestre des isanomaes la met en évidence.

- Dans l'alpage, les isogammes s'alignent préférentiellement suivant deux directions : N50 et N100. Mais il n'existe pas d'extension du filon vers l'Est.

- Dans les cours d'eau, les placers créent de fortes anomalies très limitées, tandis qu'à l'aplomb des marécages se développent de grandes zones magnétiques calmes.

chapître 9

FILON DES ROGNIOUX

Carte topographique IGN : Bourg Saint-Maurice 1-2

A x = 929,700 y = 81,260 z = 1890

B x = 929,170 y = 80,740 z = 2060

Commune de Beaufort-sur-Doron

A deux kilomètres au NE du Grand-Mont, s'étend le plateau des Rognioux, surface herbeuse entaillée par des vallons SW-NE. Situé entre 1900 mètres et 2300 mètres, il est accessible à pied du barrage de Saint-Guérin à l'Est et par les alpages de Cuvy au Nord. La pente moyenne n'excède pas 15 degrés.

Au jour où sort ce mémoire, l'étude corrélatrice entre les résultats magnétiques et les phénomènes géologiques n'a pas débuté. Elle s'avère être complexe et les données fort nombreuses pour mener à bien un tel travail n'ont pas été toutes collationnées. Aussi se bornera-t-on à présenter simplement le contexte dans lequel les prospecteurs ont évolué et les travaux effectués auparavant sur ce site. La campagne de prospection se déroula dans des conditions très particulières, d'où l'intérêt de les décrire.

9.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE (figure 36)

H. DABROWSKI écrit dans un rapport interne : "Du point de vue géologique, le plateau des Rognioux est recouvert par des formations triasiques (quartzites et cargneules) épaisses d'environ 40 mètres, reposant sur un socle composé de roches cristallines métamorphiques, d'origine principalement volcanique : rhyolites, tufs, ignimbrites, avec quelques alternances plus basiques, tels qu'amphibolites, gabbros, éclogites".

On distingue en première observation 2 familles de fractures, souvent matérialisées par des filons : N45 et N110.

"La zone minéralisée des Rognioux se subdivise en deux zones d'affleurement :

- une zone basse où il est possible d'observer des affleurements filoniens ou silicifiés traversant le trias. Leur extension se suit sur environ 200 mètres entre les altitudes 1850 et 1900 mètres. Les minéralisations y sont principalement représentées par la galène, blende et barytine. Il y a bien peu de chalcopryrite. Les affleurements sont en outre, très altérés et les minéralisations lessivées. Par contre, on note le développement très important d'oxydes ferrugineux. (Le sondage "chalet Nord" a rencontré ces oxydes sur 18 mètres de puissance).

- une zone haute, où il est possible d'observer des affleurements minéralisés en galène, blende sur une longueur d'environ 400 mètres... entre les altitudes 2050 et 2150 mètres. La puissance de la zone minéralisée est variable et oscille entre quelques décimètres et 1,50 mètre".

9.2. TRAVAUX ANTERIEURS

Outre les travaux inédits de H. DABROWSKI et de P. COURT portant sur des observations géologiques, il a été effectué :

- en 1962, une campagne géophysique par méthode électrique (figure 37) : les corrélations entre les divers profils ont permis de mettre en évidence des axes SW-NE d'une part et E-W d'autre part.

- en 1964, une série de sondages le long de la structure minéralisée SW-NE, permit d'étudier le filon en profondeur. Figure 38 : un schéma synthétique représente les résultats par une série de coupes au niveau des sondages.

9.3. PROSPECTION MAGNETIQUE

9.3.1. Préparation en laboratoire

Nanti de tous ces documents, on se proposa dans un premier temps de corréler les résultats des sondages, les axes de moindre résistivité et les anomalies magnétiques à l'aplomb de ceux-ci.

La direction des profils correspond à celle des coupes obtenues d'après les sondages. Pour les 3 zones (figure 37) tracées, ces directions sont :

zone SCN = N155

zone SO' = N133

zone S1 - S1' = N123

Pour chaque zone, 11 profils distants de 5 mètres l'un de l'autre s'étirent sur 300 mètres (zone SCN) ou sur 250 mètres (zones SO' et S1-S1').

Quelques escarpements rocheux peu accusés empêchent une évolution des prospecteurs en continu. D'autre part, on s'intéresse a priori à des effets dont la source se situe à des profondeurs supérieures à 10 mètres. Une méthode point par point s'avère alors justifiée malgré son manque de rendement. Le Beaufortin est une région très arrosée et à 2000 mètres, l'épaisseur de neige n'est que rarement inférieure à deux mètres. Elle constitue une couche amagnétique et présente le double avantage d'éloigner la sonde des effets superficiels et de recouvrir uniformément les passages scabreux. C'est donc pour la semaine du 5 au 9 Avril 1976 que fut décidée une campagne de prospection par méthode continue sur terrain enneigé. Elles ont aussi pour but technique de tester in situ l'appareillage dans des conditions de température et d'humidité assez éprouvantes.

9.3.2. Repérage des profils

L'accessibilité du plateau est facilitée par le téléski partant d'Arêches et montant jusqu'à 1700 mètres sur les alpages de Cuvy. Puis une heure de marche, avec skis et peaux de phoque, sont nécessaires pour rejoindre le chalet 2 Nord où le campement fut établi.

Le plateau est recouvert par une couche de neige de deux mètres d'épaisseur en moyenne. Exceptés les chalets d'alpage, aucun repère topographique n'est visible. Le premier travail a été de situer la position des sondages sur le terrain à l'aide du levé au 1/2 000 de A. CAPPONI.

L'utilisation du To wild s'est avérée efficace. Par une série de recoupements les sondages sont repérés à 1 mètre près, ce qui est amplement suffisant étant donné le travail demandé. A l'aide d'un cordeau et d'une boussole, et suivant un maillage de 10 m x 10 m, le marquage des zones SCN, SO' et S1 - S1' nécessita 450 piquets.

La campagne topographique dura deux jours, transport du matériel compris, à cinq personnes.

9.3.3. Prélèvement des mesures magnétiques

Plusieurs portages successifs de charges permirent d'acheminer les 250 kilogrammes de matériel nécessaires pour la campagne de mesures (dont 150 kg uniquement pour le magnétomètre). L'équipe se compose de 6 personnes.

9.3.3.1. Installation du matériel

La station de réception est établie dans le chalet 2 Nord et comprend :

- une antenne de réception des mesures fixée sur le toit,
- un fréquencesmètre nouvellement conçu,
- une perforatrice de bande,
- un enregistreur graphique de faible dimension.

Le tout est alimenté par batterie et groupe électrogène.

La sonde de référence est plantée dans la neige au point SF, 70 mètres au Sud du chalet 2 Nord.

La sonde mobile est fixée horizontalement à plus de 2 mètres de la surface enneigée.

9.3.3.2. Evolution de l'équipe mobile

L'équipe mobile a tout d'abord évolué tôt le matin, sur neige gelée et sans matériel particulier. Mais très vite, un radoucissement du climat entrava considérablement la progression. Pour la suite des profils, une personne trace le profil en tassant la neige sous ses pieds, l'équipe mobile arrive après, chaussée de raquettes (effet magnétique nul).

9.3.3.3. Fonctionnement de l'appareillage

Une grande partie de la manipulation se déroula par un temps froid et très humide. Une panne de récepteur dès le premier jour la stoppa pendant 6 heures. La formation de givre à l'intérieur de la perforatrice a des conséquences sur la génération de la bande : quelques mesures sont aberrantes. Une erreur systématique sur les mesures fut causée par une pièce du fréquencesmètre défailante à des températures inférieures à 0°C.

9.3.4. Résultats

La campagne a duré 5 jours, transport du matériel compris. Les anomalies magnétiques enregistrées ne dépassent pas quelques gammas. Un gradient plus fort fut toutefois mis en évidence dans la partie N de la zone SCN, c'est pourquoi elle fut agrandie. Au total l'enregistrement de mesures magnétiques porta sur 10 km de profils, ce qui est un maximum vu les conditions de travail déplorables. Les raquettes se révélèrent très efficaces, mais quelques passages délicats nécessitèrent la pose de mains courantes. Un hélicoptère de l'armée vint enlever le matériel le matin du 9 Avril pour le déposer quelques minutes plus tard au Nord de Beaufort-sur-Doron.

Le maillage régulier et serré des mesures a permis de tracer des cartes d'équichamps (figure 39).

Les isogammes ont une orientation N45 préférentielle. Entre $y = 70$ m et $y = 90$ m pour la zone SO', entre $y = 60$ m et $y = 80$ m pour S1 - S1', on note un resserrement des isogammes. Les profils topographiques correspondants mettent en évidence une pente inclinée vers le NW dans les deux cas. Pour la zone SCN, on fera deux remarques :

- A l'aplomb du chapeau de fer, le gradient est très faible.
- Le gradient élevé au Nord de cette zone peut être attribué à une remontée brusque du socle cristallin.

9.4. CONCLUSION

Il est inutile à l'heure actuelle de poursuivre l'interprétation. Afin de pouvoir proposer un modèle pour le gisement filonien des Rognioux, l'étude peut continuer dans divers domaines :

- Observations fines des carottes de sondage.
- Calcul de l'intensité d'aimantation sur des échantillons prélevés dans ces sondages.
- Analyse structurale en se basant sur des observations de terrain et sur la mission photogéologique du C.E.A. effectuée en automne 1975.

On peut aussi envisager une nouvelle campagne de mesures soit par méthode magnétique, soit par méthode électromagnétique.

CONCLUSIONS GENERALES

Le déroulement d'une prospection géophysique peut se résumer en 3 étapes :

- Campagne de mesures.
- Traitement des données.
- Interprétation des résultats.

Les travaux décrits ici, montrent que l'étude d'un gisement alpin par ses effets magnétiques, ne se fait pas sans quelques contraintes matérielles : il se pose un problème de méthodologie dans un premier temps. Par une série de programmes, le traitement informatique facilite le maniement du très grand nombre de données. Au terme de cette deuxième étape, on a d'une part des valeurs de champ (ou de différence de champs) magnétique exprimées sous diverses formes, d'autre part, des observations géologiques plus ou moins quantifiées. La corrélation de ces résultats n'aboutit qu'à des hypothèses; mais on s'aperçoit qu'elle permet de préciser des points importants quant à la position et à la géométrie du gisement.

METHODOLOGIE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Pour l'étude fine d'un secteur et dans le meilleur des cas, les prospecteurs avancent, sans arrêt, le long de profils rectilignes équidistants. On obtient ainsi une zone quadrillée suivant une maille régulière (paragraphe 8.3.2.1.) : 5m x 5m semble être un optimum pour un capteur situé à 2 mètres du sol. Si le relief, la végétation, la nature du sol ne permettent pas une progression continue, on travaille alors suivant une méthode point par point (paragraphe 8.3.2.1.) : toujours selon une même maille régulière, les mesures sont prises à l'arrêt, la sonde étant à 4 mètres du sol. Il est nécessaire dans les deux cas précédents, d'avoir un fond topographique adapté quant à l'échelle et à la précision. Cela entraîne le plus souvent, outre la campagne géophysique, un levé topographique des lieux. Pour une reconnaissance rapide, il suffit de se caler sur des points topographiés sur une carte courante (maison, source, crête...) et de progresser soit par méthode continue, soit en point par point. On obtient ainsi des profils en ligne brisée (paragraphe 8.3.1.). Dans ce dernier cas, le maillage quelconque est généralement lâche, la corrélation entre profils est très difficile, voire impossible.

Les valeurs magnétiques enregistrées sur le terrain en très grand nombre, sont acheminées vers tel ou tel type de programmes, suivant la méthode employée sur le terrain et la présentation des résultats désirée. La restitution finale des données magnétiques se fait sous forme de profils et de cartes et permet ainsi des corrélations directes avec des données topographiques et géologiques.

INTERPRETATION DES RESULTATS

Avant toute interprétation des résultats, il s'agit d'analyser les conditions dans lesquelles s'est déroulée la campagne de prospection. L'éloignement du capteur par rapport au sol favorise l'investigation du sous-sol (paragraphe 5.2.2.1.). Lors des différentes prospections, la sonde fut placée à trois hauteurs différentes : 1m, 2m, 4m. Compte tenu des propriétés magnétiques des terrains en présence, 2 mètres par méthode continue et 4 mètres en point par point sont des hauteurs minimales pour obtenir des résultats valables. D'autre part, les profils magnétiques sur le gisement de Saint-Léger ont un aspect de continuité bien qu'obtenus à partir d'un nombre limité de points. L'interpolation de valeurs magnétiques entre ces points

seuls vraiment représentatifs, est un procédé artificiel sujet à critique (paragraphe 7.3.1.). Enfin, on discutera du maillage de la zone prospectée.

L'analyse des profils magnétiques du gisement de Saint-Léger a porté sur l'amplitude, l'extension des anomalies et les gradients dT/dx (paragraphe 7.3.). Ainsi a-t-on pu préciser :

- l'orientation des structures minéralisées,
- la puissance,
- l'extension en profondeur,
- le pendage,
- l'altération du minerai.

L'influence du relief a été très forte sur T (paragraphe 7.2.2.2.). Elle se traduit par des anomalies paires, contrairement aux anomalies créées par les amas de pyrrhotite.

La haute sensibilité du magnétomètre et la méthode différentielle ont été très utiles à l'exploration du site de Noguillan. Mais en contrepartie, il faut pour cela un sol propre : les nombreuses sources superficielles parasites masquent les effets d'origine profonde (paragraphe 8.3.2.3.2.). Deux phénomènes naturels et superficiels créent des anomalies remarquables :

- l'accumulation de grains magnétiques en faible quantité dans les cours d'eau (paragraphe 8.3.2.3.).
- la cuisson locale, par feu de broussailles, des argiles constituant le sol de l'alpage au N-NW des chalets (figure 33) (LEBORGNE 1960).

On a déterminé, d'après les observations géologiques, quel était l'apport minéralisé en fonction des familles de fractures (paragraphe 8.2.4.). Ces minéralisations créent des anomalies magnétiques proportionnelles à leur volume. Sur carte, les isogammes peuvent dessiner la forme de ses limites (paragraphe 8.3.2.2.3.). Par ailleurs, à l'aide d'un filtrage simplifié, on a pu mettre en évidence une faille par son rejet vertical (paragraphe 8.3.2.2.4.).

A la suite de ceci, on a pensé que les alignements préférentiels des anomalies, de si faible amplitude qu'elles soient, étaient créés par la fracturation (paragraphe 8.3.2.3.5.). Tous ces arguments montrent les relations étroites existant entre les variations du champ magnétique et les déformations dans un même secteur : ce sont en grande partie des problèmes de géométrie.

POUR L'AVENIR

Soumise à un champ magnétique externe, une roche crée une variation de ce champ. La nature et la taille des grains magnétiques, le réseau cristallin des minéraux, l'état de déformation des roches, les conditions physico-chimiques au moment de leur aimantation, influencent cette variation. L'étude de ces paramètres a fait l'objet d'importants travaux en laboratoire (NEEL 1955, NAGATA 1961).

La prospection magnétique s'attache beaucoup plus à l'anomalie créée par un corps plutôt qu'à ses propriétés. Les raisons en sont simples : d'une part la structure recherchée est très souvent invisible, d'autre part une méthode par analyse des caractéristiques de la roche nécessite un échantillonnage préalable avec tous les inconvénients que cela comporte. La prospection magnétique n'est abordée en général, que dans l'optique calcul (réduction au pôle, prolongement vers le bas, prolongement vers le haut), afin de cerner au mieux la source des anomalies. Le géophysicien remet alors les diverses cartes transformées au géologue. Celui-ci essaiera de les interpréter en fonction des observations dont il dispose. En dépit des procédés d'interprétation, soit par modèles, soit par méthodes des tangentes d'inflexion (NAUDY 1970), il subsiste une question primordiale : à quel type de structure géologique peut-on attribuer une anomalie magnétique ?

Les travaux effectués depuis deux ans et décrits ici, ont montré que le magnétomètre différentiel à haute sensibilité possède les qualités requises pour la prospection magnétique au sol, dans le domaine minier. A savoir :

- la facilité d'utilisation sur le terrain,
- le faible poids,
- la consommation électrique réduite,
- la relative liberté d'action des prospecteurs,
- l'acquisition rapide de données par prise de mesures continue,
- la très haute résolution,
- les mesures différentielles directes permettant d'éliminer les effets de la variation diurne du champ magnétique terrestre.

Afin de pouvoir composer avec ces caractéristiques dans le cadre de la prospection minière, l'étude géologique des gîtes prospectés n'a pas été menée de façon très systématique et très précise. Il en résulte que tous les modèles proposés restent très hypothétiques. Mais là n'a pas été le but principal recherché. Il s'agissait, en corrélant les effets magnétiques enregistrés avec les renseignements de la géologie, de montrer l'apport possible de la magnétométrie dans l'étude de certains sites miniers alpins. On a réussi à mettre en évidence des effets de faible amplitude dus à des structures géologiques associées à un gisement. Au sol, les magnétomètres actuels détectent des anomalies dont l'amplitude n'est pas inférieure à quelques gammas. Loin d'être dans des conditions optimales, le magnétomètre différentiel à haute sensibilité permet de résoudre des anomalies ne dépassant pas un ou deux gammas (paragraphe 8.3.2.2.4.) (COLLIN 1973). Ainsi de nombreuses structures géologiques ayant des effets de faible amplitude peu ou pas détectables jusqu'à présent, s'avèrent être dans le champ d'action d'un tel magnétomètre.

Les hypothèses émises à propos du filon de Noguillan (paragraphe 8.4.1.) ont montré qu'un gisement minier découle des conditions qui déterminent aussi son environnement géologique. Les structures définissant cet environnement ont une importance considérable dans l'investigation et la compréhension des gisements. Le système de fracturation, la stratification, la schistosité, l'orientation et la nature

des minéraux sont autant de valeurs mesurables tant par l'observation sur le terrain que par des méthodes magnétiques précises. L'étude de ces éléments structuraux en liaison avec un gisement, constituera une suite logique des travaux effectués jusqu'alors : avec la collaboration de plusieurs disciplines (analyse structurale, géochimie, pétrologie), il s'agira, dans un travail futur, de distinguer les relations entre les facteurs physico-chimiques réglant la mise en place d'un gisement de minerais, et les effets magnétiques, souvent de faible amplitude, dus aux variations minéralogiques et structurales, créées par ces facteurs.

BIBLIOGRAPHIE

La prospection magnétique à haute sensibilité, différentielle, effectuée au sol n'a pas encore été sujette à de nombreuses études, surtout dans l'optique de ce travail. C'est pourquoi plutôt que de consulter une liste exhaustive d'ouvrages qui n'ont pas un rapport direct avec ces problèmes, le lecteur trouvera uniquement quelques références de base. D'autre part, ce mémoire fait appel à plusieurs disciplines; il est préférable d'établir un classement regroupant les ouvrages sous les trois titres suivants :

appareils de mesure

effets magnétiques

études géologiques

APPAREILS DE MESURE

ABRAGAM A. : 1961. Les principes du magnétisme nucléaire. 1^{ère} édition
P.U.F. 346.

COLLIN C.R., SALVI A., LEMERCIER D., LEMERCIER P., ROBACH F. : 1973.
Magnétomètre différentiel à haute sensibilité. Geophysical Prospecting, 21,
704-715.

GIRET G., MALMAR L. : 1965. Un nouveau magnétomètre aérien, le magnétomètre à vapeur de césium. Geophysical Prospecting, 13, 225-239.

HERBERT R., LANGAN L. : 1965. The airborne rubidium magnetometer. Varian associates, Geophys. Tech. Mem., 19, 6 pages.

HOOD P. : 1964. The ground flux gate magnetometer - a new versatile prospecting tool. Canadian Mining Journal, 85, 59-64.

HOOD P. : 1967. Magnetic surveying instrumentation. A review of recent advances. Mining and Groundwater Geophysics, Economic geology report, Geological Survey of Canada, 26, 3-31.

KASTLER A. : 1950. Quelques suggestions concernant la production optique et la détection optique d'une inégalité de population de niveaux de quantification spatiale des atomes. Application à l'expérience de STERN et GERLACH et à la résonance magnétique. Journal de physique et du radium.

PACKARD M., VARIAN R. : 1954. Free nuclear induction in the earth's magnetic field. Physical Review, 93, 941.

PARSONS L.W., WIATR Z.M. : 1962. Rubidium vapour magnetometer. Journal of Scientific Instruments, 39, 292-300.

RUNCORN S.K. : 1960. Methods and techniques in geophysics. Interscience publishers, Tome 1.

THOMAS J. : 1965. Le magnétomètre aéroporté MP 121 de Sud-Aviation. Geophysical prospecting, 13, 22-36.

EFFETS MAGNETIQUES

BRUHAT G. : 1967. Cours de physique générale, Electricité. Masson.

COULOMB J., JOBERT C. : 1976. Traité de géophysique interne, Magnétisme et géodynamique. Masson, Tome 2.

FAVRE B. : 1962. Cours de géophysique, Méthodes magnétiques. IFP, Technip.

GOGUEL J. : 1971. Géophysique. La Pléiade.

HOWELL B.F. : 1969. Introduction à la géophysique. Masson.

LAFFITTE P. : 1972. Traité d'informatique géologique. Masson.

LASFARGUES P. : 1966. Magnétisme en géologie et prospection magnétique au sol. Masson.

LEBORGNE E. : 1955. Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. Annales de géophysique, 11, 399-419.

LEBORGNE E. : 1960. Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et celles du schiste et du granite. Annales de géophysique, 16, 159-194.

LLIBOUTRY L. : 1968. Cours de physique du BG2. Institut de glaciologie, Grenoble.

NAGATA T. : 1961. Rock magnetism. Maruzen Co., Tokyo, 350 pages.

NAUDY H., CHASTENET DE GERY J. : 1957. Interprétation des anomalies gravimétriques et magnétiques. Geophysical prospecting, 5, 431-444.

NAUDY H. : 1970. Une méthode d'analyse fine des profils aéromagnétiques. Geophysical Prospecting, 18.

NEEL L. : 1955. Some theoretical Aspects of Rock-magnetism. Advances in Physics, 4, 14, 191-243.

PARASNIS D.S. : 1973. Mining geophysics. Elsevier.

SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICIST'S : 1967. Mining geophysics. Tome 1, chapitre 3.

STACEY F.D., BARNEJEE S.K. : 1974. The physical principles of rock magnetism. Elsevier.

VIGNES J., LAPORTE M. : 1969. Théorie et pratique de la programmation. FORTRAN. IFP, Technip.

ETUDES GEOLOGIQUES

BETEKHTINE A. : 1968. Manuel de minéralogie descriptive. Mir, Moscou.

BORDET C. : 1957. Recherches géologiques de la partie septentrionale du massif de Belledonne. Thèse Ingénieur Docteur, Paris.

BOUDON J., GAMOND J.F., GRATIER J.P., ROBERT J.P., DEPARDON J.P., GAY M., RUHLAND M., VIALON P. : 1976. L'arc alpin occidental : orientation de structures primitivement Est-Ouest par glissement et étirement dans un système de compression Nord-Sud. Eclogae Helveticae, 509-519.

CABROL B. : 1967. Etude géologique et minière du massif des Hurtières. Chaîne de Belledonne (Savoie). Thèse Docteur Spécialité, Grenoble.

CAILLAUX A. : 1875. Aperçu de la richesse minérale de France. Librairie Polytechnique, Paris.

CARME F. : 1971. Compte-rendus des séances de l'Académie des Sciences. Série D, 273, 1771-1774.

COURT P. : 1971. Géologie et gîtologie de la Basse-Maurienne. Thèse Docteur Spécialité, Grenoble.

LACROIX A. : 1962. Minéralogie de la France, Librairie Blanchard.

ROBERT J.P. : 1976. Les décrochements, fracturations et mouvement de blocs associés. Exemple des massifs subalpins dauphinois. Thèse Docteur Spécialité, Grenoble.

VIALON P., RUHLAND M., GROLLIER J. : 1976. Eléments de tectonique analytique. Masson.

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 10 février 1977

Le Président de la thèse

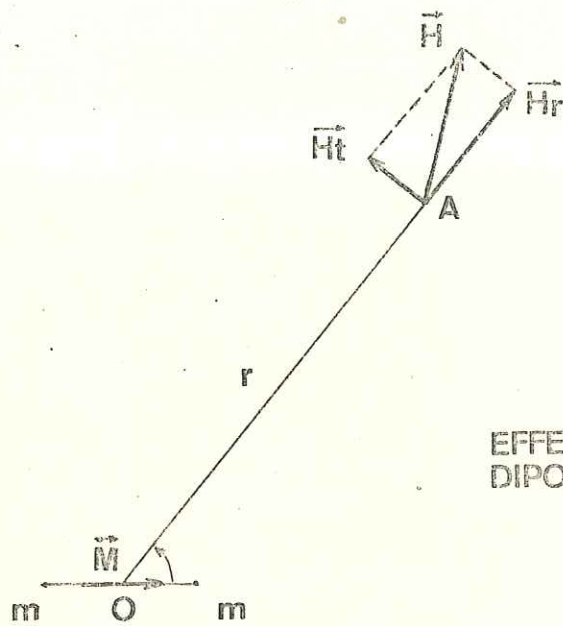


VU, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

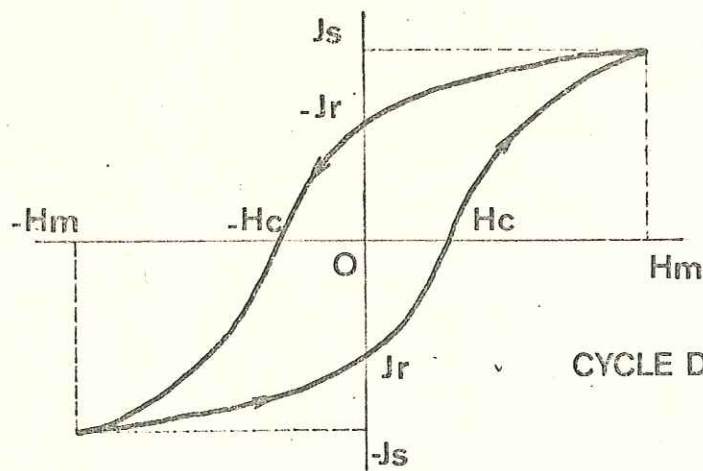
Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

G. CAU



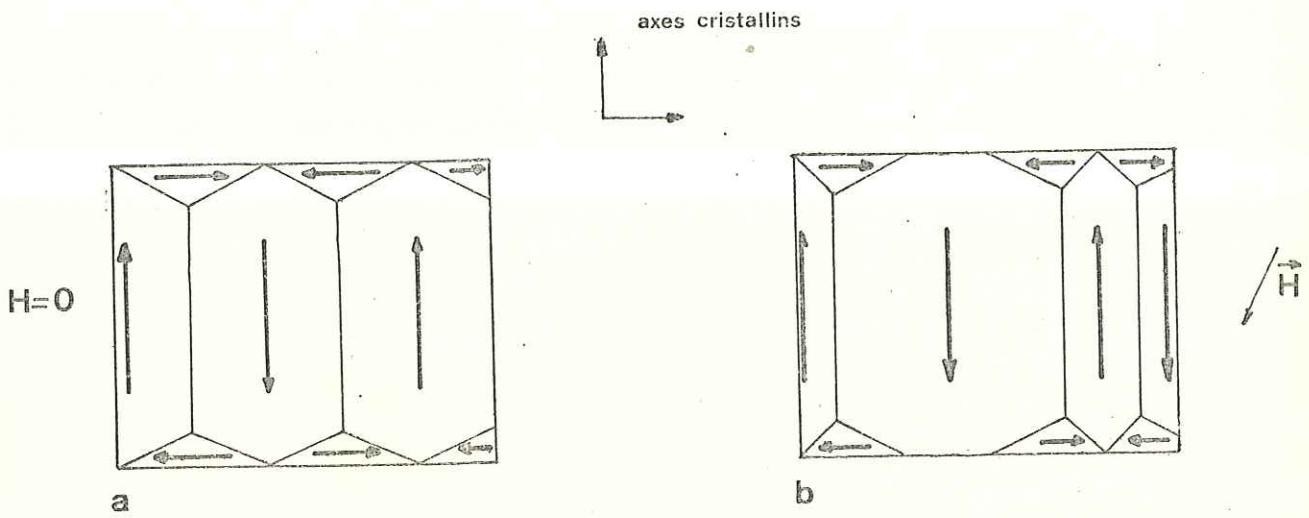
EFFET D'UN
DIPOLE MAGNETIQUE

fig1

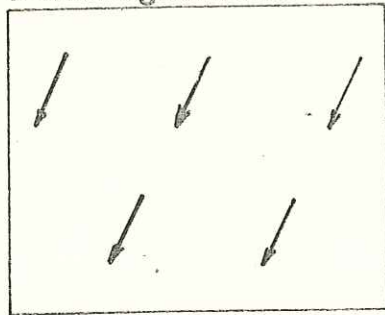


CYCLE D'HYSTERESIS

fig2



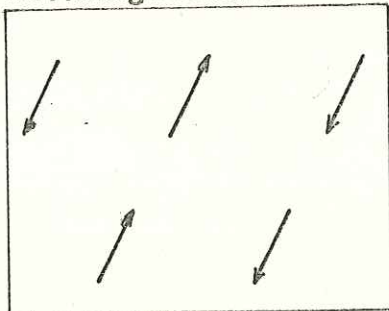
ferromagnétisme



c

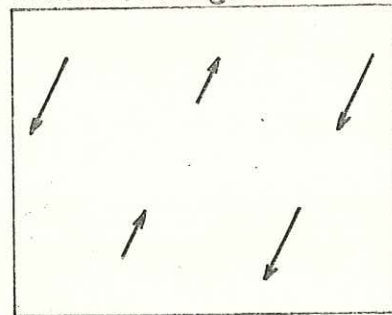


ferrimagnétisme



d

antiferromagnétisme



e

fig 3

ANISOTROPIE MAGNETOCRISTALLINE

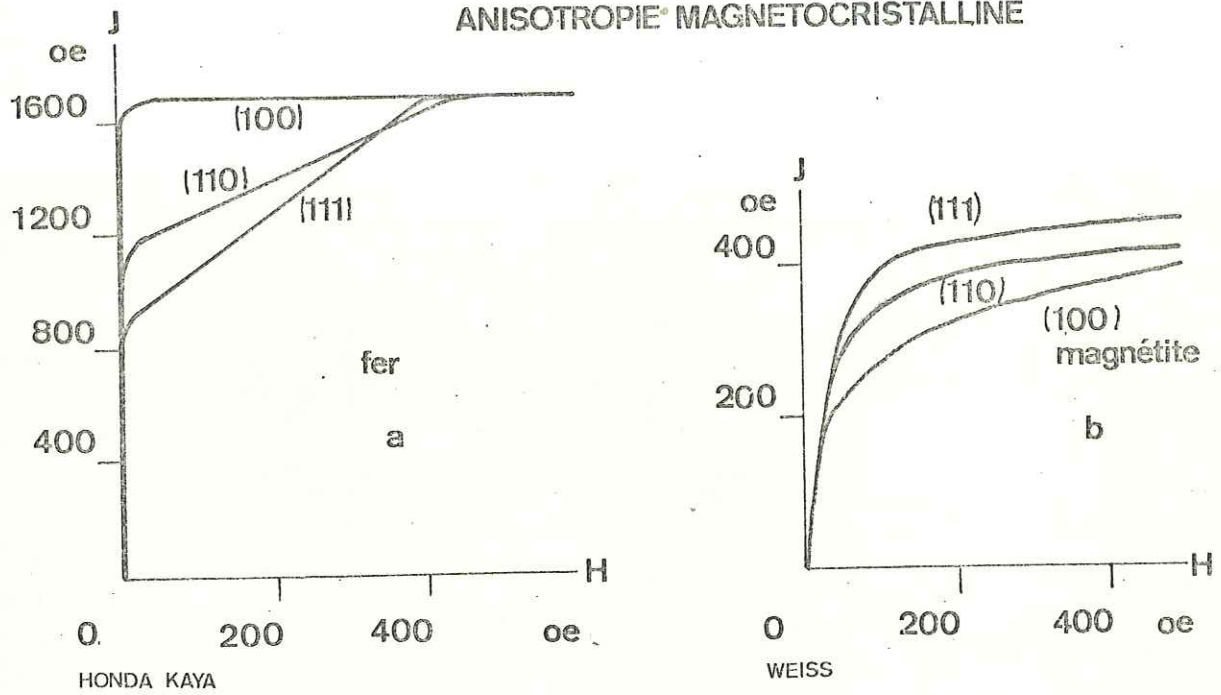


fig 4

MAGNETOSTRICTION

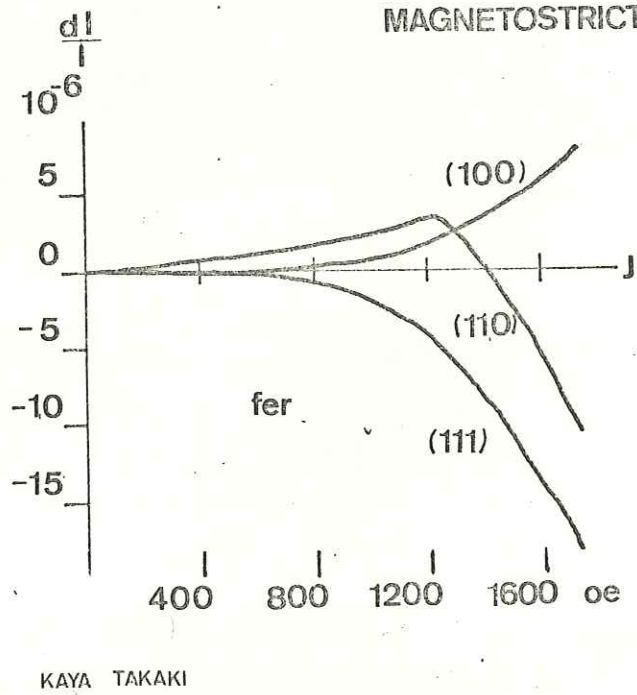
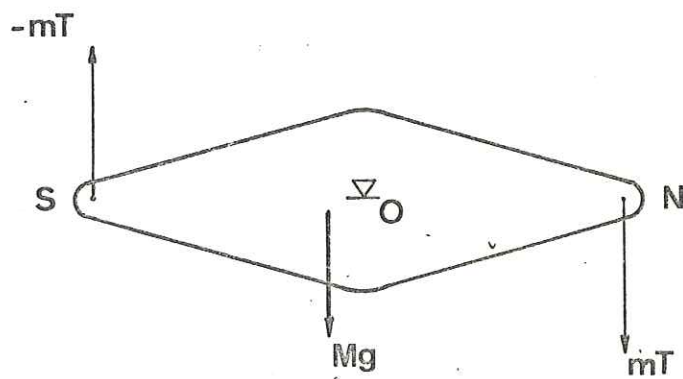
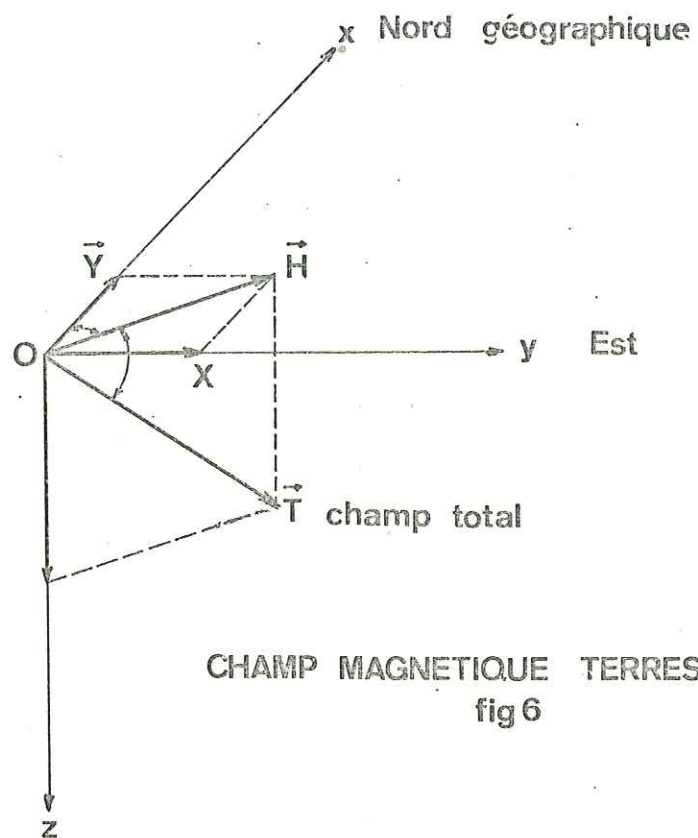


fig 5



balance de SCHIMDT

fig 7

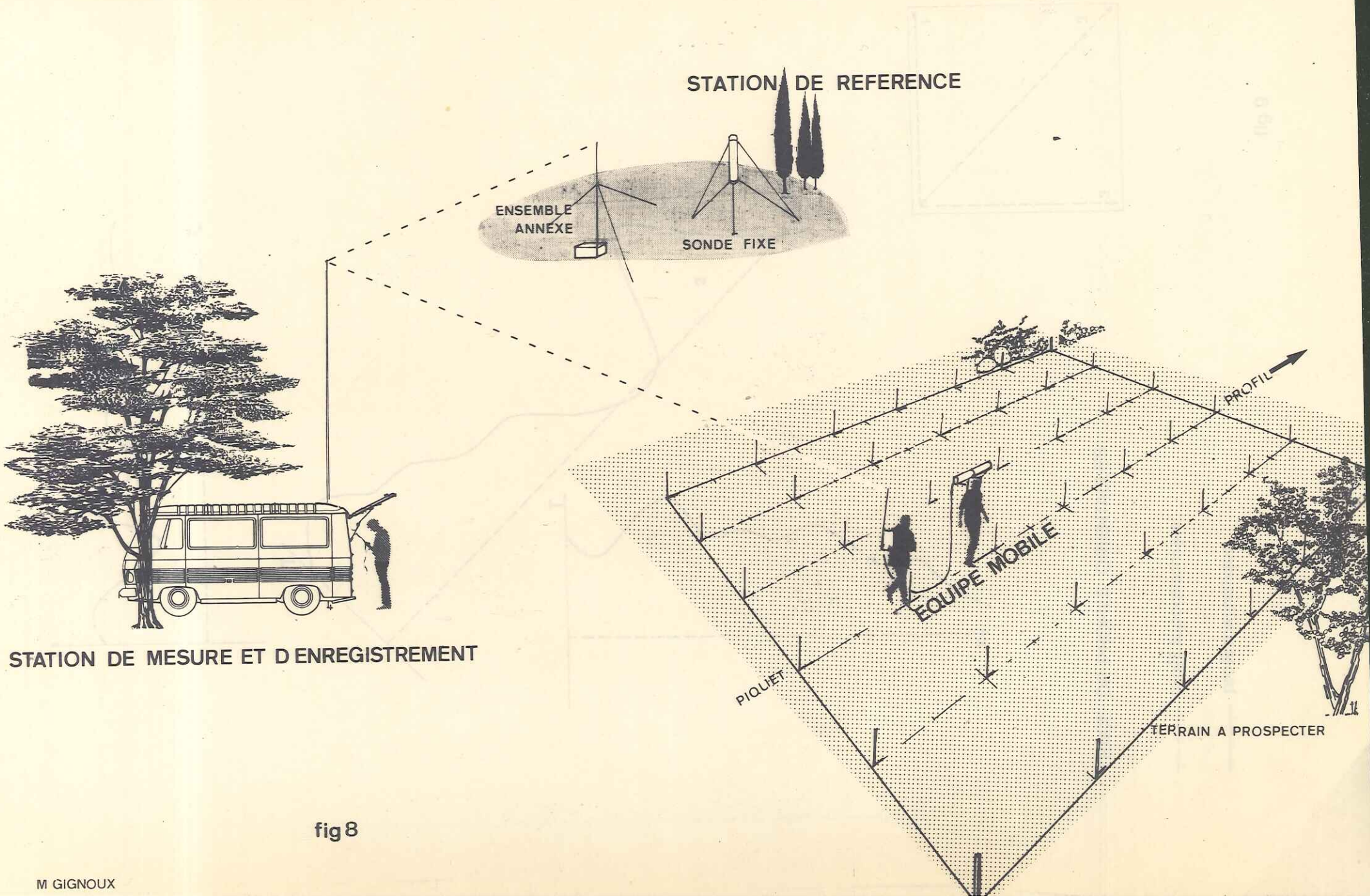
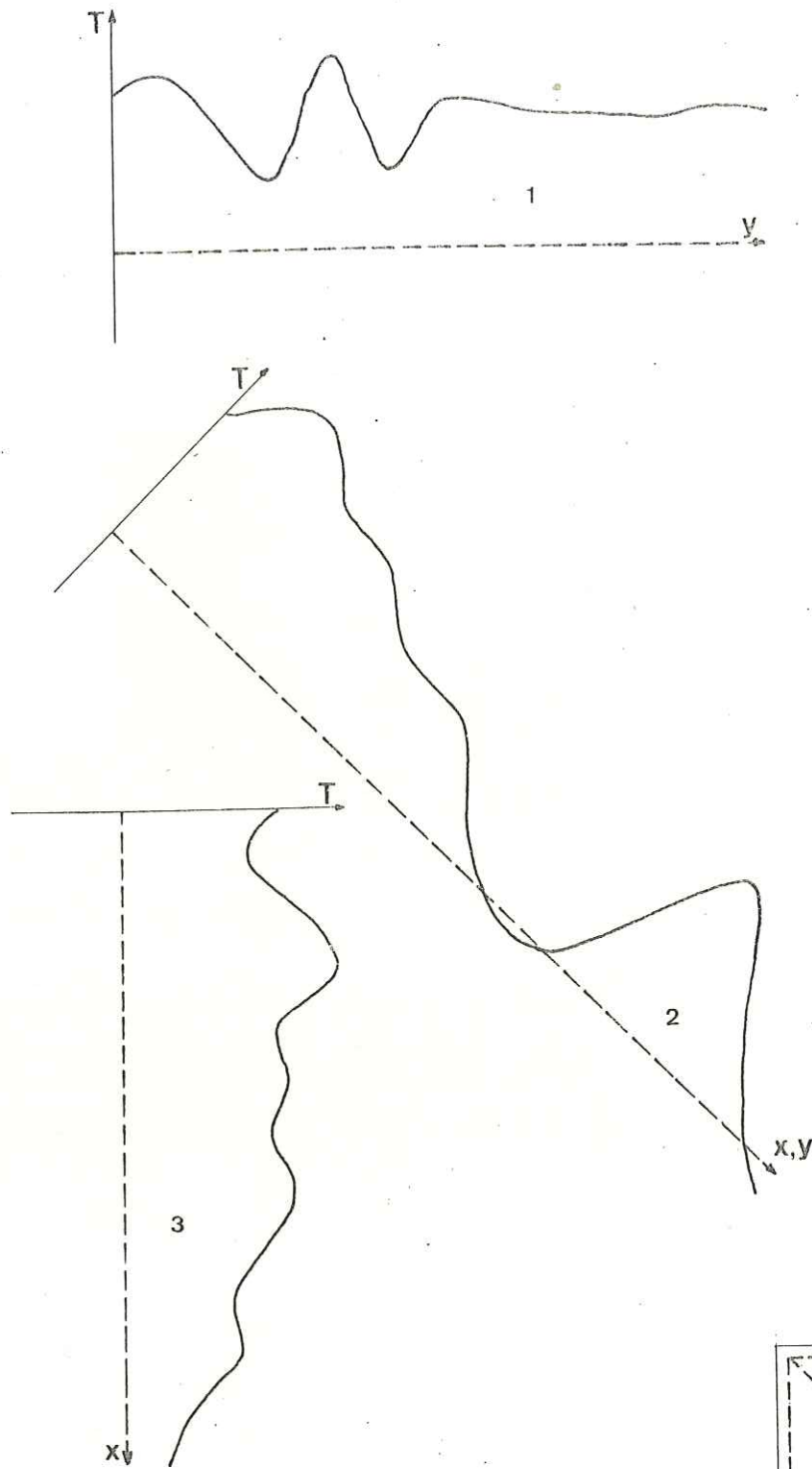


fig 8



TRACE DE PROFILS ORIENTABLES

----- profil topographique

———— profil magnétique

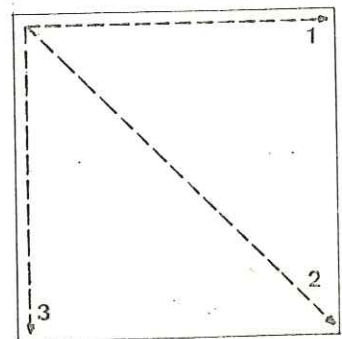
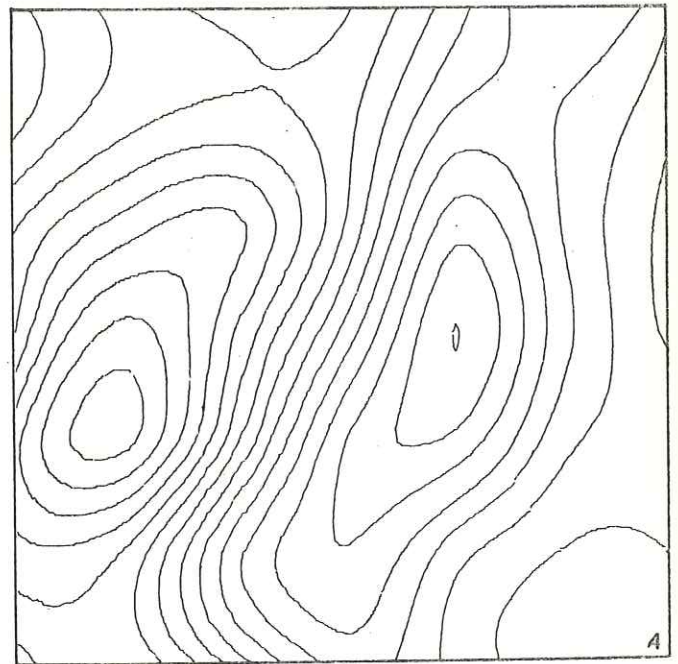
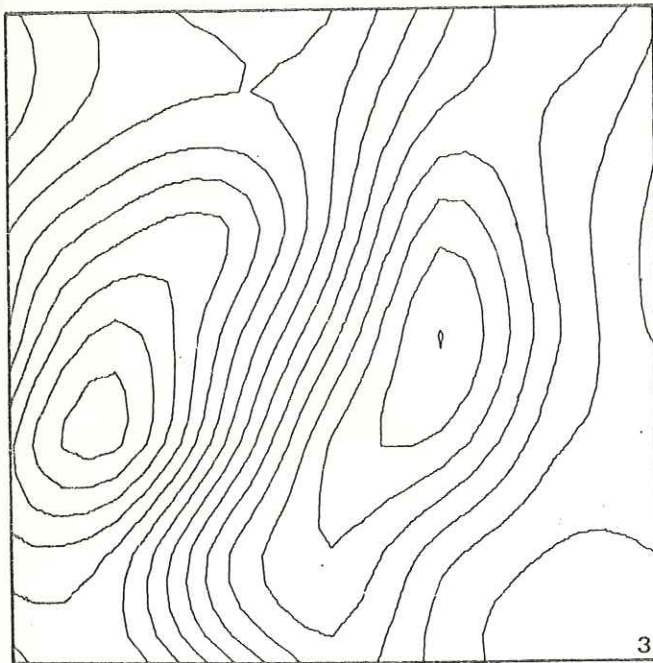
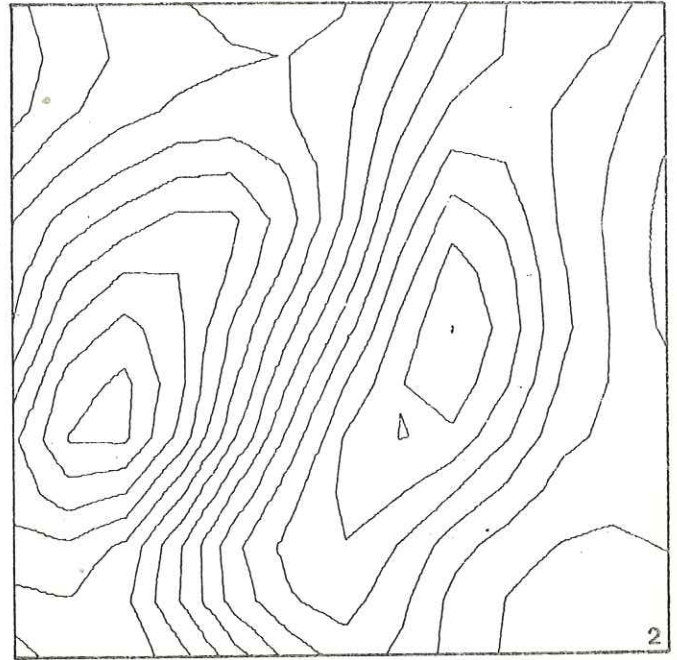
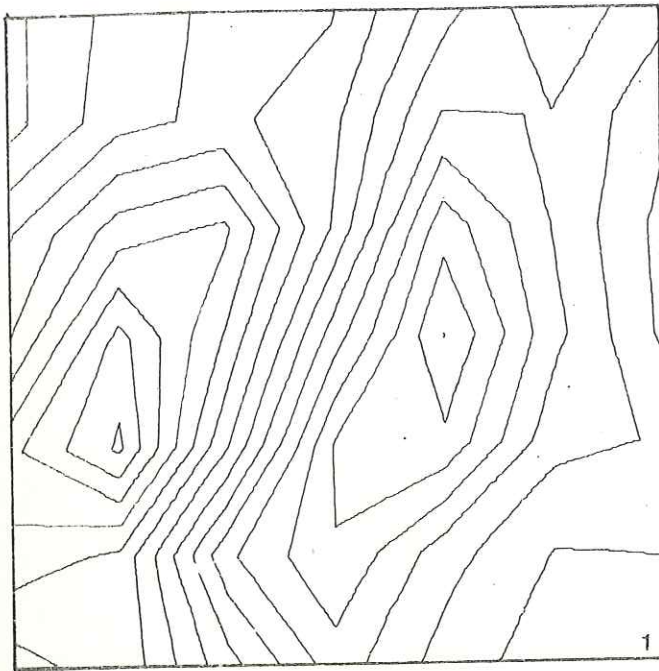


fig 9



LISSAGE DES ISOGAMMES PAR DOUBLAGE

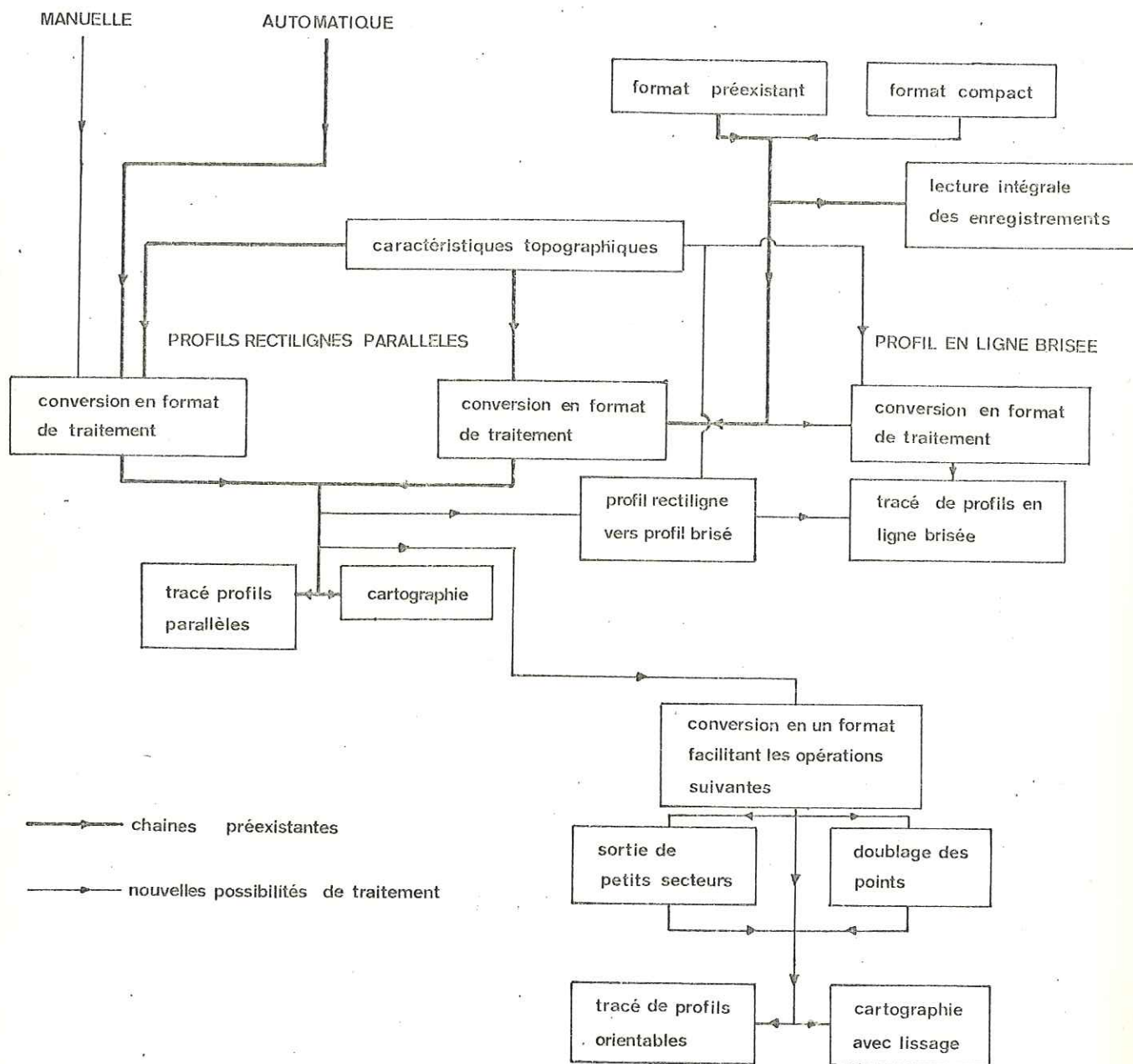
- 1: maille de 5×5 ; 49 points
- 2: maille de $2,5 \times 2,5$; 169 points
- 3: maille de $1,25 \times 1,25$; 625 points
- 4: maille de $0,62 \times 0,62$; 2401 points

0 mètres 10

fig 10

PRISE DE MESURES POINT PAR POINT

PRISE DE MESURES CONTINUE ET AUTOMATIQUE



CHAINES DE TRAITEMENT PAR ORDINATEUR D'UNE CAMPAGNE DE MESURES DE CHAMP OU DE DIFFERENCE DE CHAMPS MAGNETIQUES

fig11

CHAMPFIARD SAINT-LEGER
PROFILS MAGNETIQUES

908.0

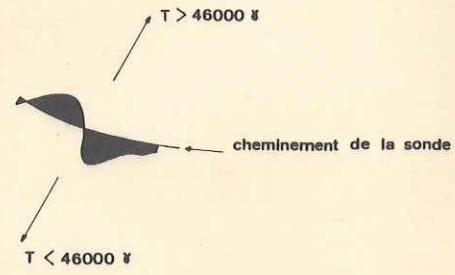
357.0

0 mètres 50

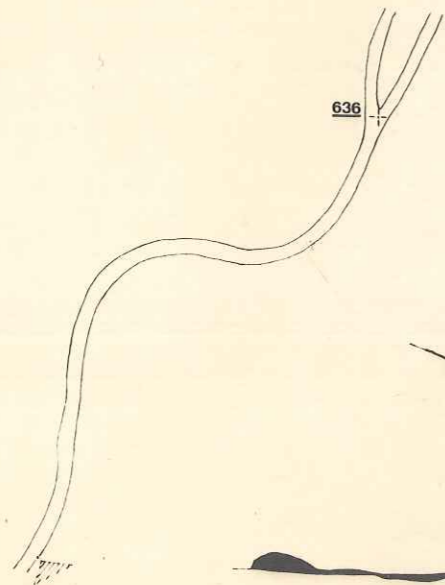
N.m.

fig 14

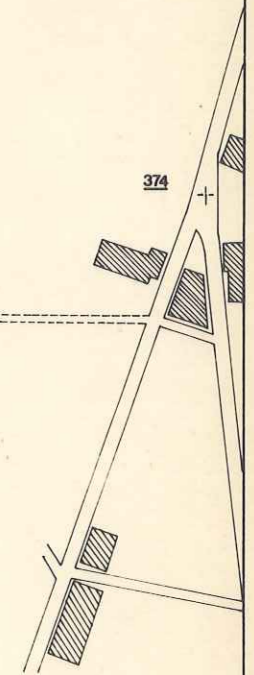
908.5



332 nom du profil



374



CHAMPIARD SAINT-LEGER 908.0

(LA ROCHETTE 6)

1975

0 mètres 50

Nm

357,0

357,0

LEVES TOPOGRAPHIQUES AVEC
C. CARLE R. MARIE J.L. RASTELLO












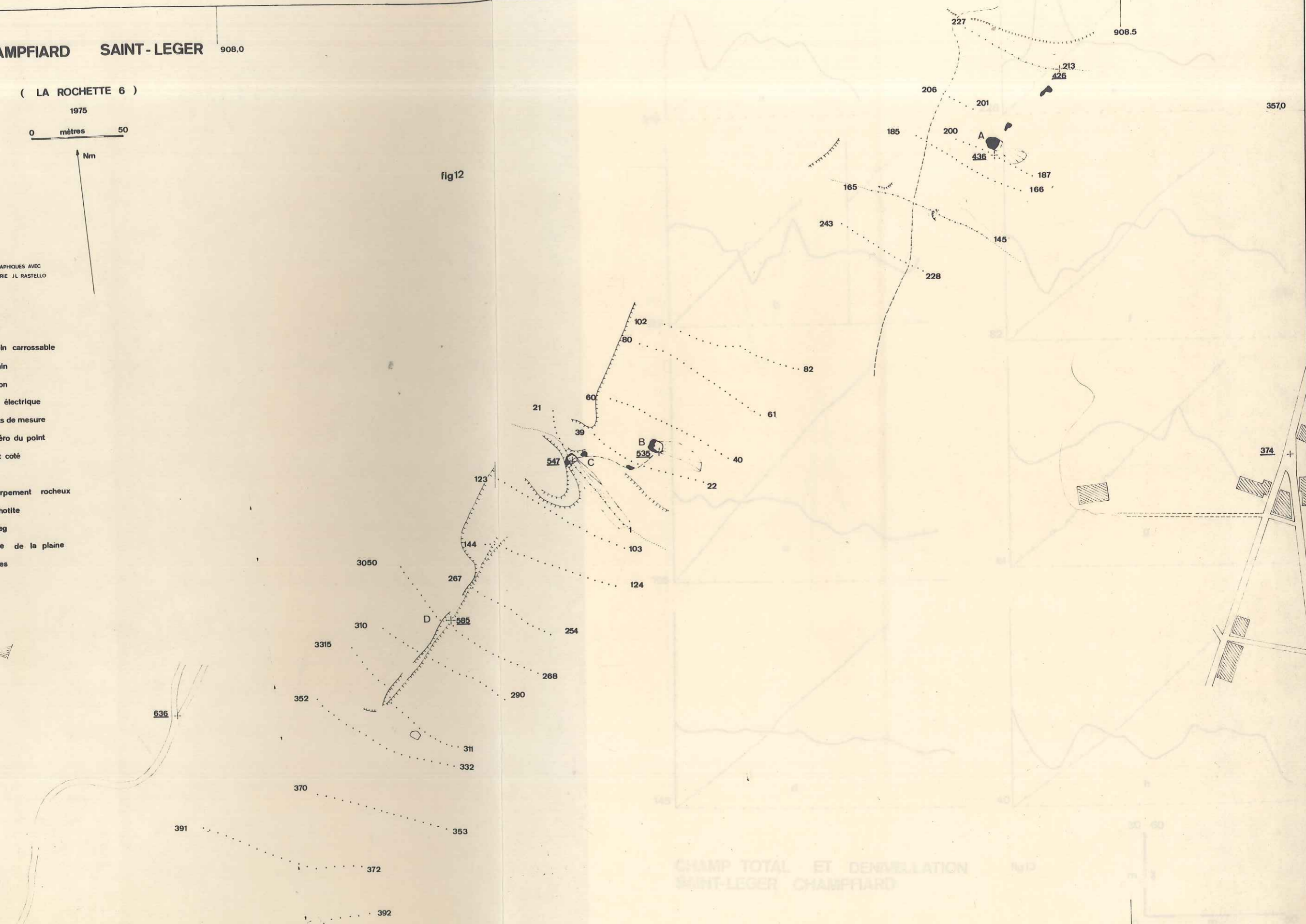
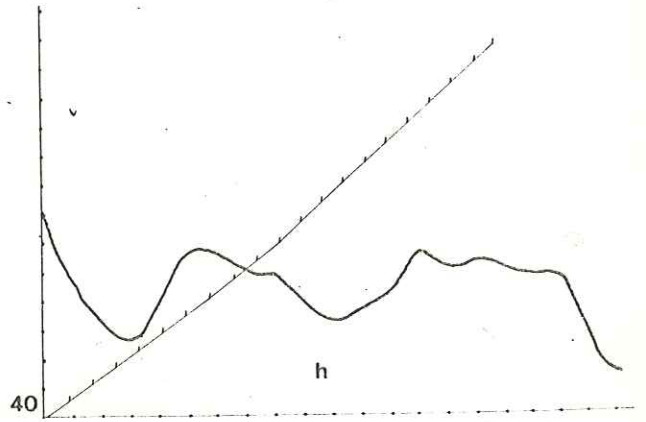
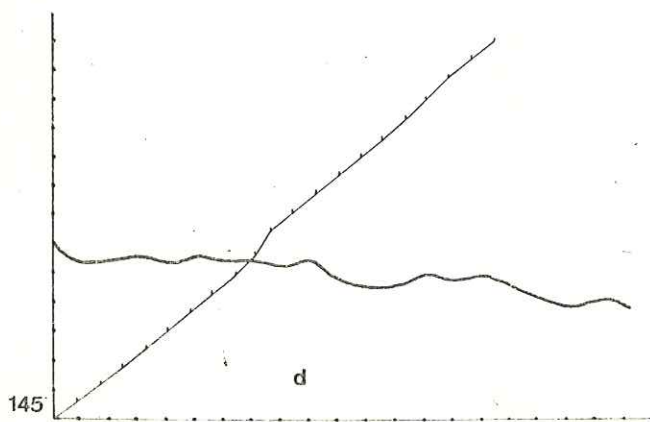
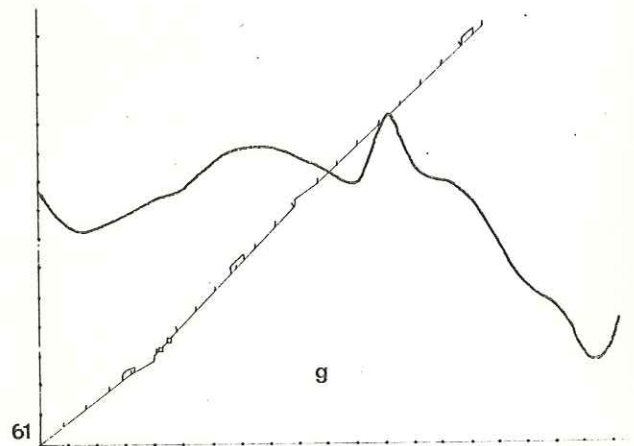
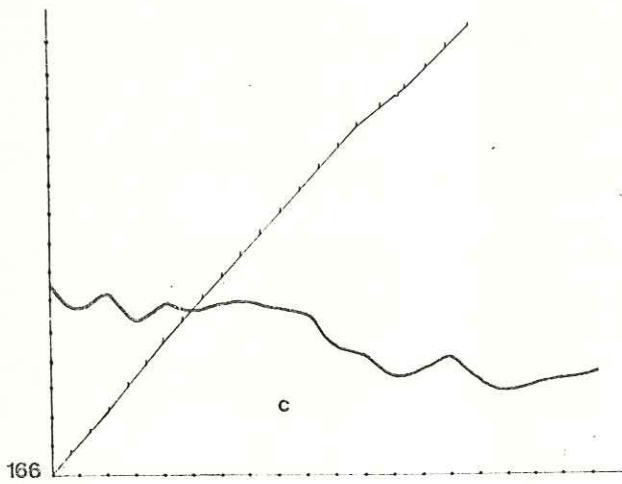
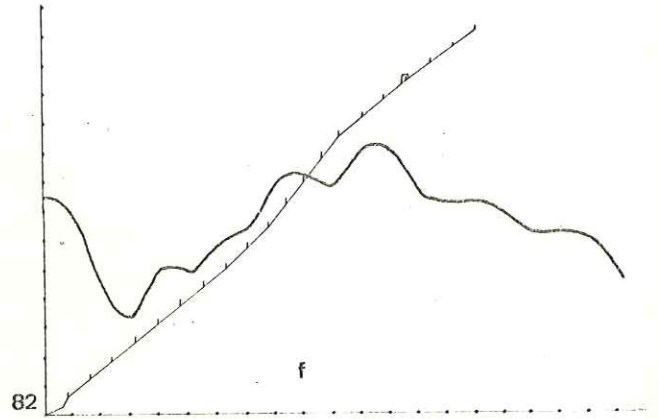
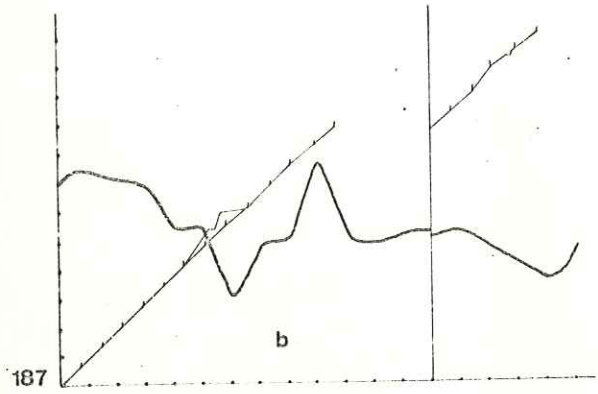
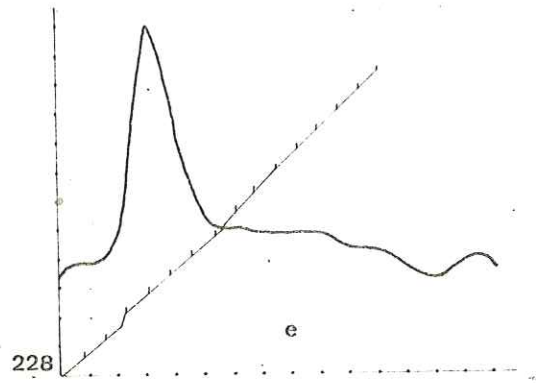
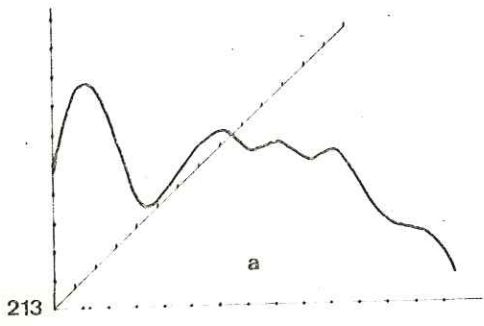
-  route
-  chemin carrossable
-  chemin
-  maison
-  ligne électrique
-  points de mesure
- 144 numéro du point
- 374 point coté
- +
-  escarpement rocheux
-  pyrrhotite
-  talweg
-  limite de la plaine
-  haldes

fig12

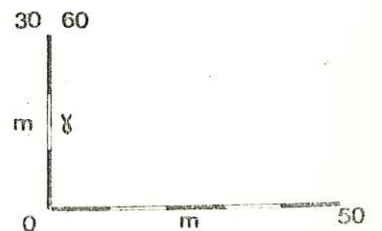


CHAMP TOTAL ET DENIVELLATION
SAINT-LEGER CHAMPIARD



CHAMP TOTAL ET DENIVELLATION
SAINT-LEGER CHAMPIARD

fig13



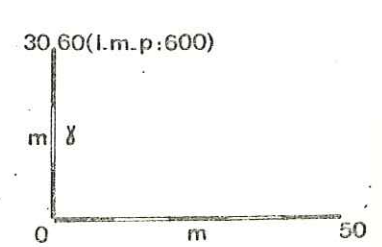
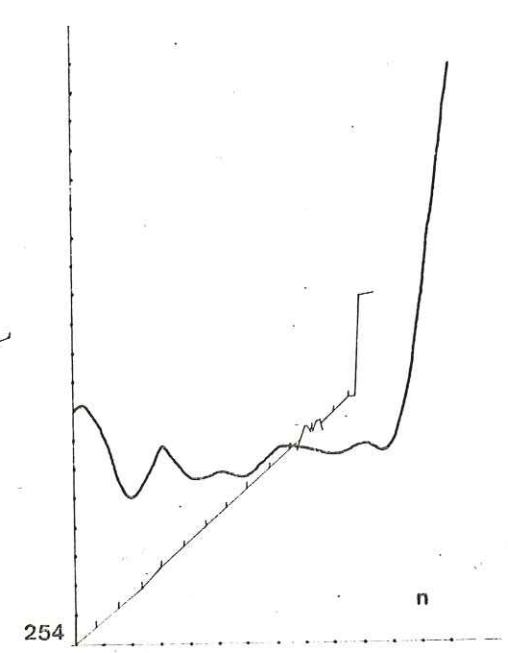
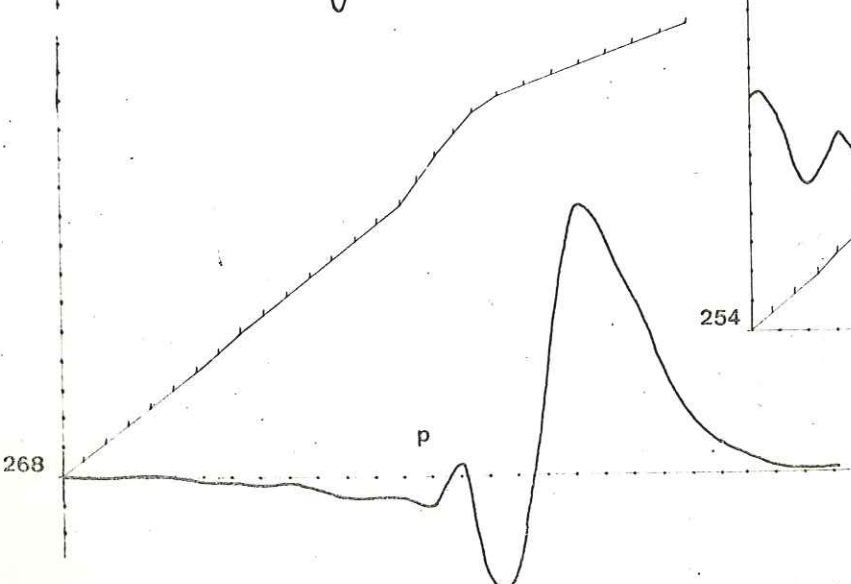
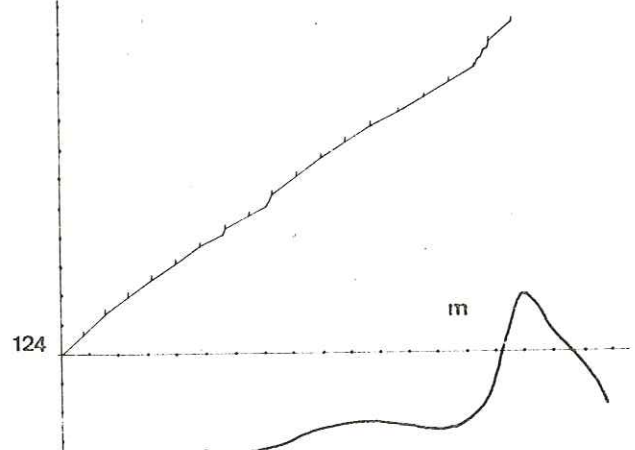
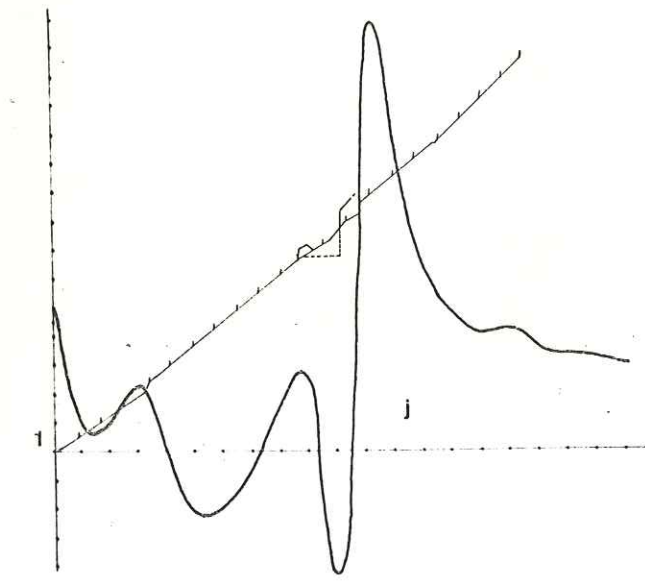
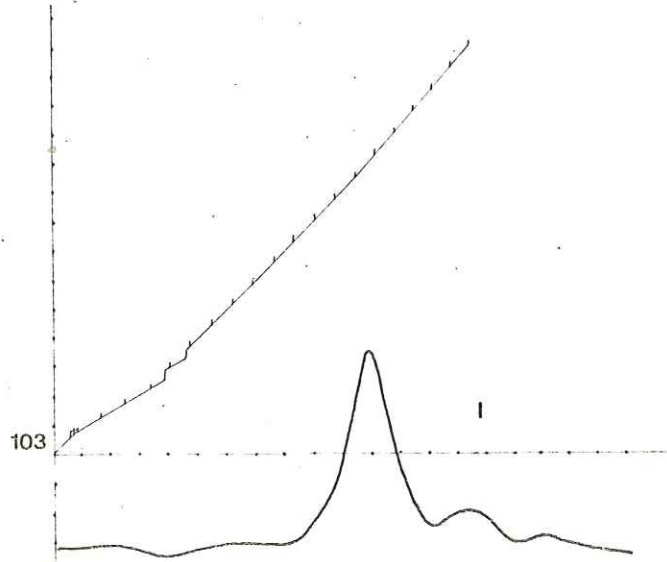
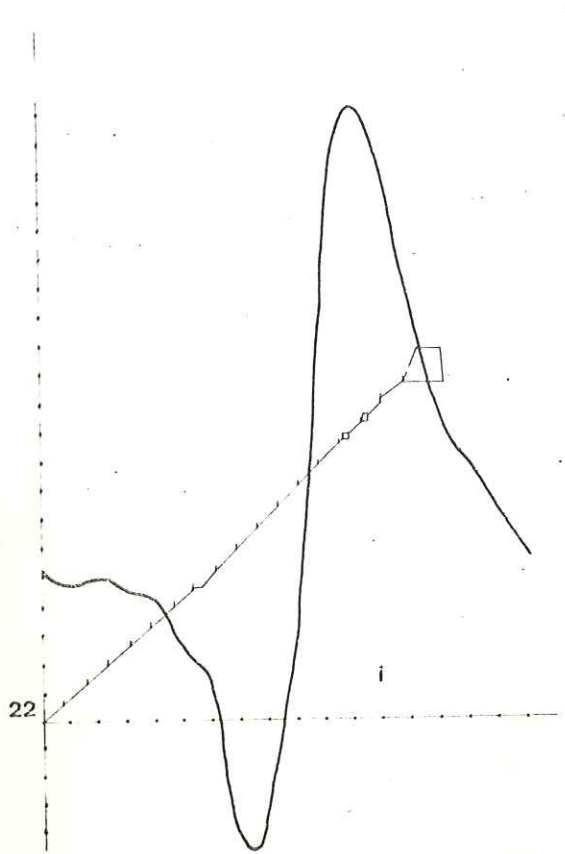


fig13 suite

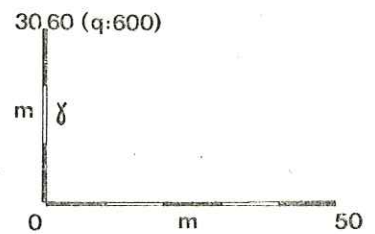
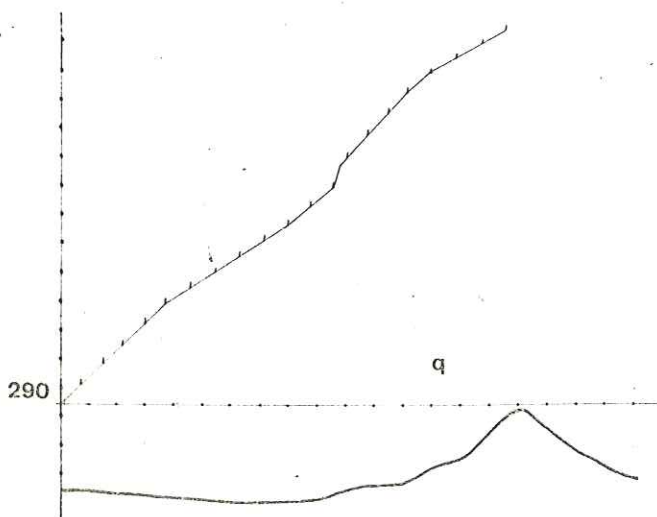
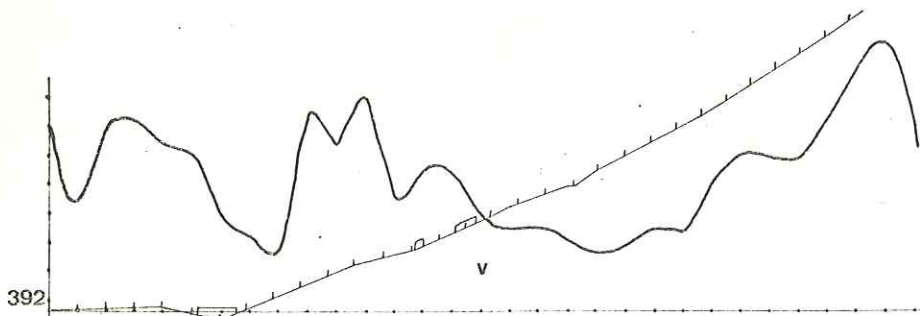
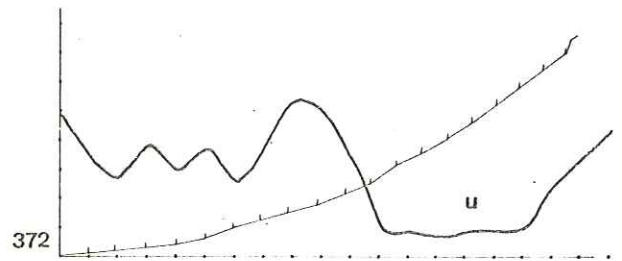
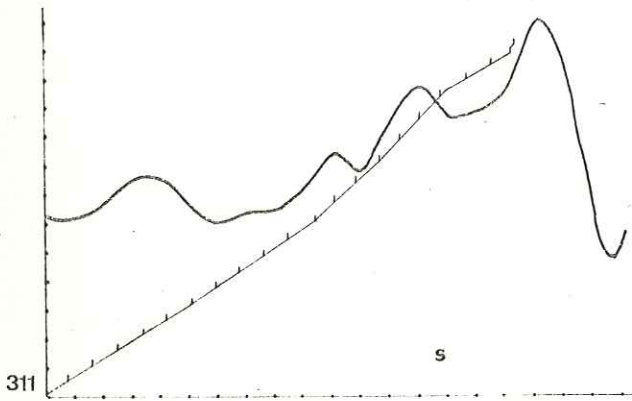
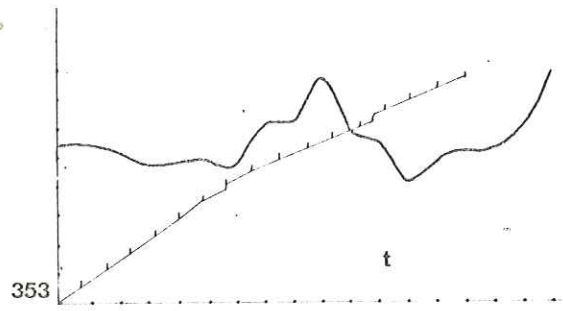
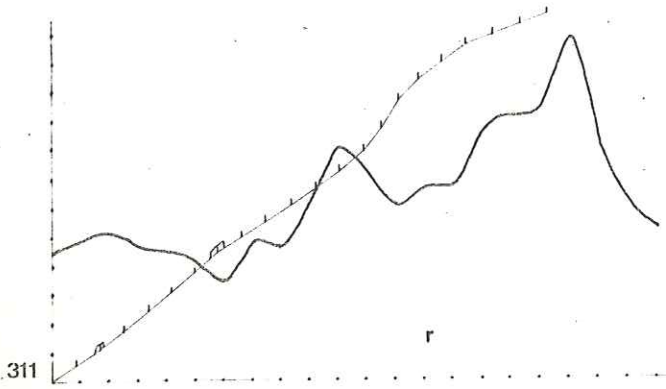
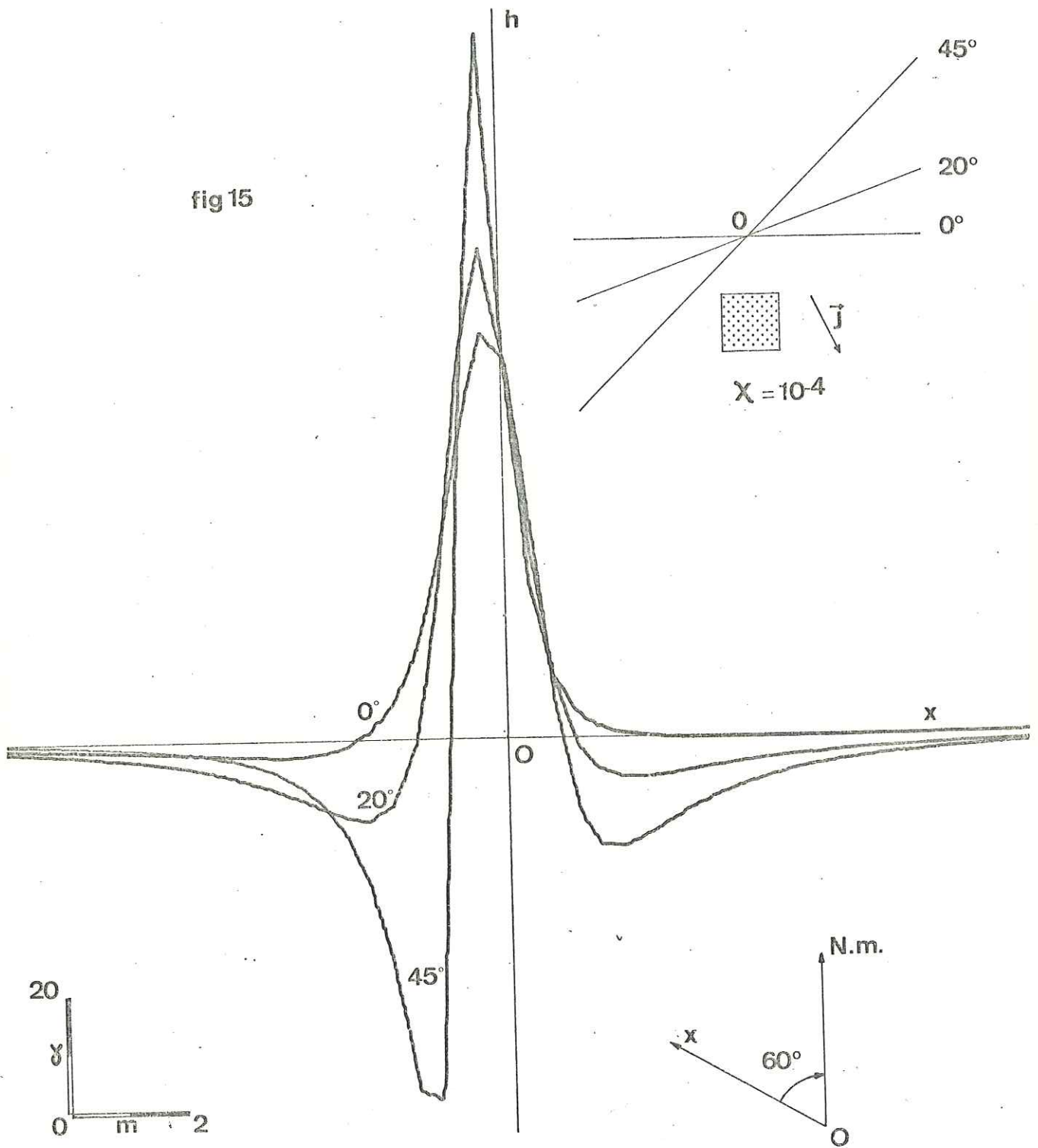


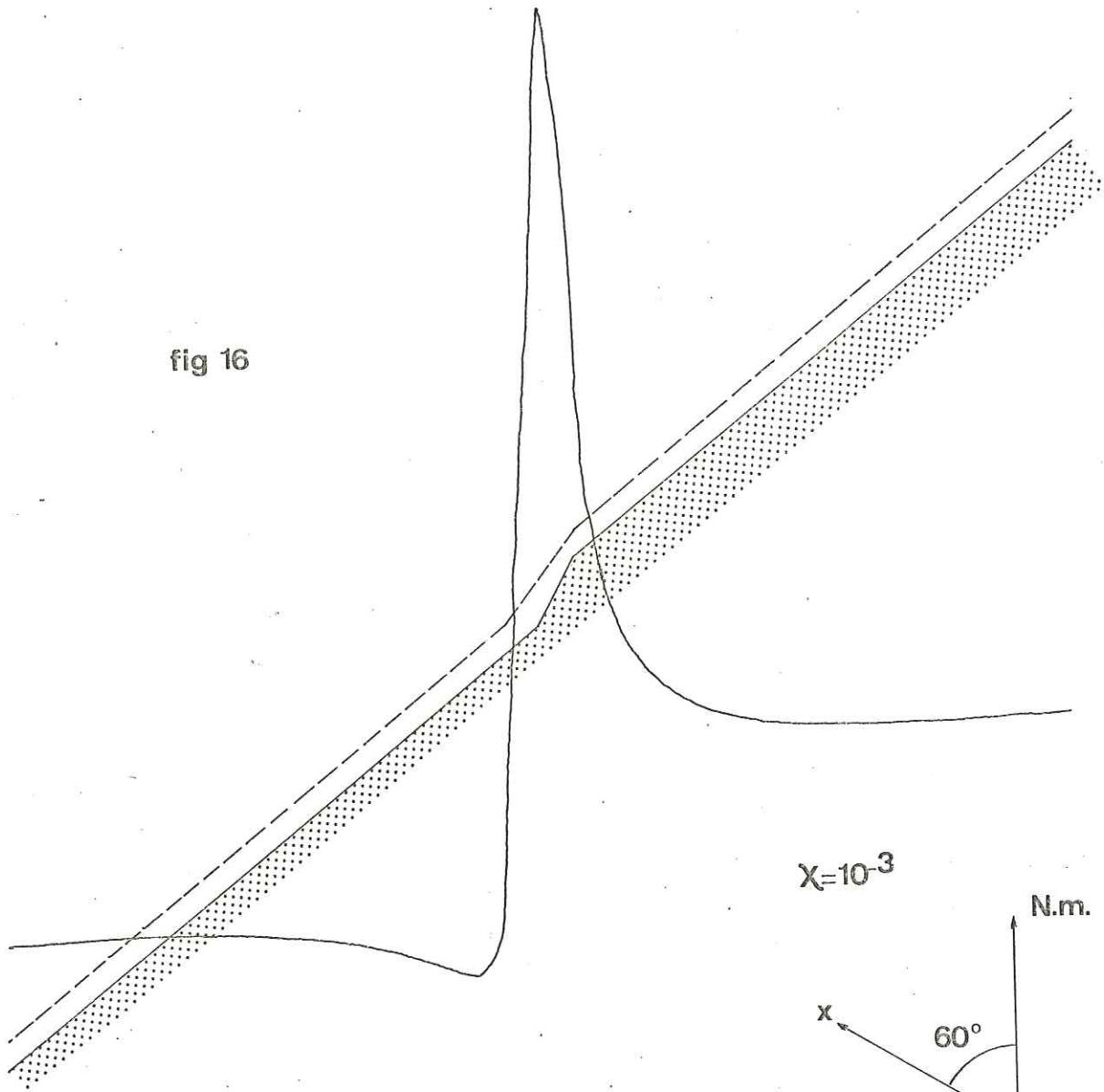
fig13 fin

fig 15

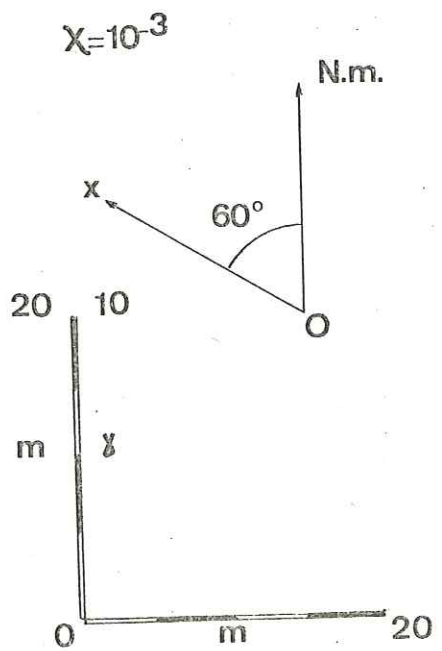


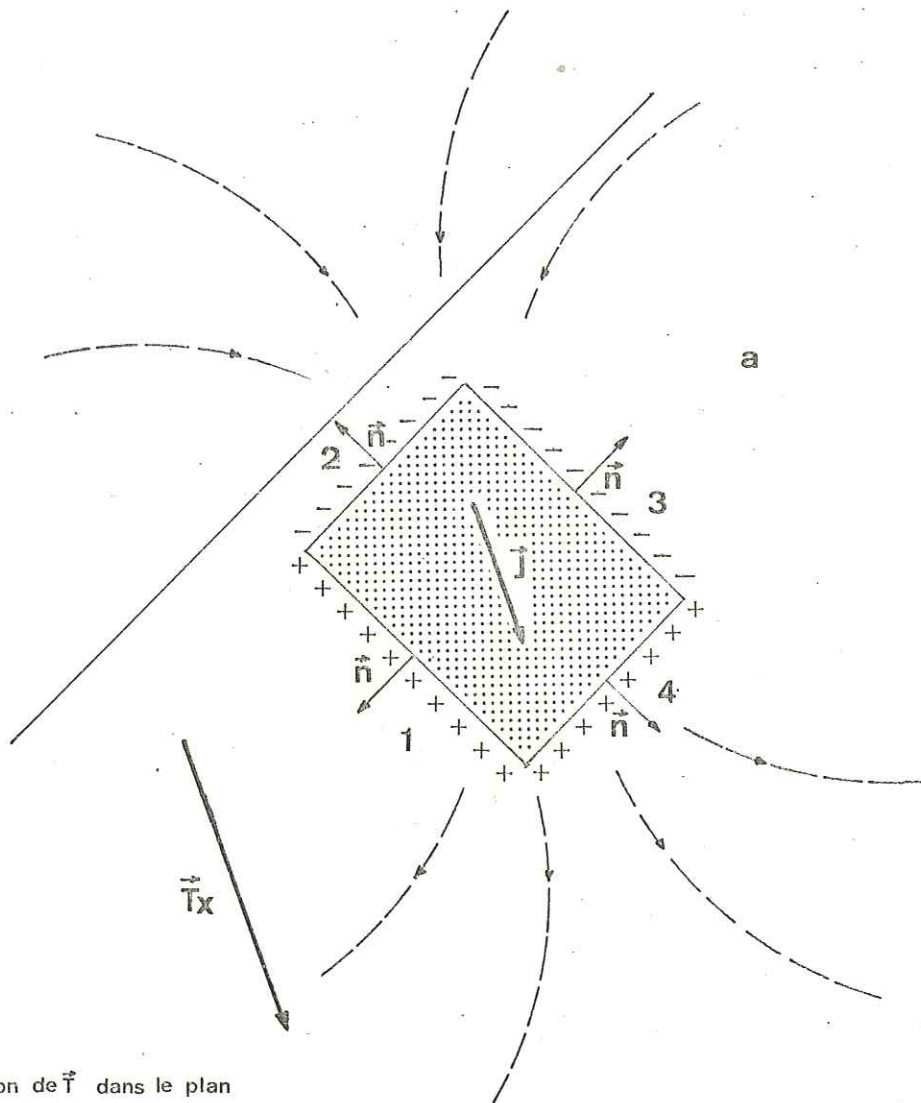
INCLINAISON DU PROFIL

fig 16



RUPTURE DE PENTE





$\vec{T}_x =$ projection de \vec{T} dans le plan vertical contenant le profil

EFFETS MAGNETIQUES
D UNE STRUCTURE
DANS UN CHAMP \vec{T} .

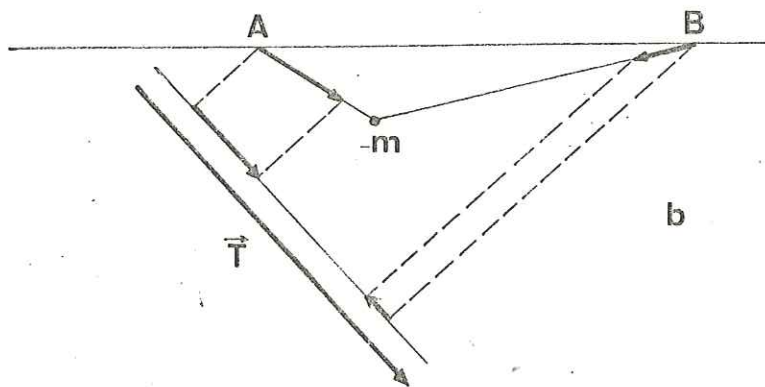
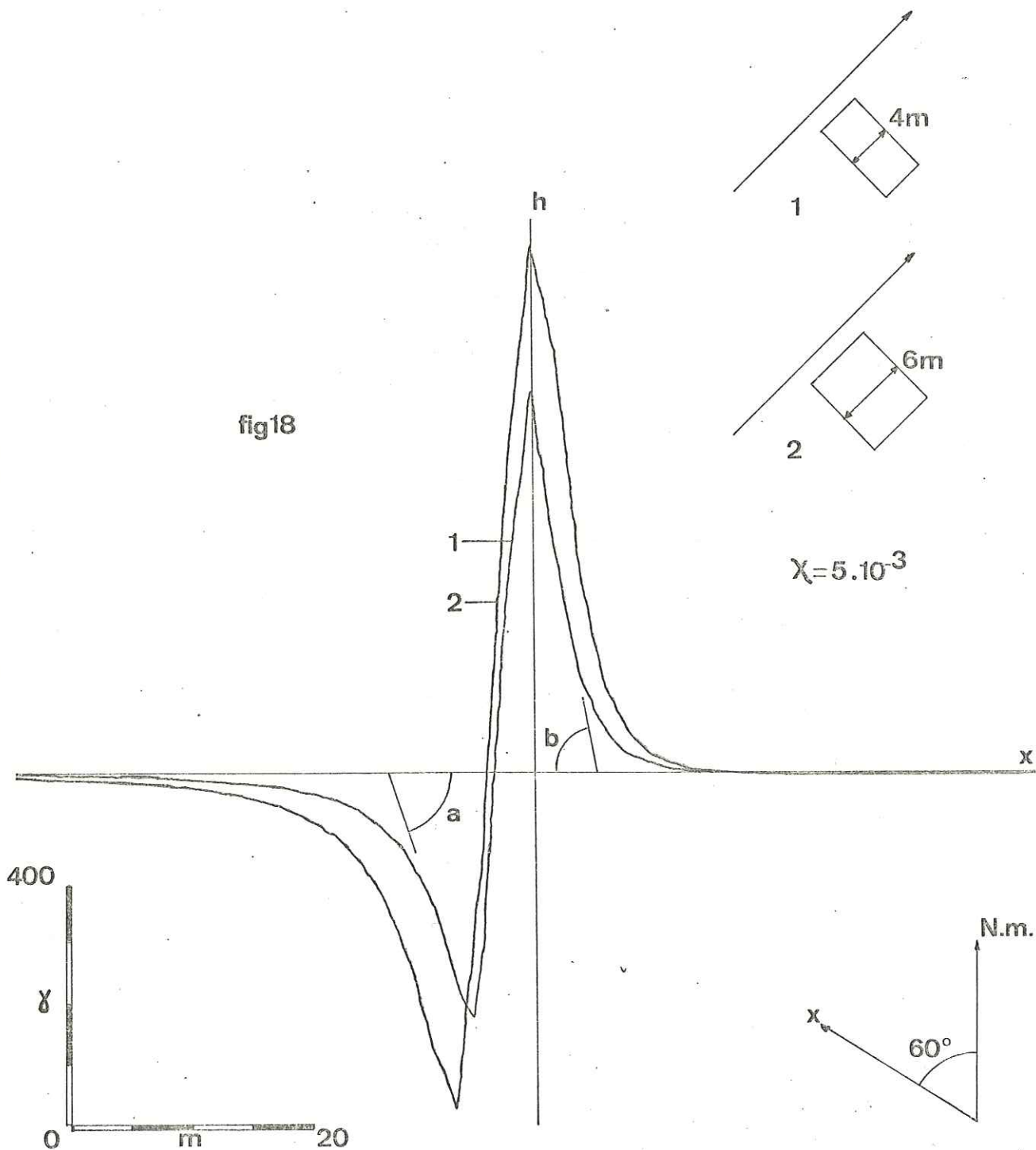
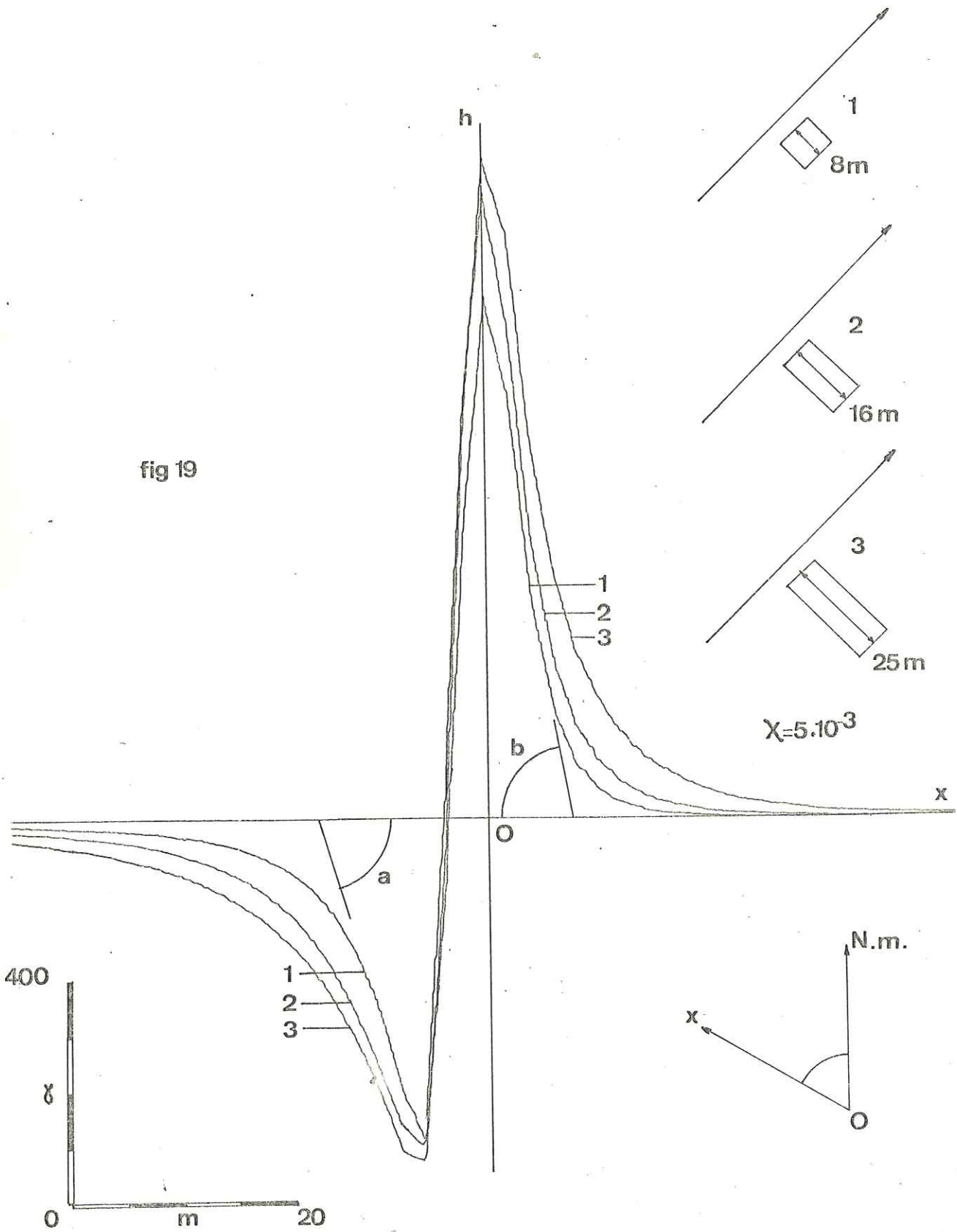


fig 17

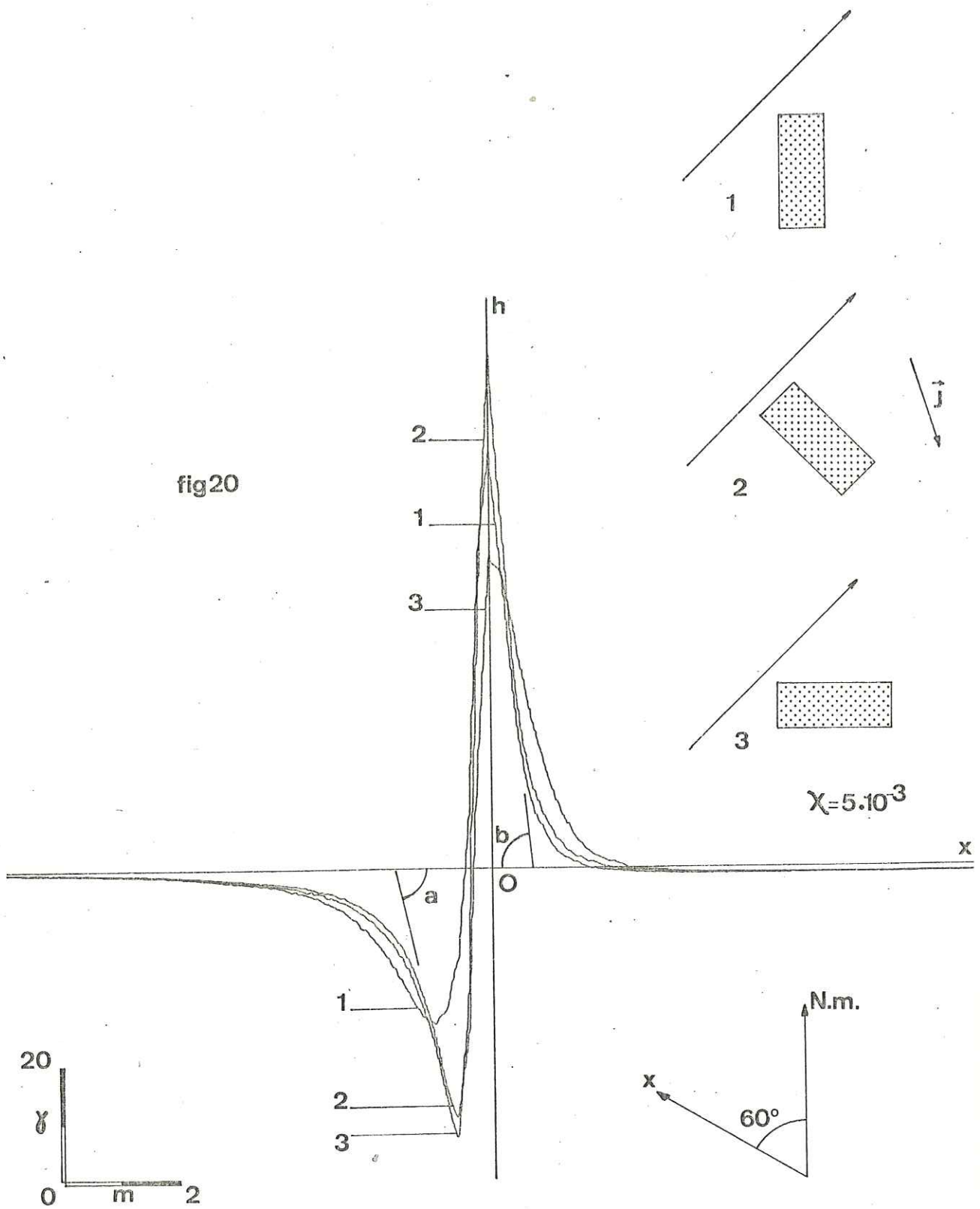
fig18



PUISSANCE DE LA STRUCTURE MINERALISEE

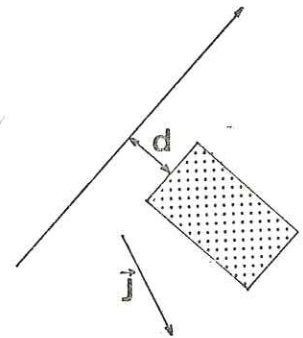


EXTENSION DE LA STRUCTURE MINERALISEE



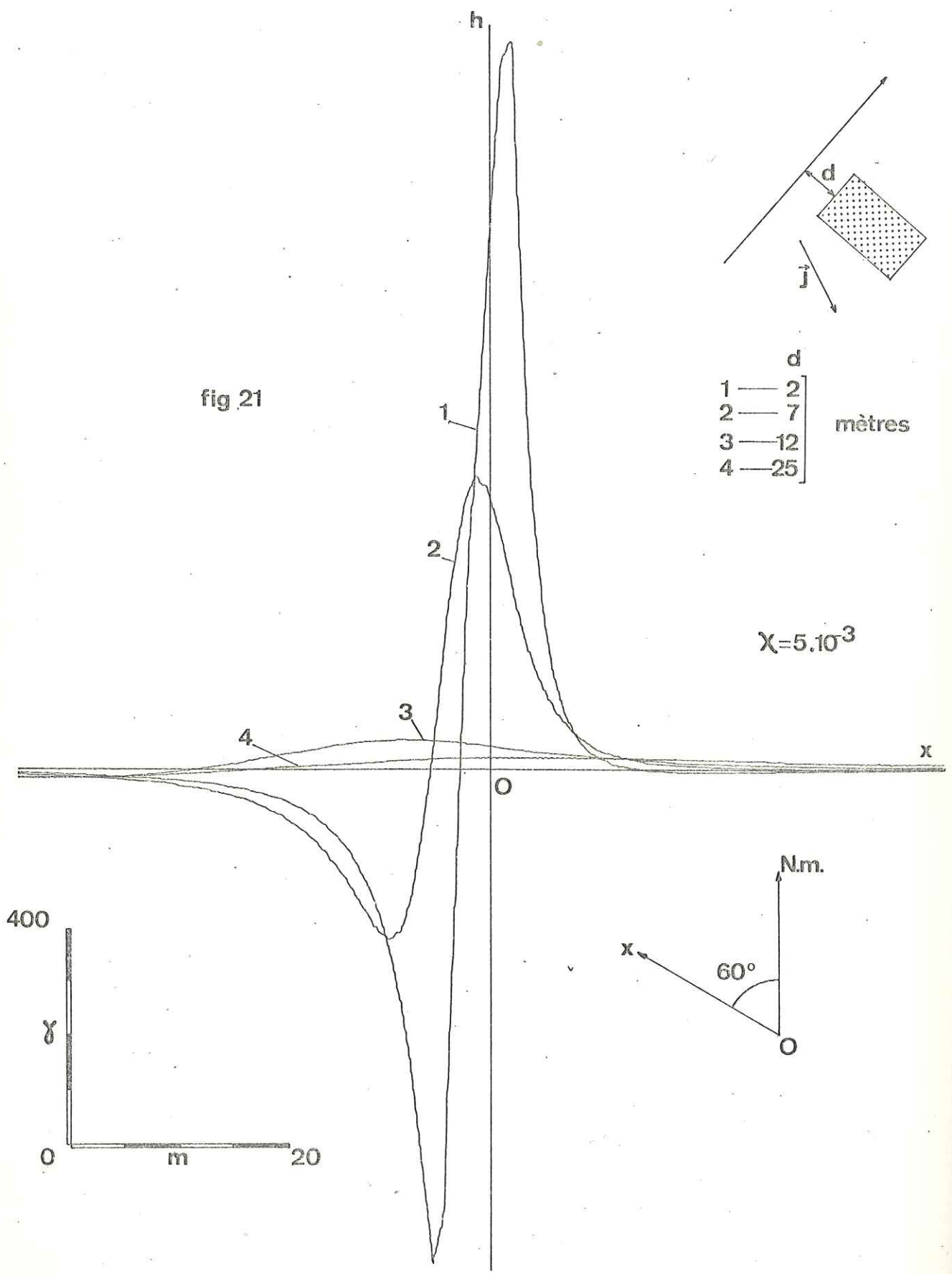
PENDAGE DE LA STRUCTURE MINERALISEE

fig 21



- | | | |
|---|------|----------|
| | d | |
| 1 | — 2 |] mètres |
| 2 | — 7 | |
| 3 | — 12 | |
| 4 | — 25 | |

$\chi = 5 \cdot 10^{-3}$



DISTANCE POINT DE MESURE - SOURCE MAGNETIQUE

*mettre sur cette carte
niveau de la fig. 22b.*

*où est le
col de la Perche?*

PLAN
LACHA

FAILLE DU GRESVAUDAN

COL DU GRAND CUCHERON

PIC DE LA LOZE

NOGUILLAN

SYNCLINAL MEDIAN

FOYALLET

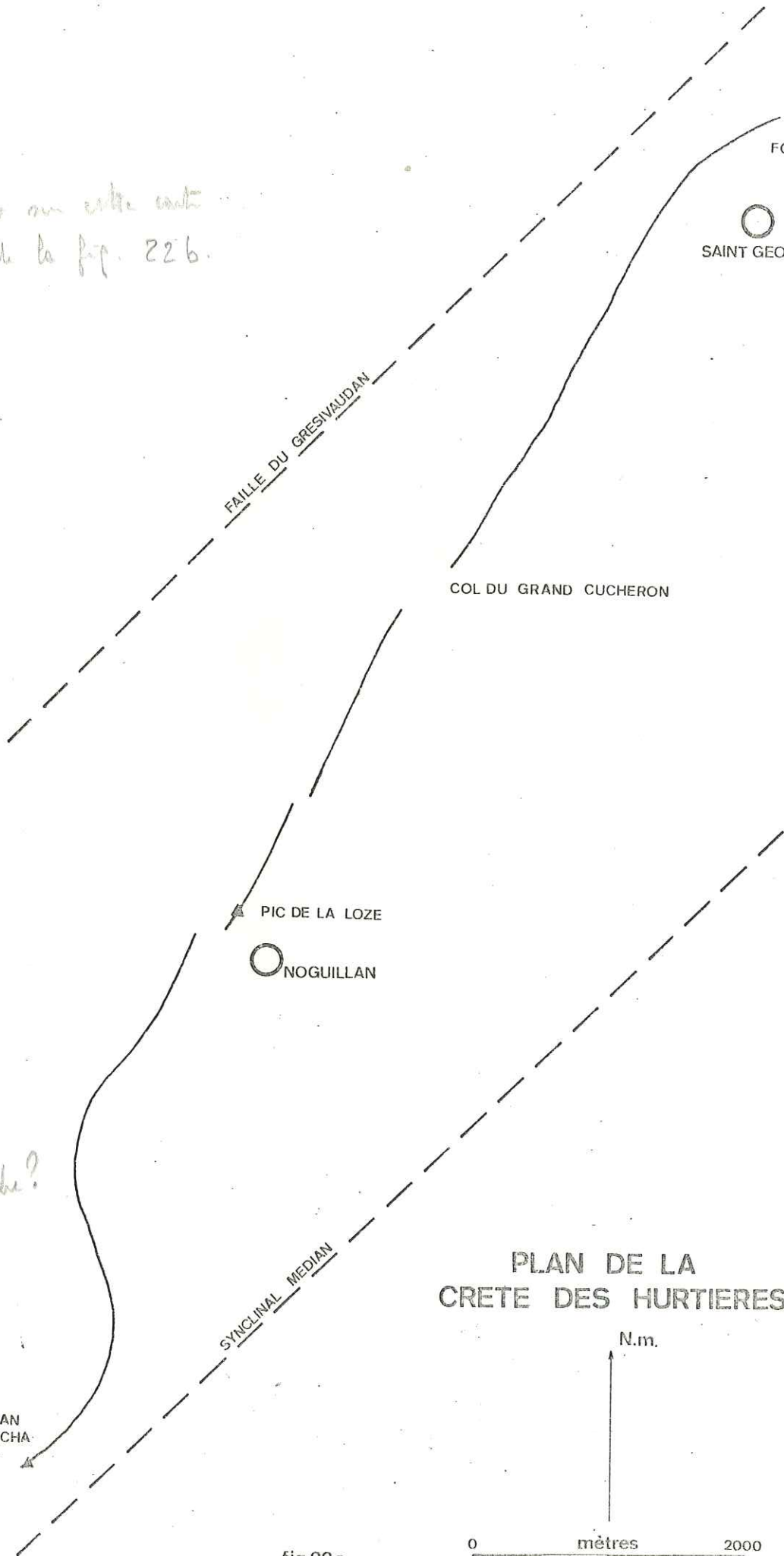
SAINT GEORGES

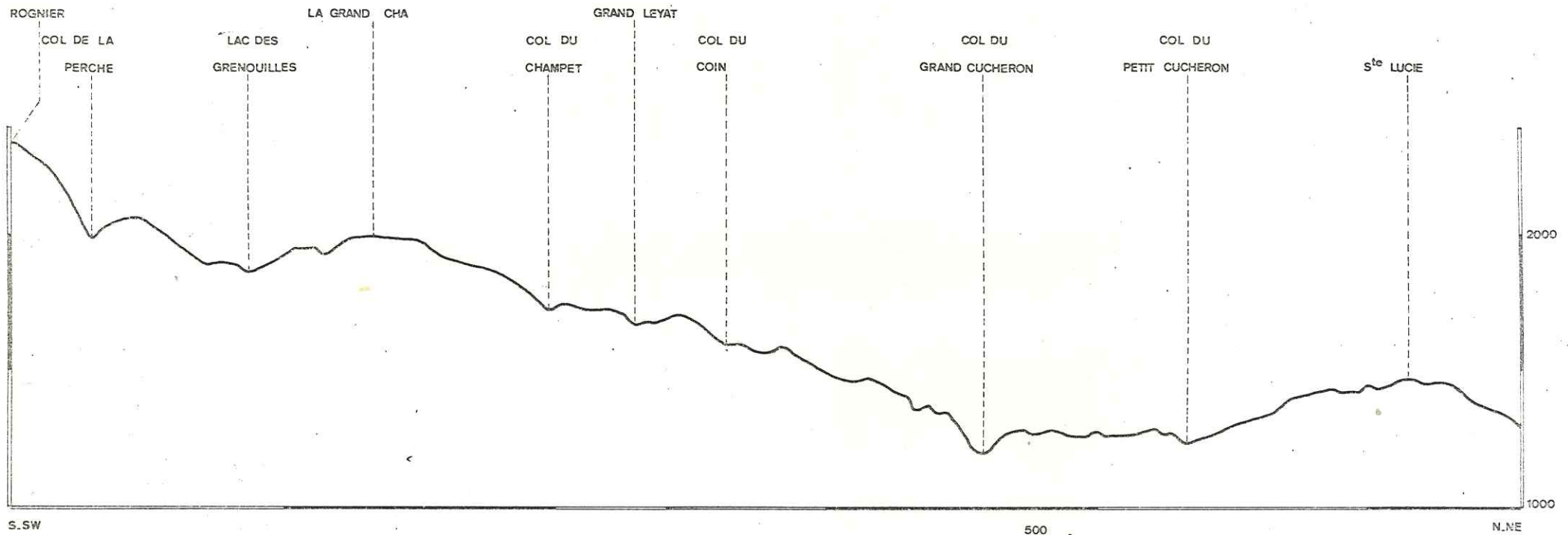
PLAN DE LA CRETE DES HURTIERES

N.m.

0 mètres 2000

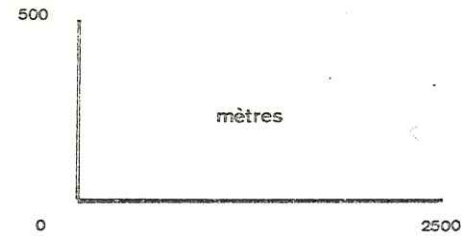
fig 22a

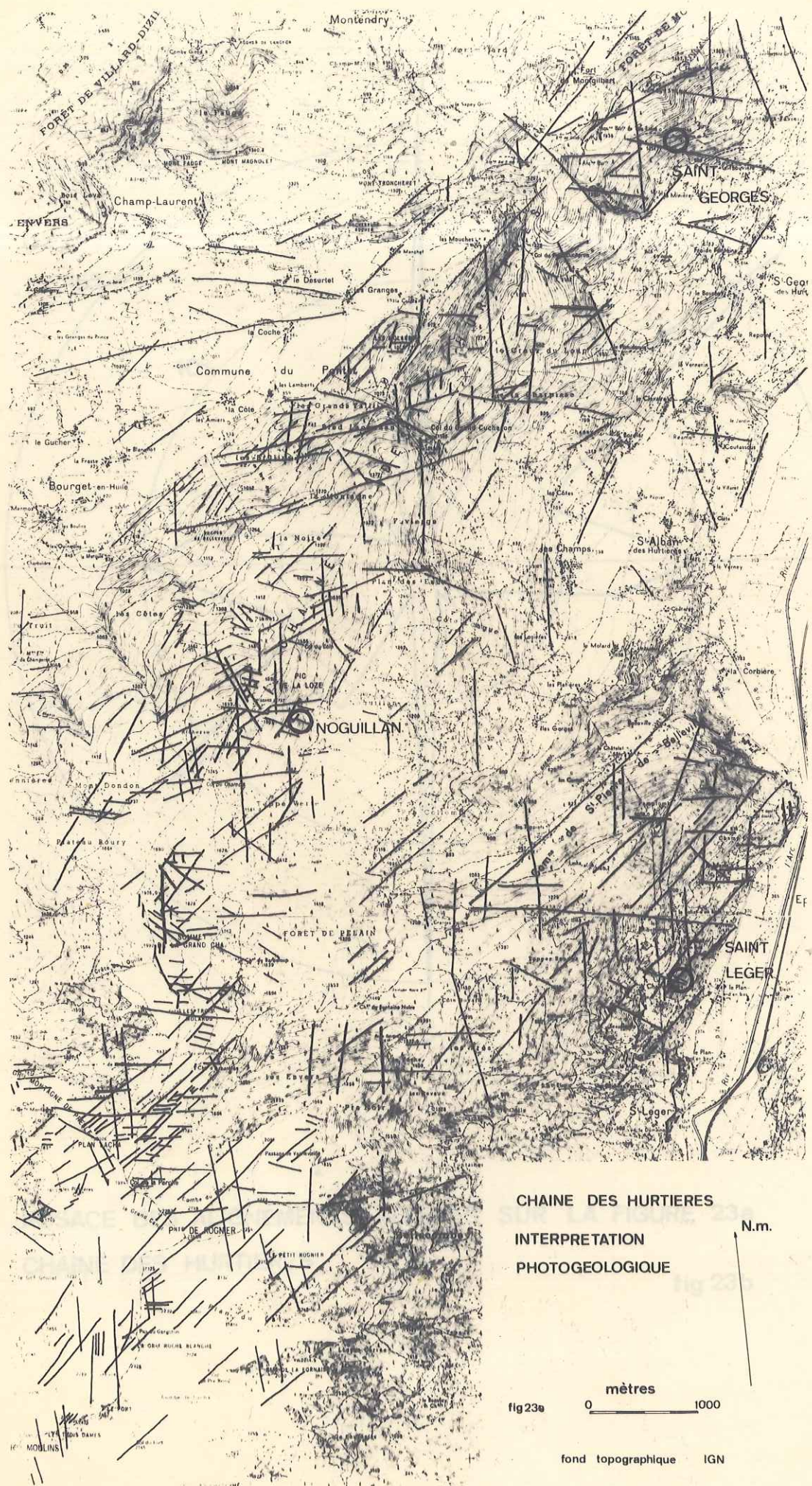




PROFIL TOPOGRAPHIQUE DE LA CRETE DES HURTIERES

fig22b



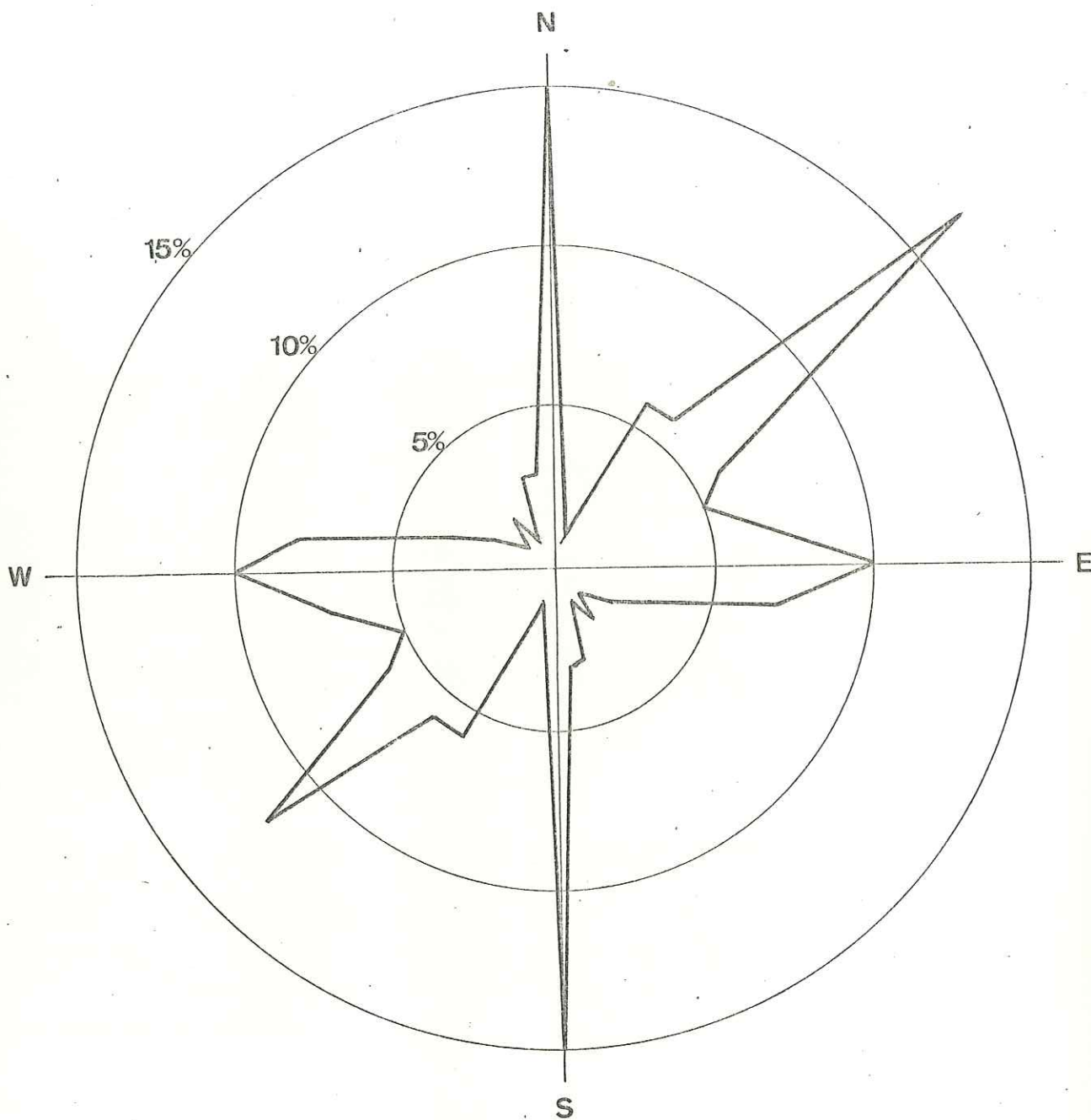


CHAINE DES HURTIERES
 INTERPRETATION
 PHOTOGEOLOGIQUE



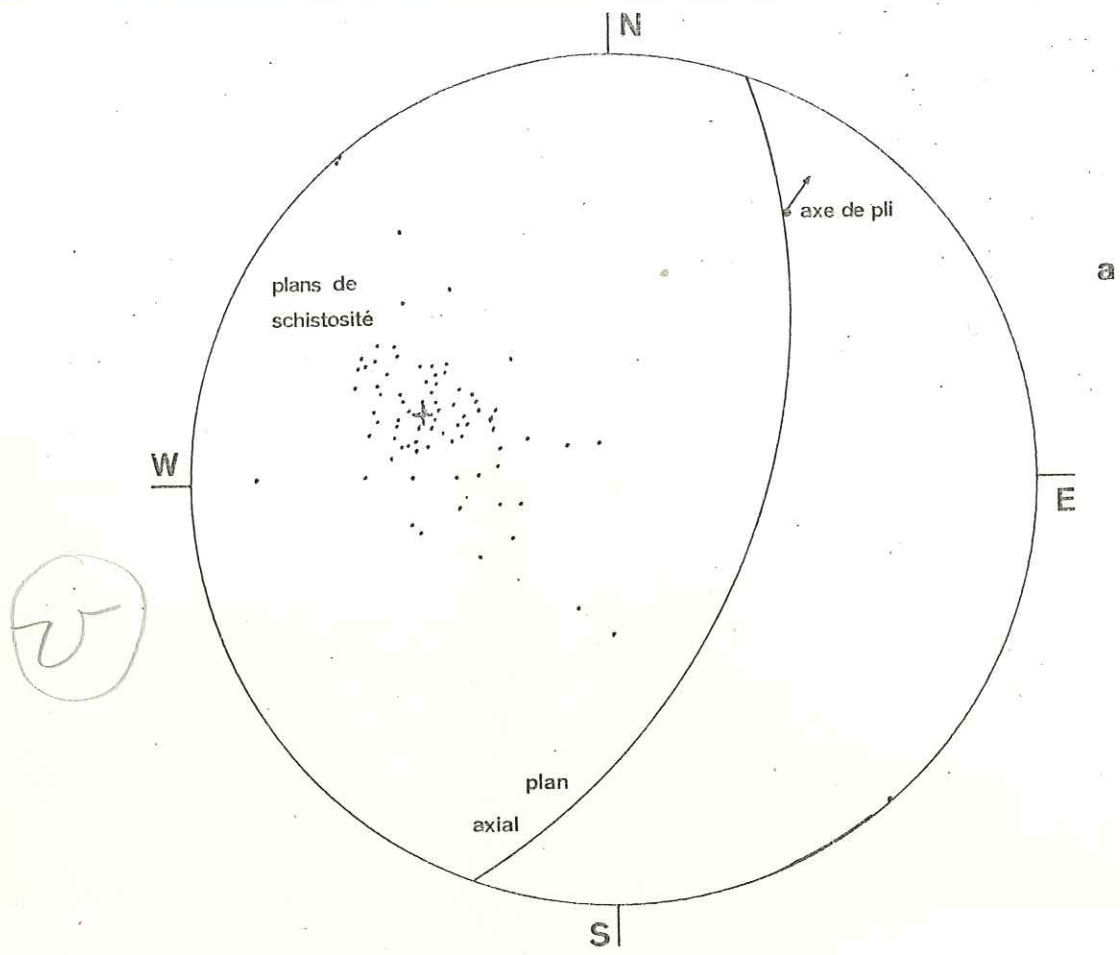
fig 23e 0 mètres 1000

fond topographique IGN

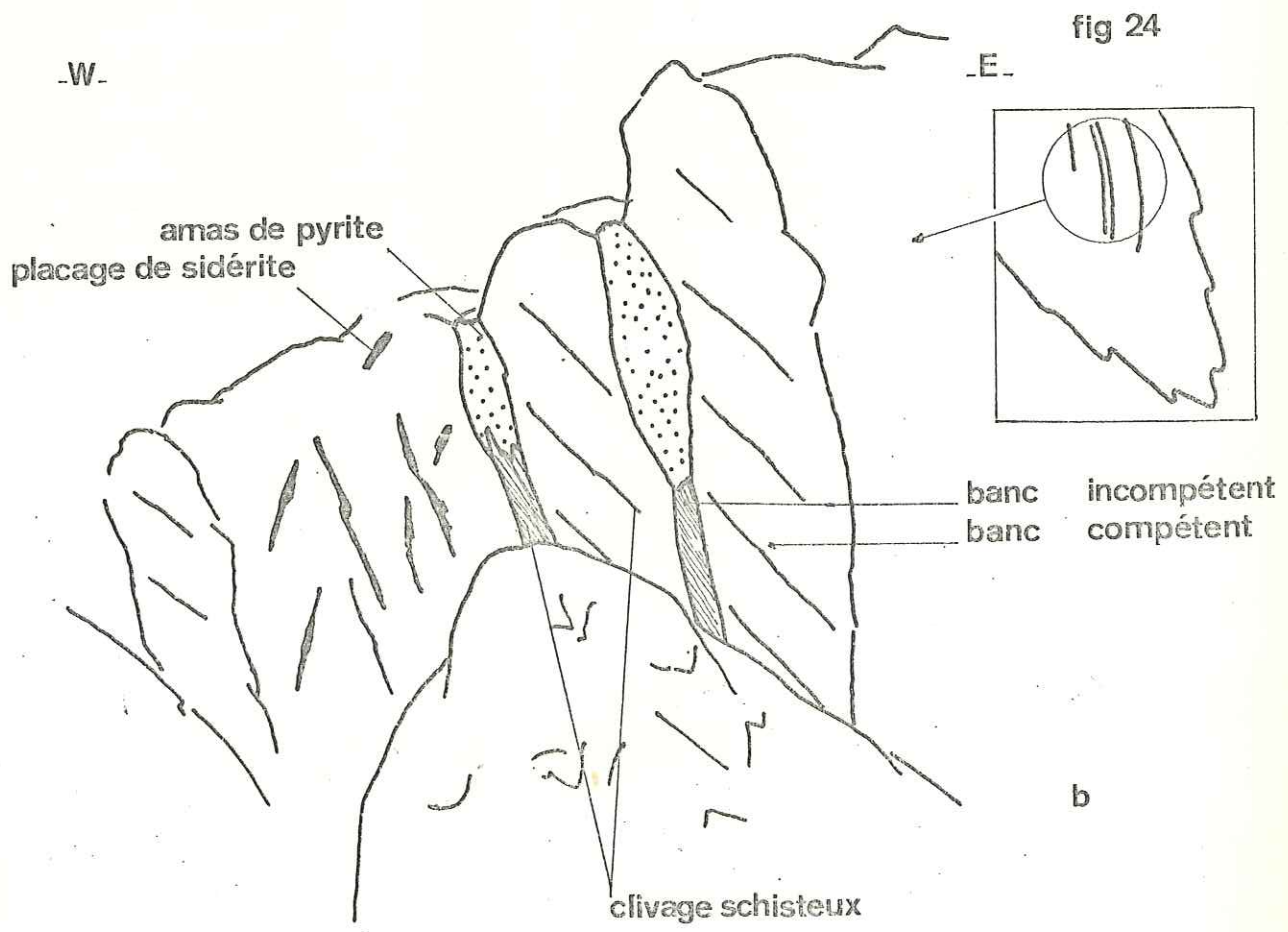


ROSACE DES ALIGNEMENTS RELEVES SUR LA FIGURE 23a
 CHAINE DES HURTIERES

fig 23b



SCHISTOSITE
CHAINE DES HURTIERES



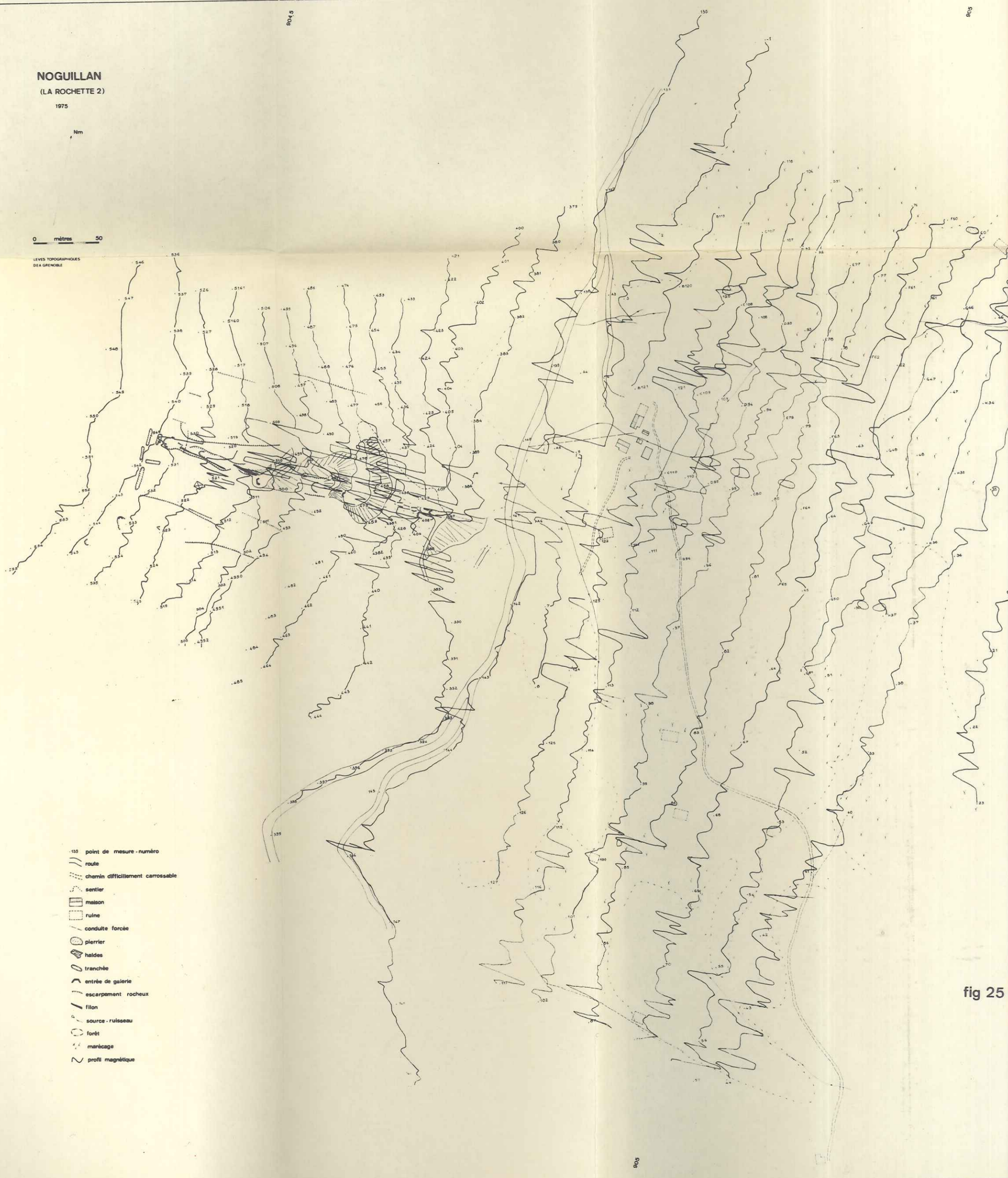
NOGILLAN
(LA ROCHETTE 2)

1975

Nm

0 mètres 50

LEVES TOPOGRAPHIQUES
DE LA GRENOBLE



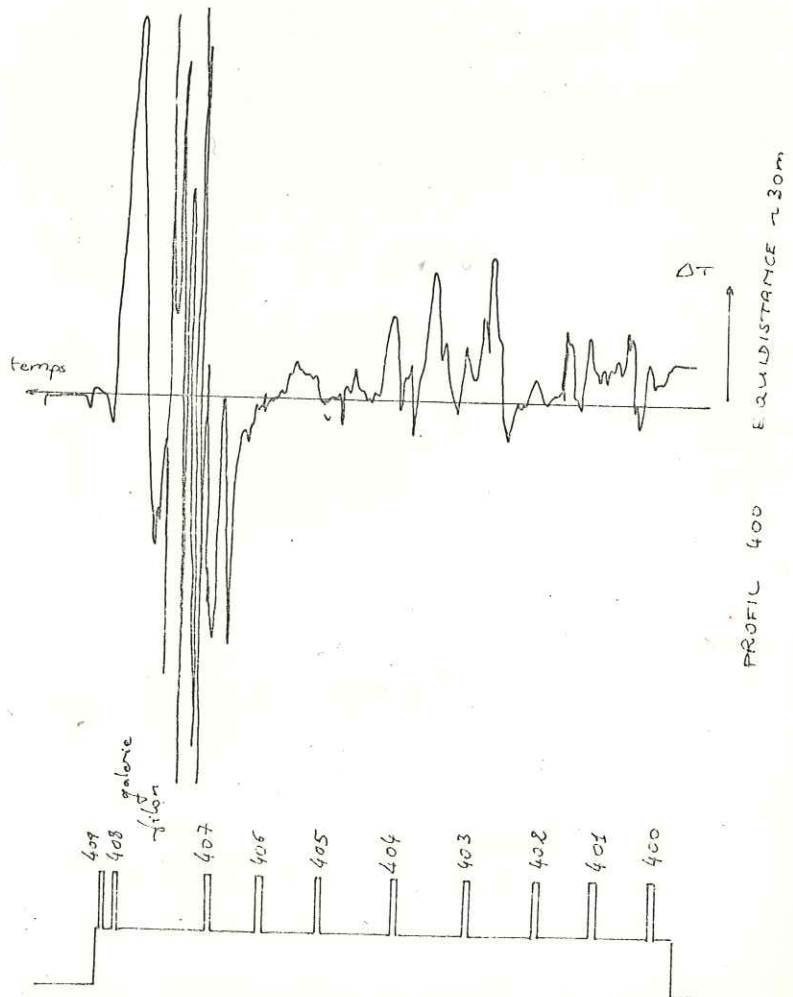
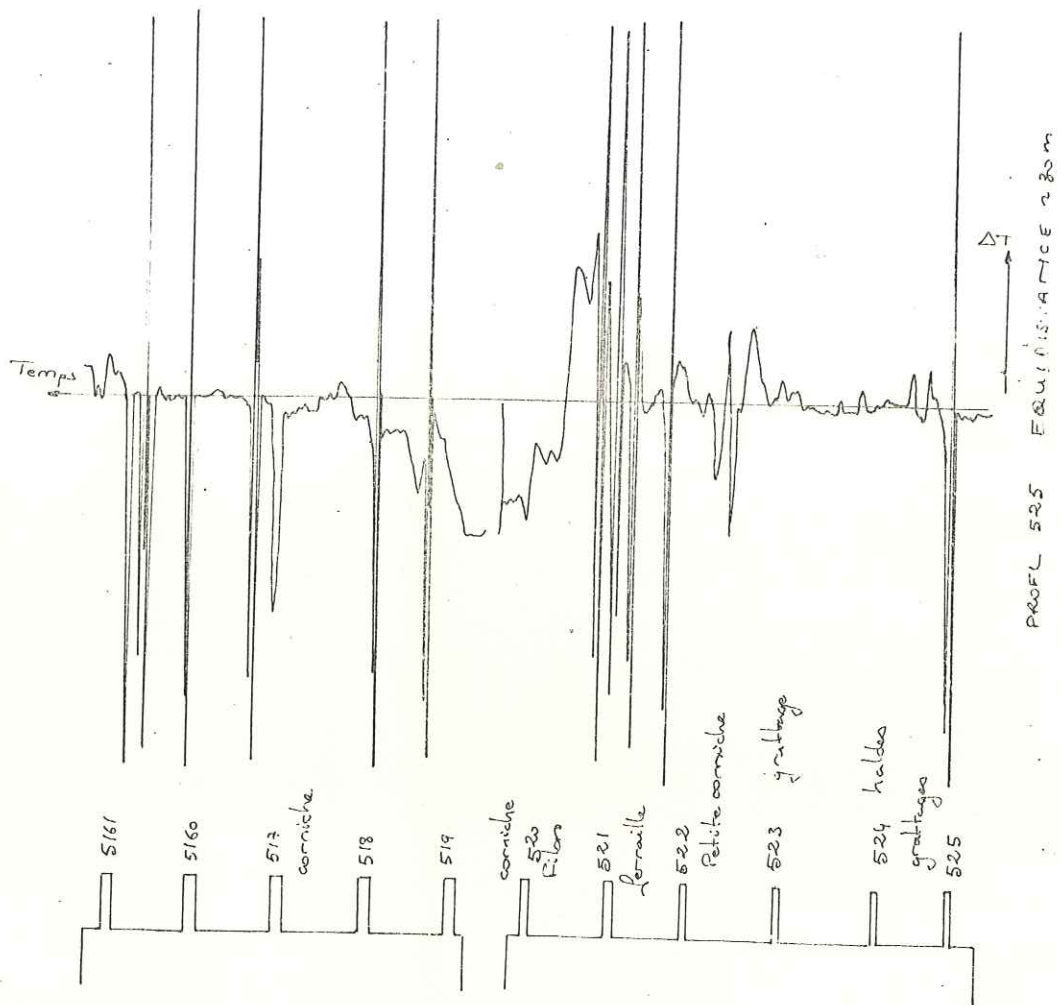
- 155 point de mesure - numéro
- route
- chemin difficilement carrossable
- sentier
- maison
- ruine
- conduite forcée
- plierrier
- haldes
- tranchée
- entrée de galerie
- escarpement rocheux
- filon
- source - ruisseau
- forêt
- marécage
- profil magnétique

fig 25

NOGUILLAN

RESULTATS BRUTS
DES PROFILS 400
525

fig.26



FILON DE NOGUILLAN

I.A. ROCHETTE 2

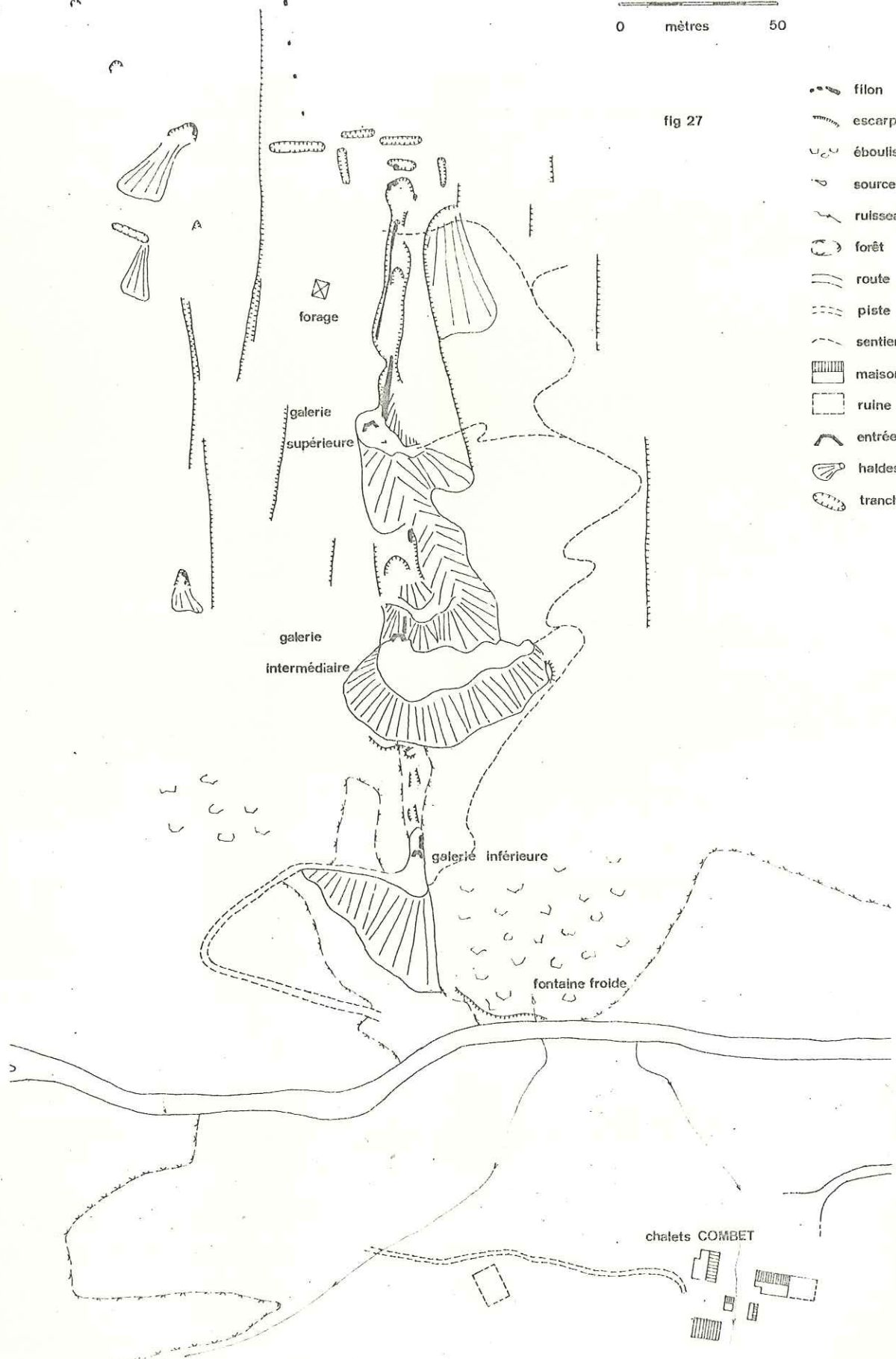
1975

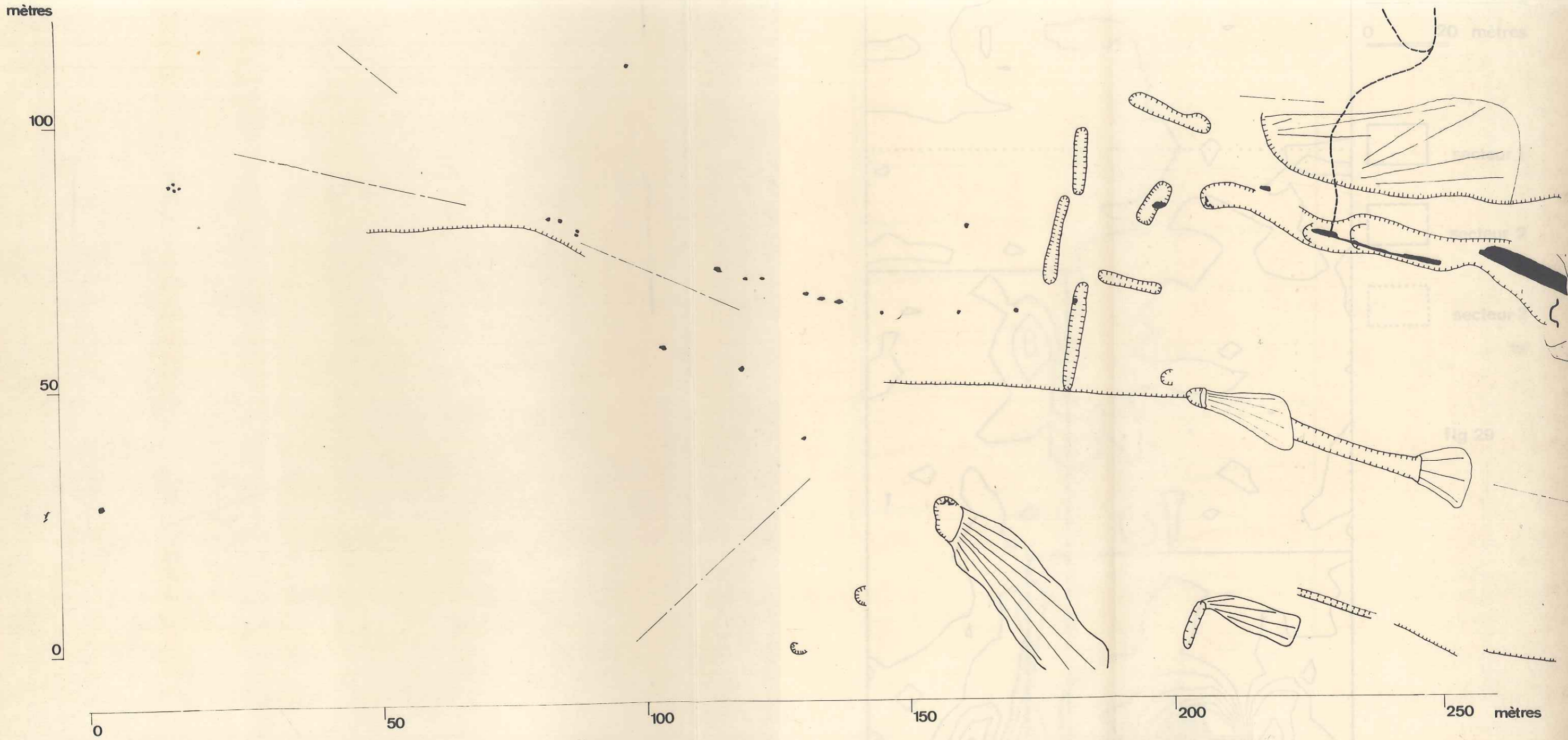


0 mètres 50

- filon
- escarpement rocheux
- éboulis
- source
- ruisseau
- forêt
- route
- piste
- sentier
- maison
- ruine
- entrée de galerie
- haldes
- tranchée

fig 27





NOGUILLAN ZONE FORESTIERE
1975

N.m.

fig 28a

- escarpement rocheux
- filon
- autres alignements

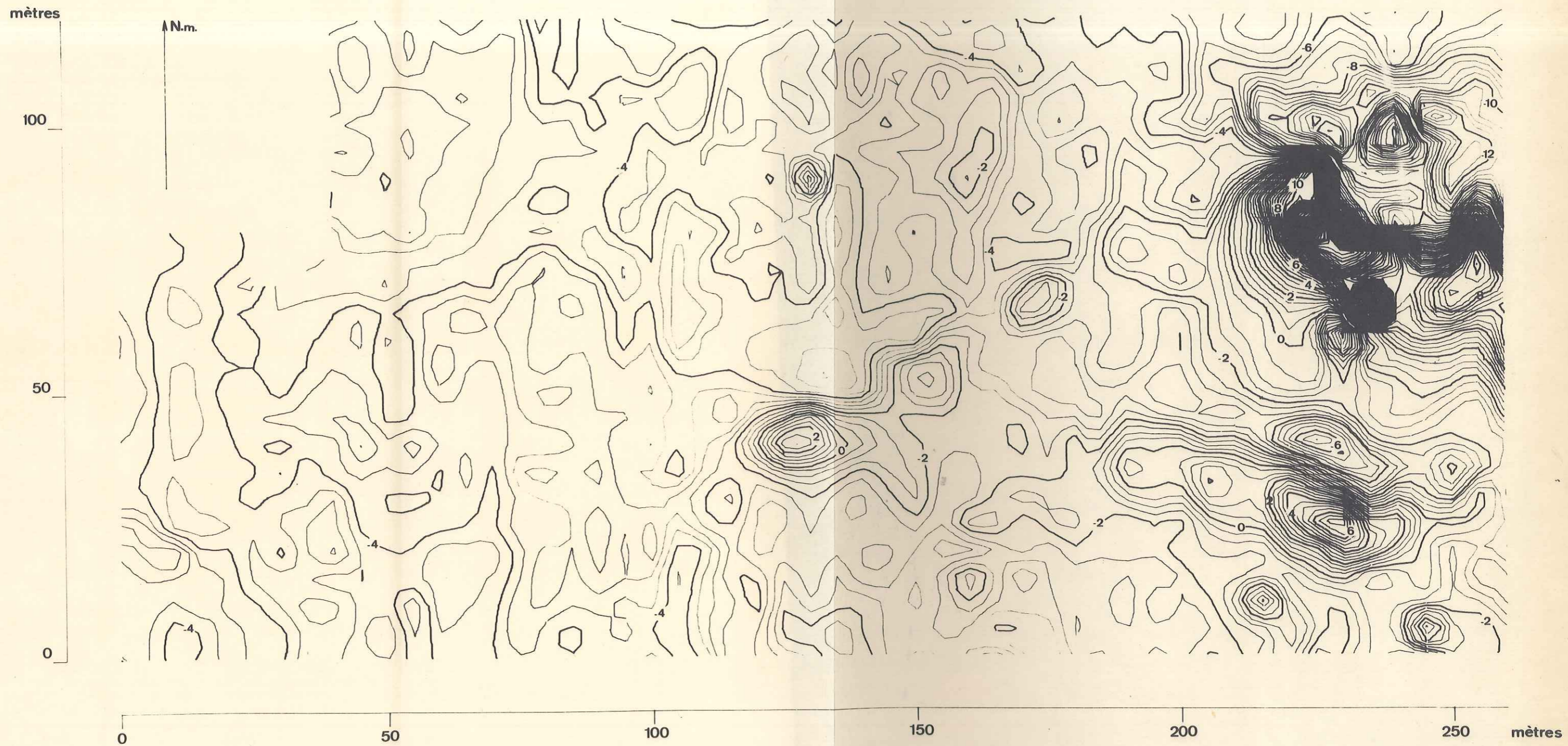
- chemin
- tranchée
- galerie
- haldes

NOGUILLAN
zone forestière

0 20 mètres

secteur

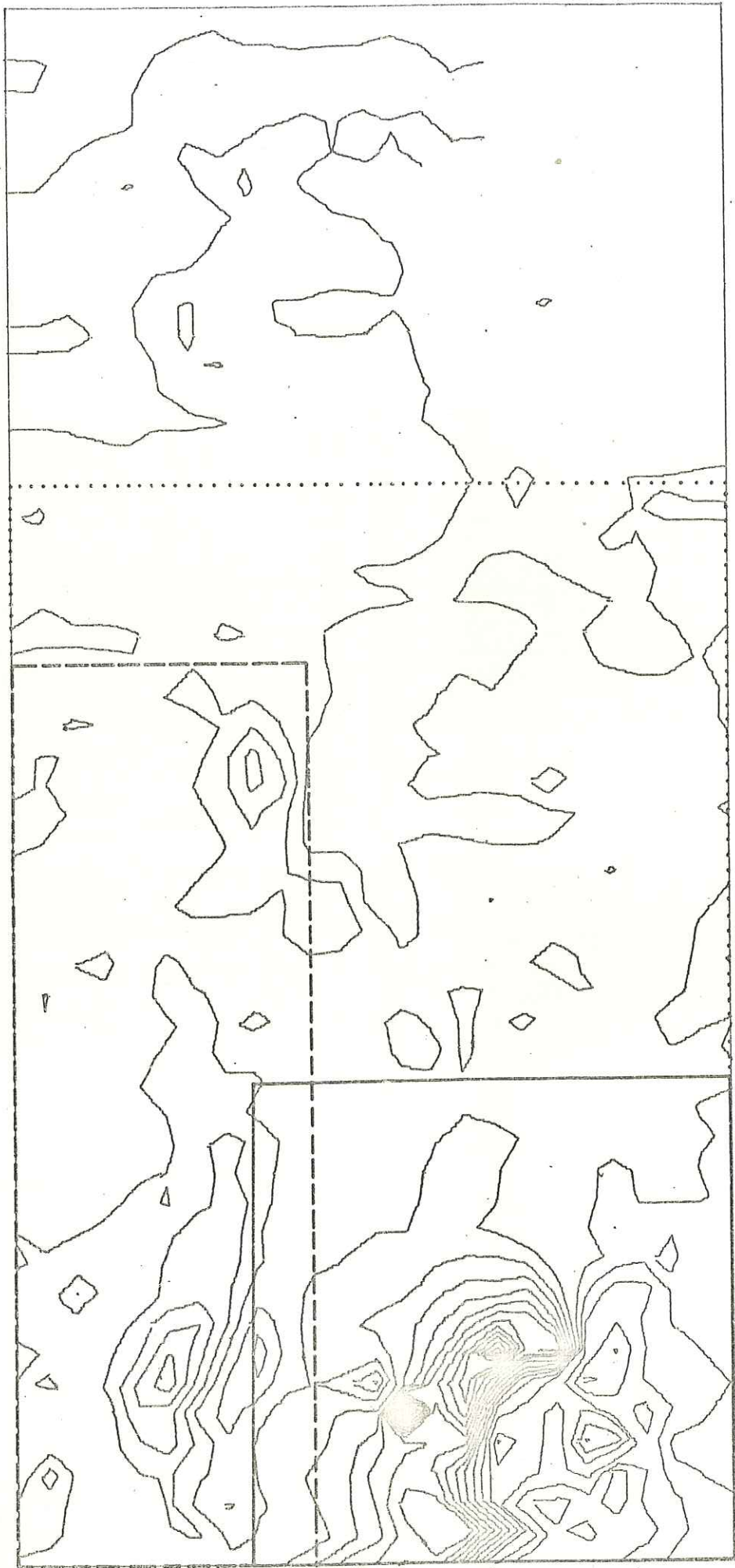
fig 29



NOGUILLAN. ZONE FORESTIERE
ANOMALIES DU CHAMP MAGNETIQUE

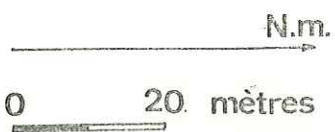
équidistance des isogammes: 0,5 gamma

fig 28b

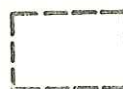


NOGUILLAN

zone forestière



secteur 1

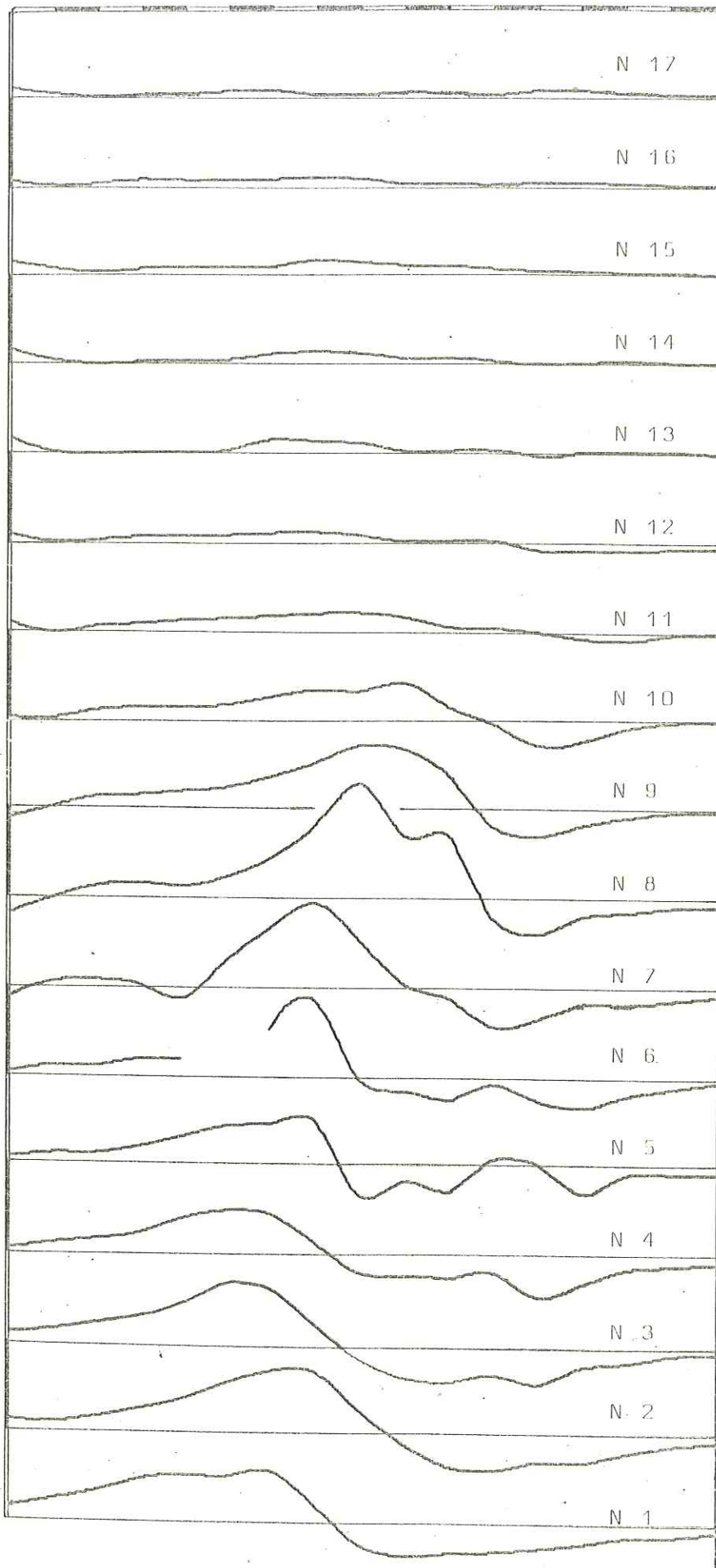


secteur 2



secteur 3

fig 29



SECTEUR 1
 PROFILS MAGNETIQUES

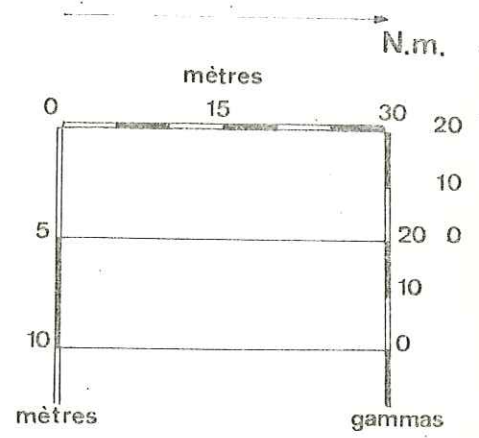
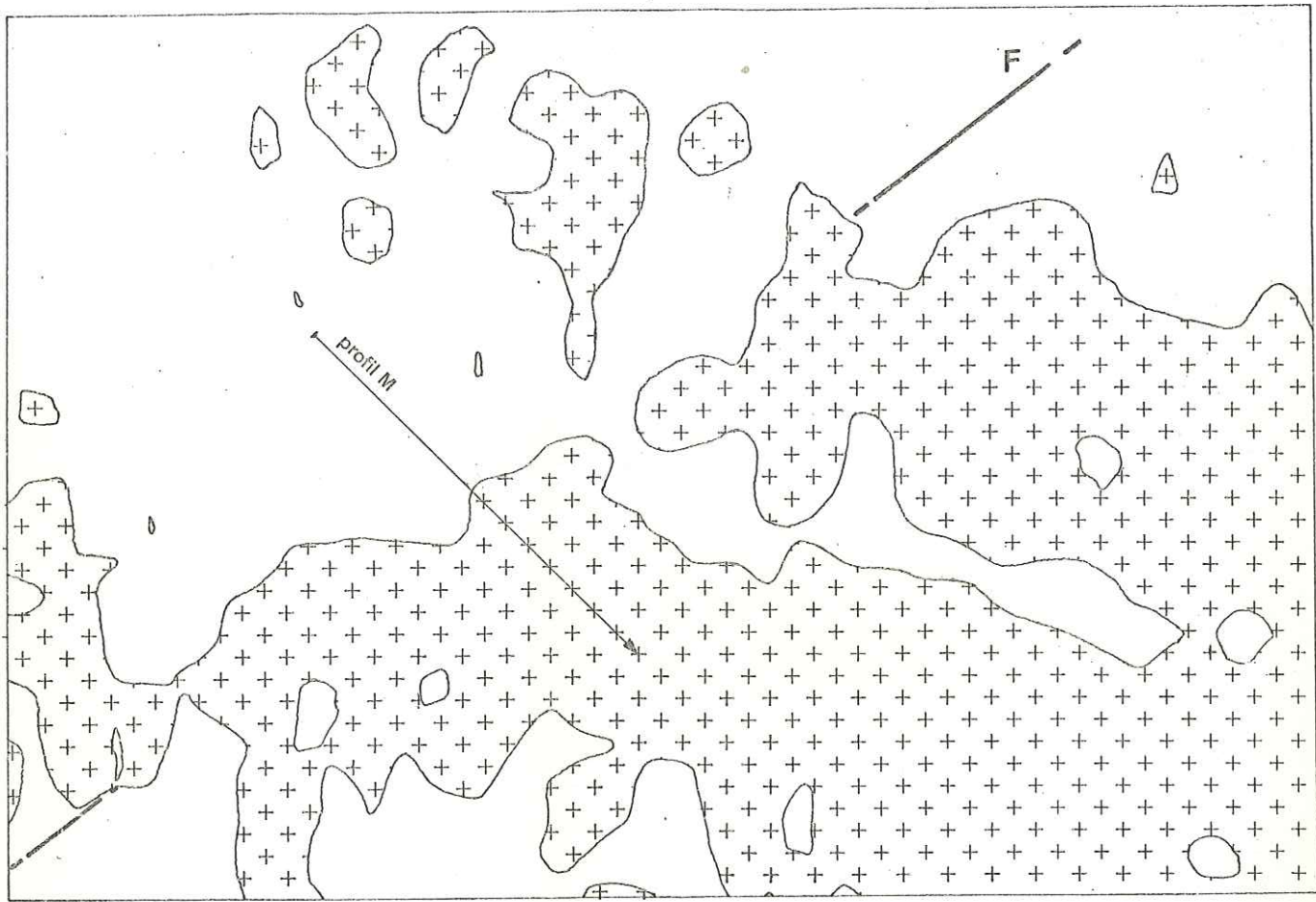


fig 30

120m



0m

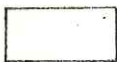
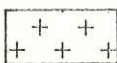
80m

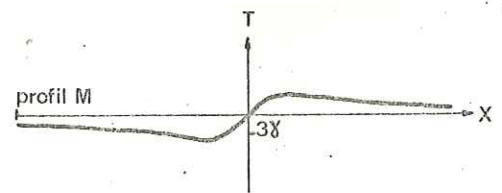
260m

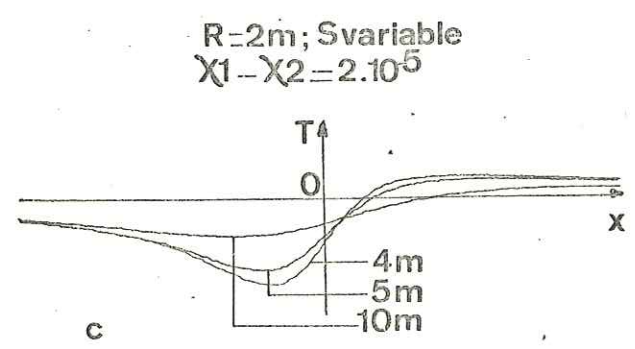
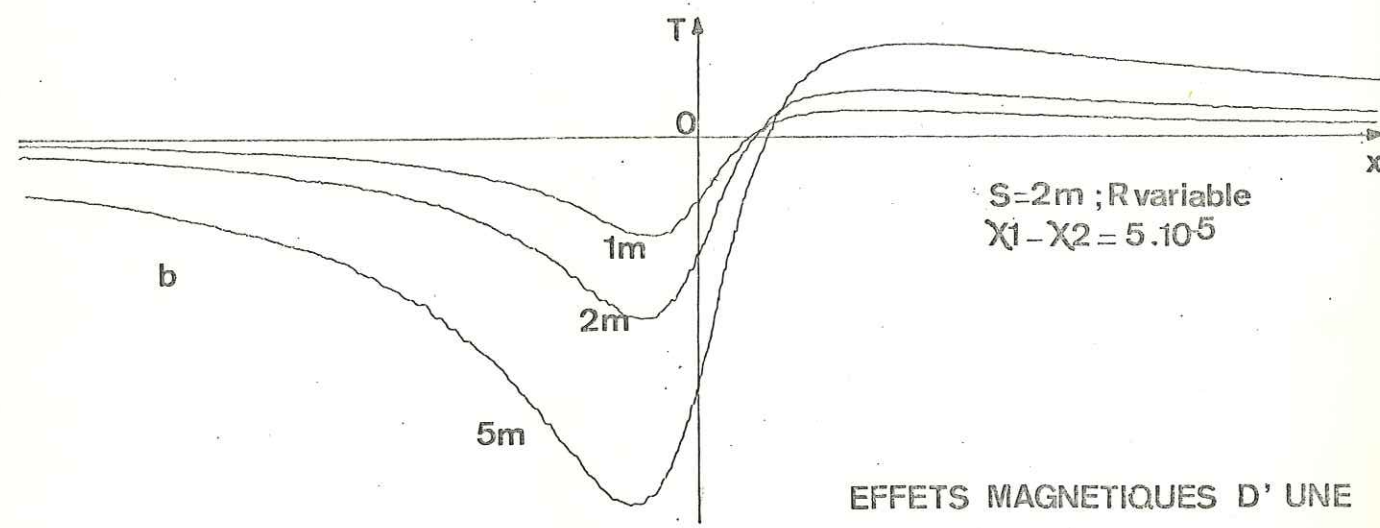
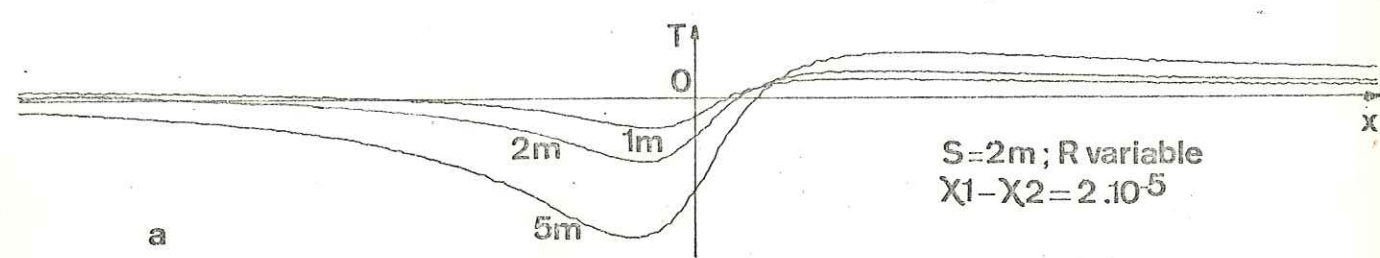
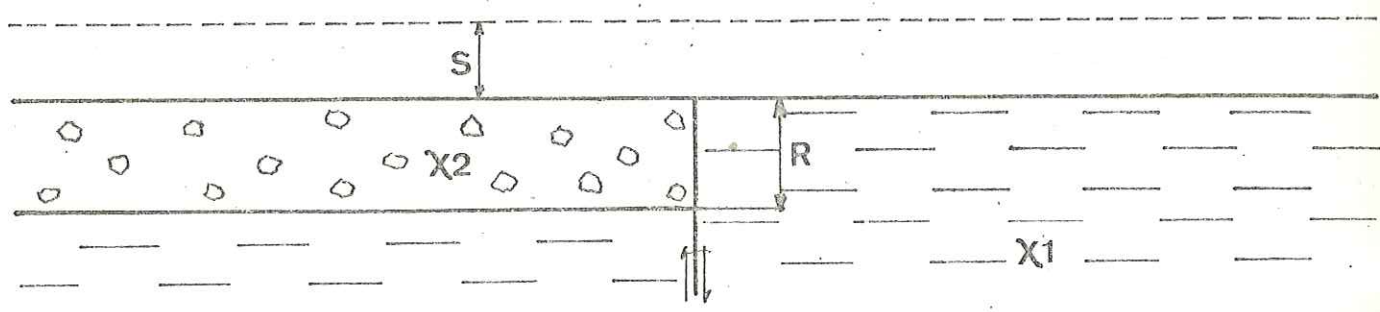
NOGUILLAN. ZONE FORESTIERE
fig 31





N.m.

-  < -3 gammas
-  > -3 gammas





**EFFETS MAGNETIQUES D'UNE
 FAILLE N45**

-  micaschiste
-  éboulis

R rejet vertical
 S distance sol-capteur

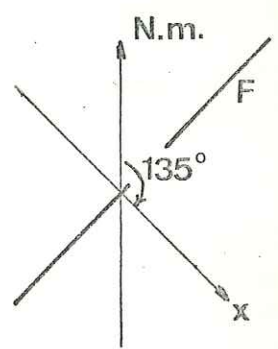
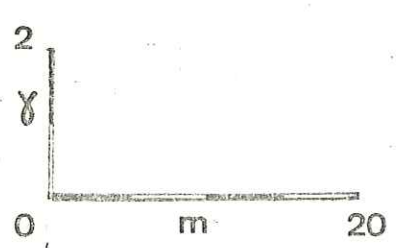


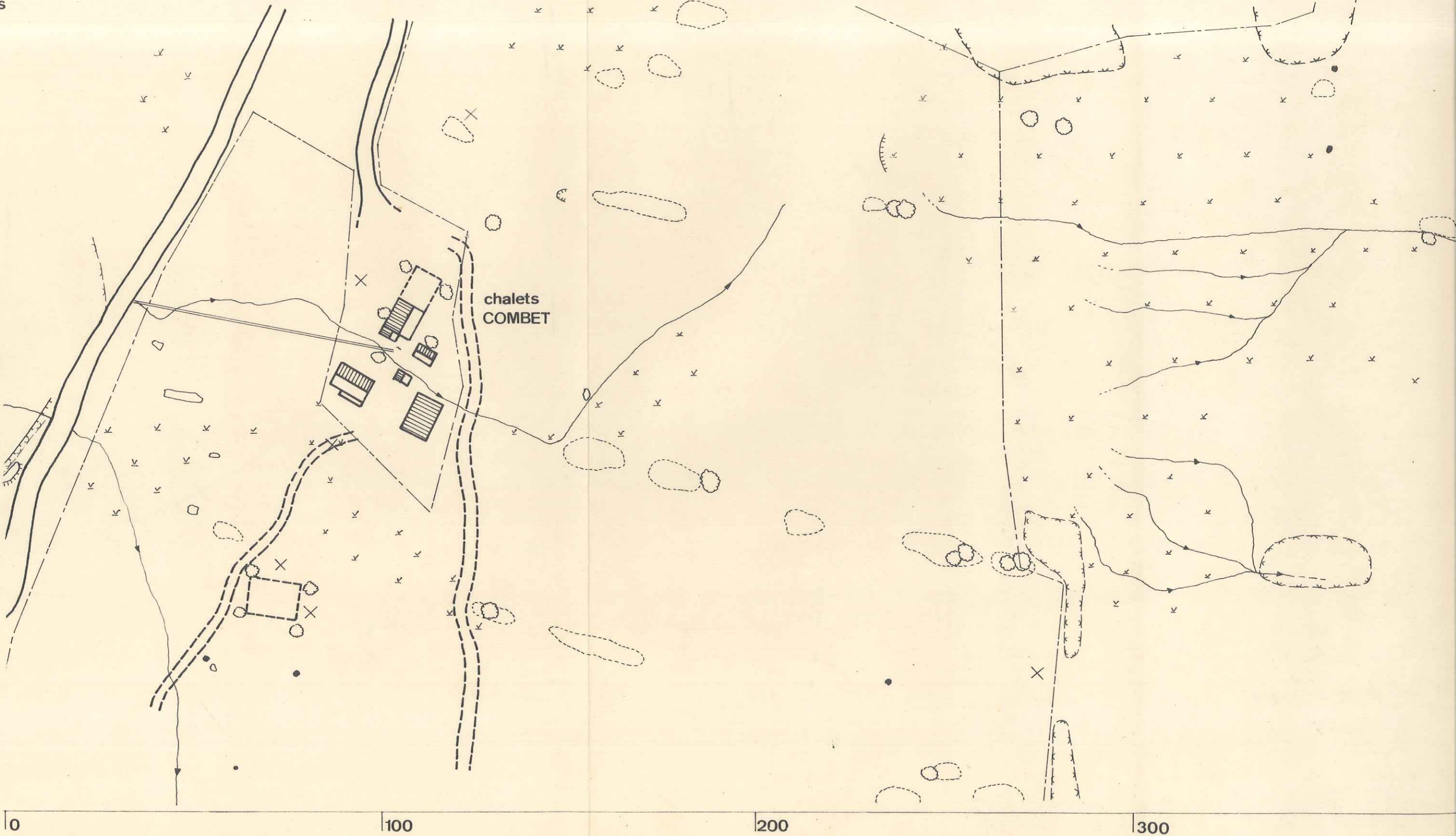
fig 32

mètres

200

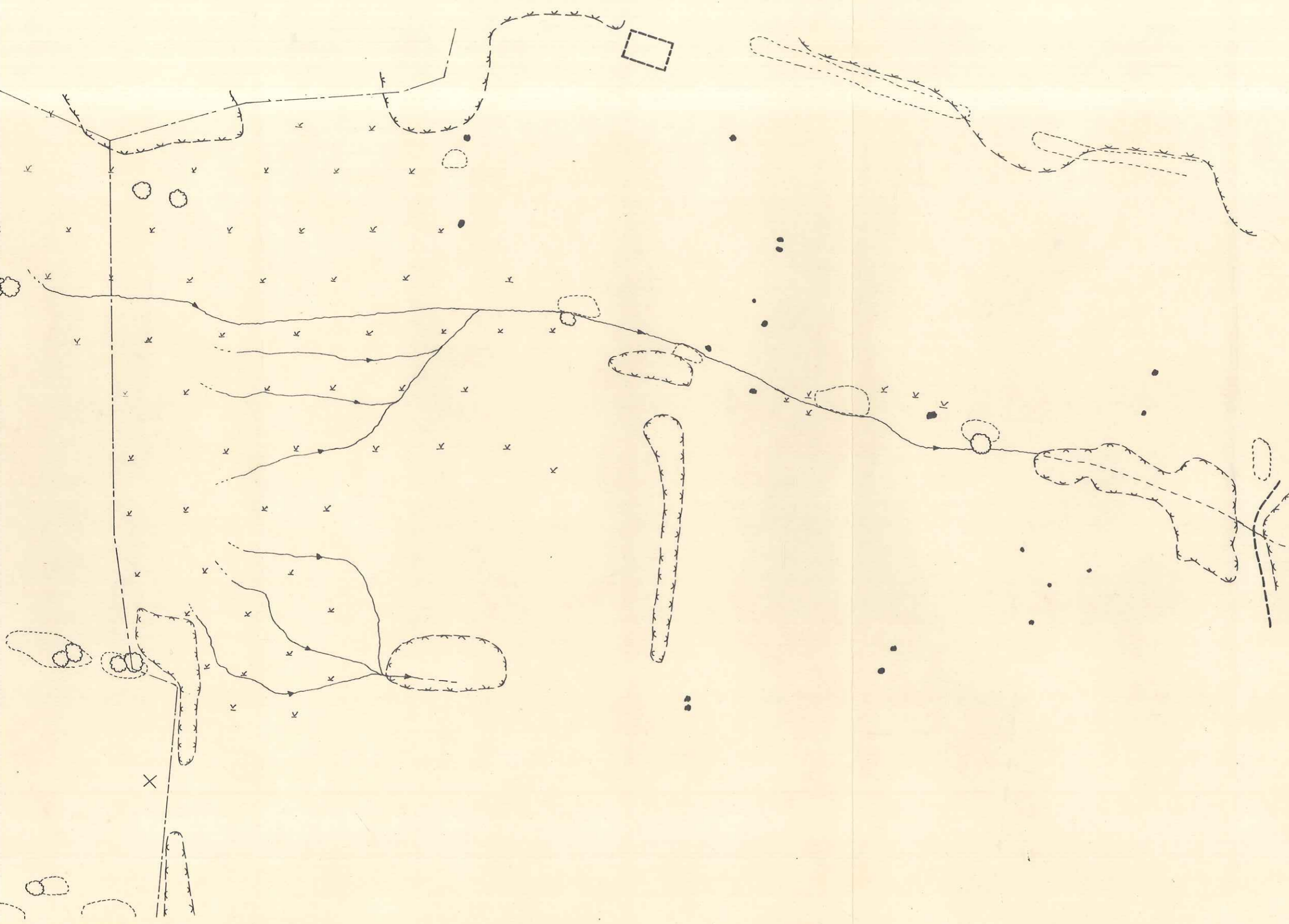
100

0



NOGUILLAN . ZONE D'ALPAGE
 CARTE TOPOGRAPHIQUE
 1975

N.m.



- pierrier
- forêt
- arbre isolé
- x x marécage
- ~ ruisseau
- ~ escarpement
- bloc de granite
- bloc de micaschiste
- ▨ maison
- ruine
- == route
- piste
- - - sentier
- == conduite forcée
- - - clôture
- x autres objets métalliques

300 400 500 mètres

fig 33a

mètres

200

100

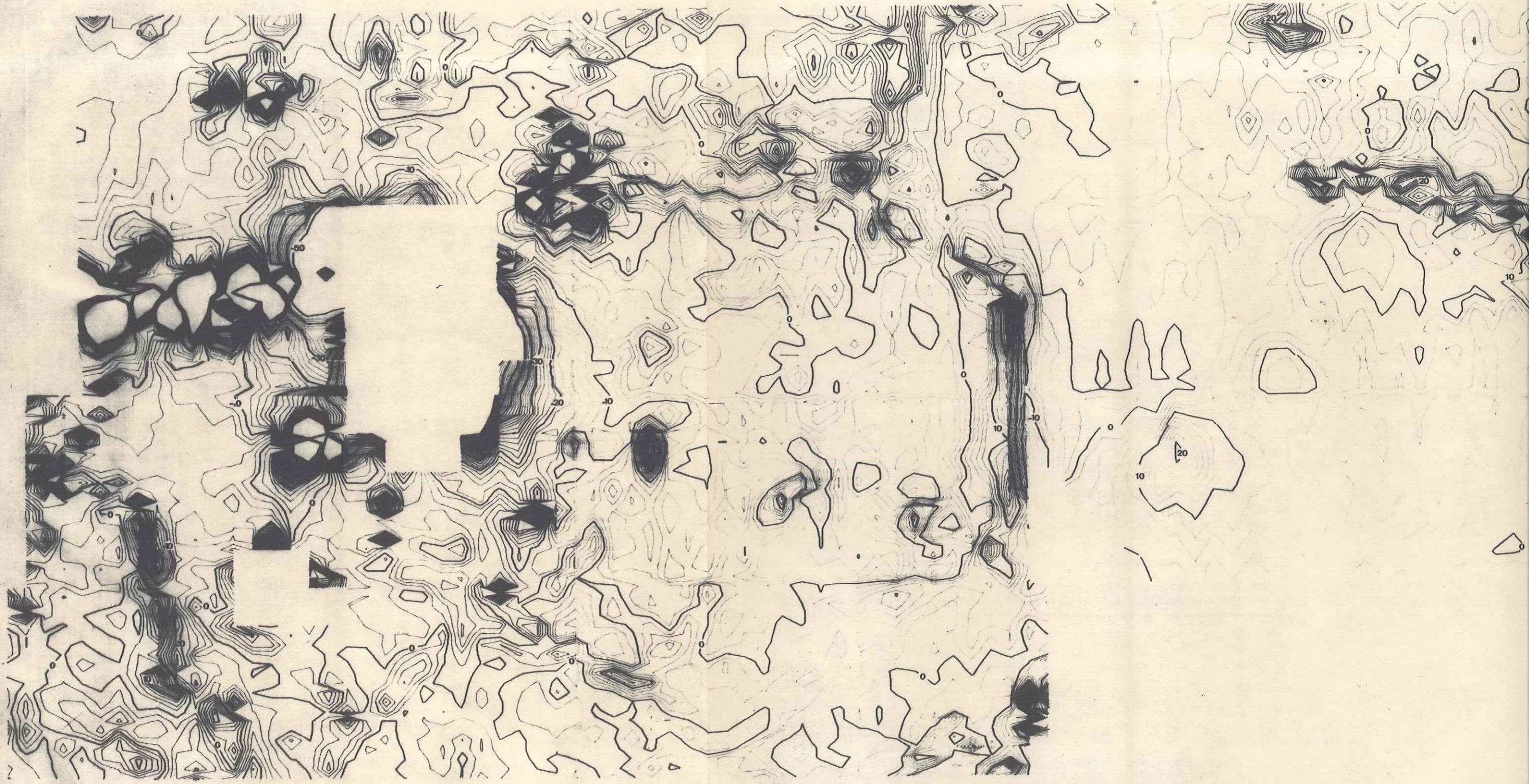
0

0

100

200

300



NOGILLAN
ZONE D'ALPAGE
ANOMALIES MAGNETIQUES

N.m.

équidistance des isogammes: 25

fig 33 b



200 300 400 500 mètres

0 100 200 mètres



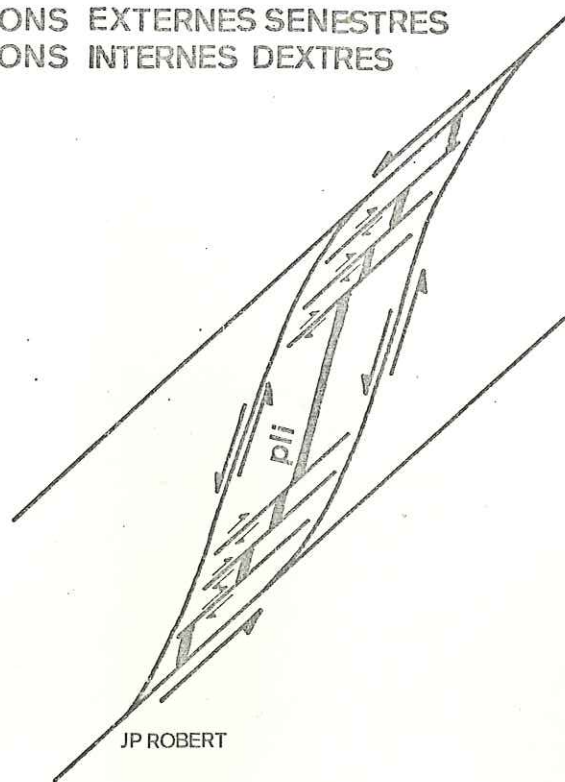
NOGUILLAN . ZONE D'ALPAGE
INTERPRETATION DE LA CARTE MAGNETIQUE

— N.m.

équidistance des isogammes: 5 γ

fig 34

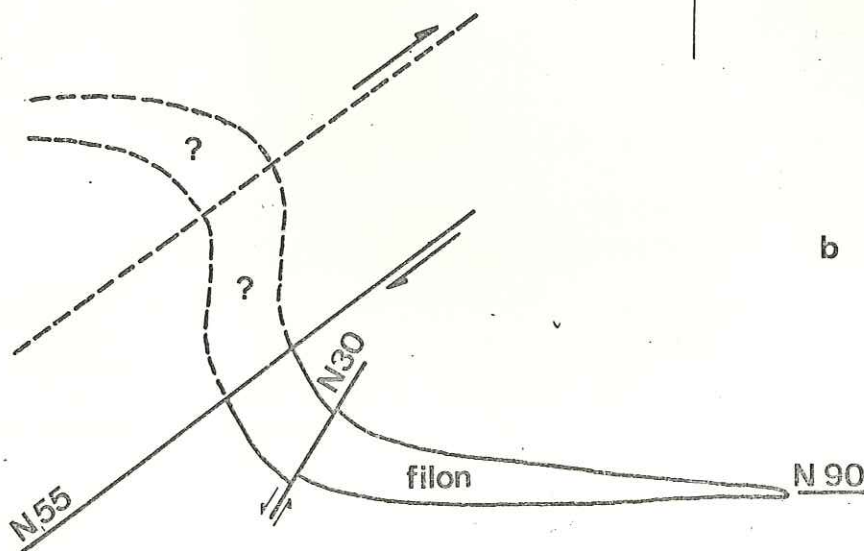
ROTATIONS EXTERNES SENESTRES
ET ROTATIONS INTERNES DEXTRES



a

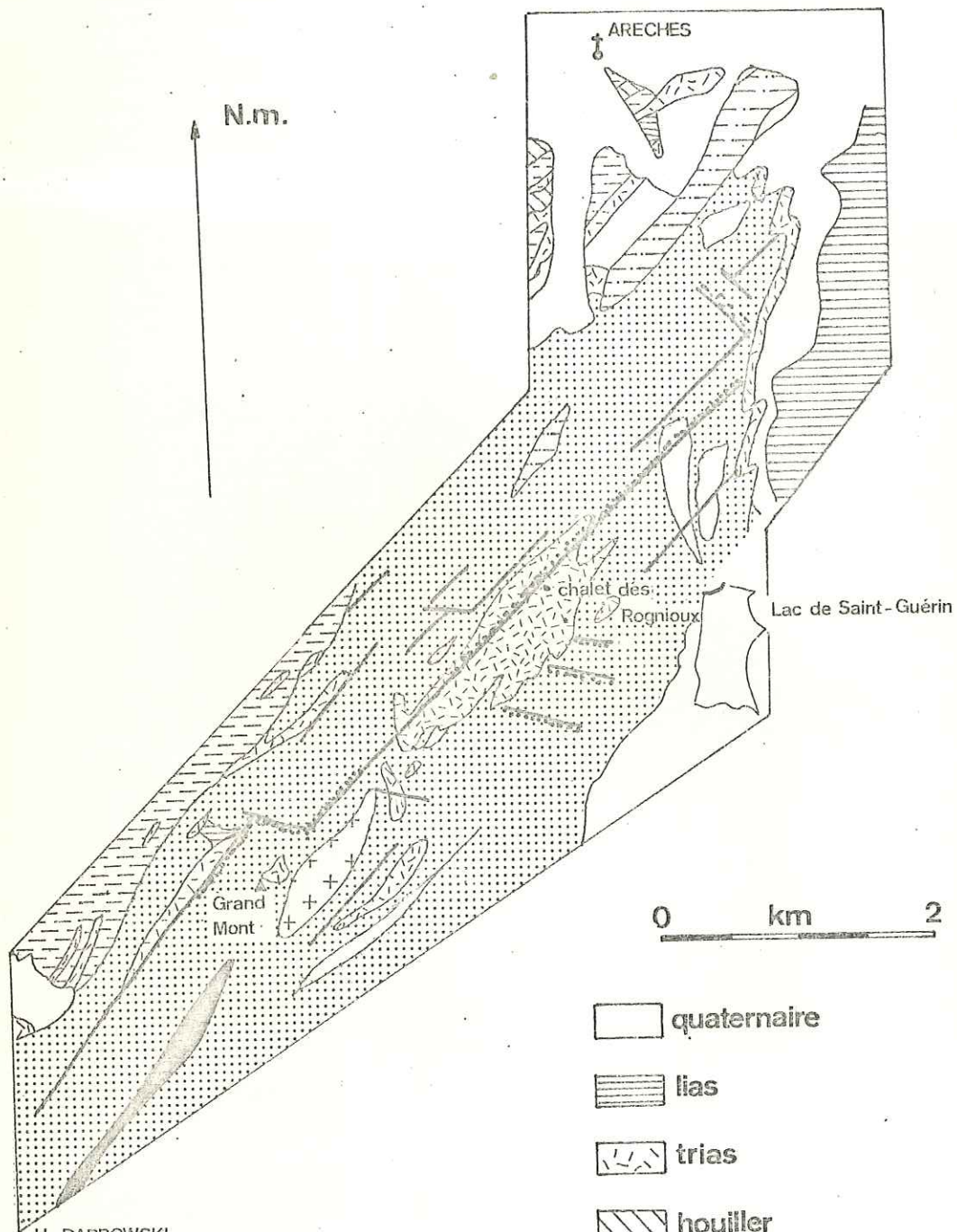
N.m.

fig 35



b













MODELE DU FILON DE NOGUILLAN



H DABROWSKI

ARECHES GRAND-MONT
CARTE GEOLOGIQUE

fig 36

-  quaternaire
-  lias
-  trias
-  houiller
-  schistes verts
-  gneiss
-  amphibolites
-  quartzites
-  migmatites
-  granite
-  faille
-  zone minéralisée



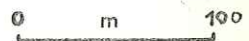
CARTE TOPOGRAPHIQUE DU PLATEAU DES ROGNIOUX

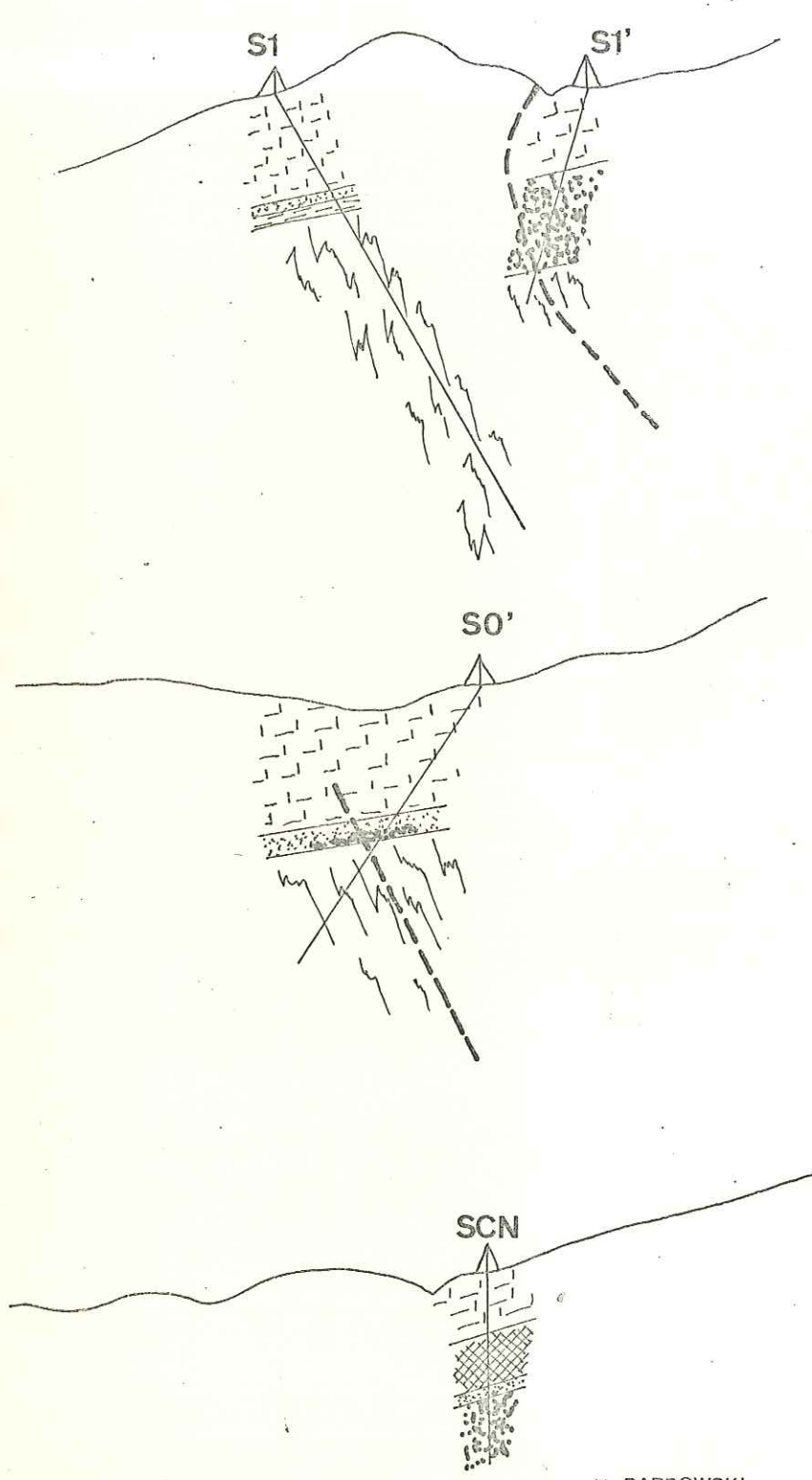
fig 37

d'après A. CAPPONI

-  chalet
-  lac
-  marais
-  axe de moindre résistivité
-  sondage
-  zone prospectée

échelle:






-  calcaires dolomitiques
-  quartzites
-  argilites
-  socle cristallin
-  chapeau de fer
-  zone minéralisée
-  filon
-  sondage

fig38

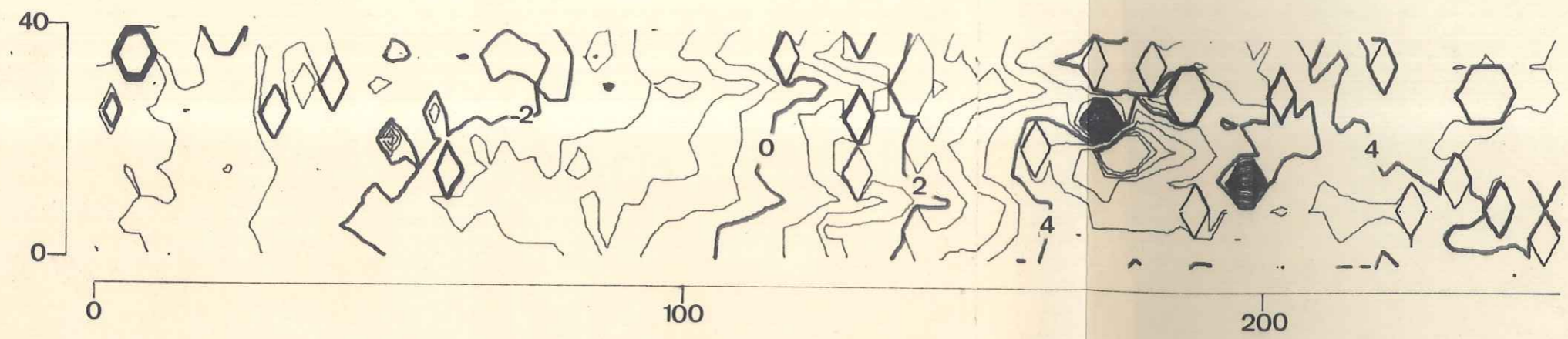
H DABROWSKI

LES ROGNIOUX COUPES GEOLOGIQUES
 D'APRES LES SONDAGES : SCN, SO',
 S1, S1'.

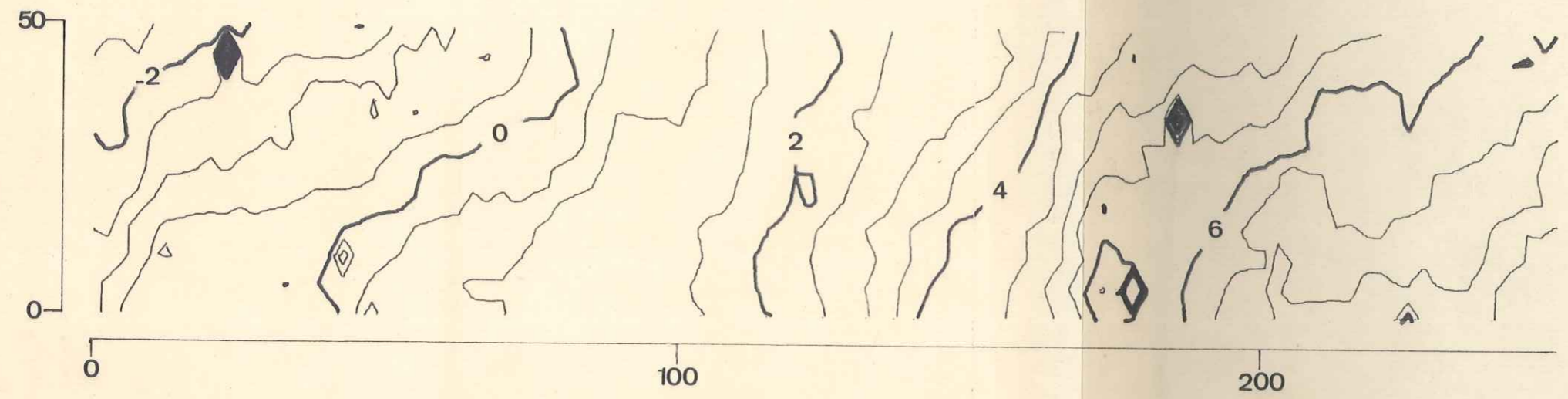
LES ROGNIUX
ANOMALIES DU CHAMP MAGNETIQUE

équidistance des isogammes: 0,5 γ

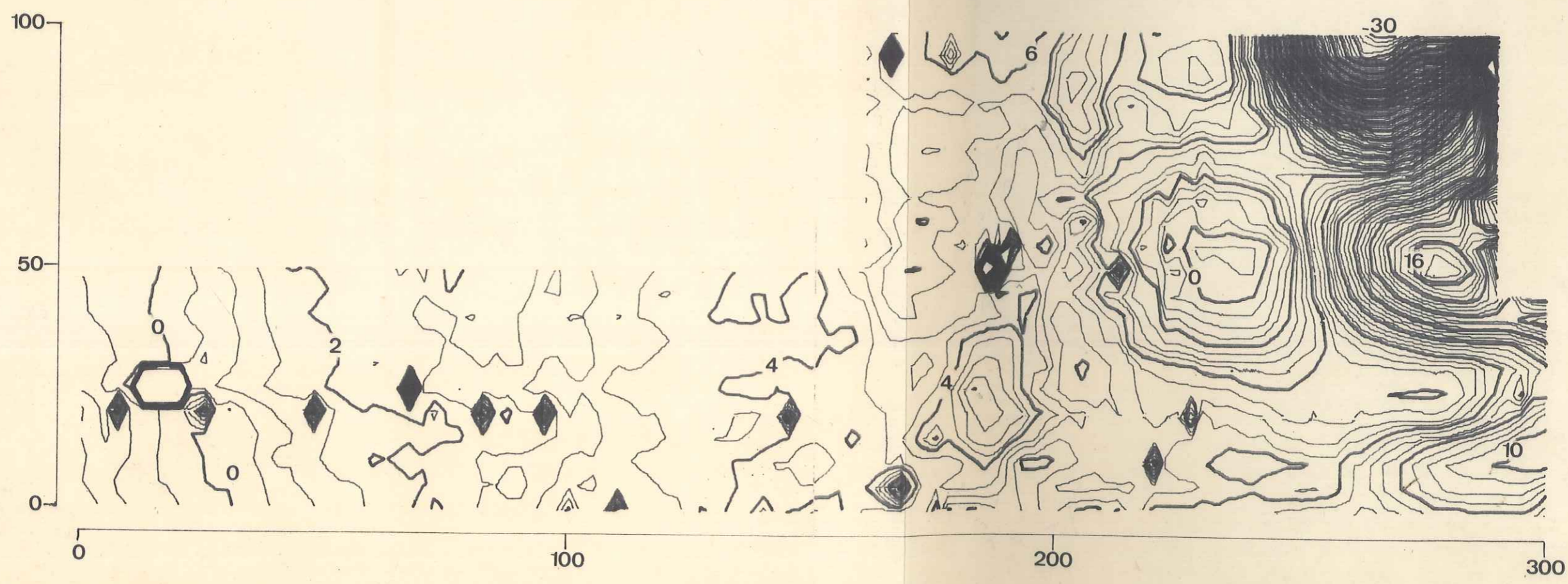
distance en mètres



a: S1 S1'



b: S0''



c: SCN

fig 39