

Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz

(Fortsetzung der Publikationsreihe
«Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz»)

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

Siebenunddreißigster Band

Les levés aéromagnétiques
de la Suisse

Emile Klingelé

1986



Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz

(Fortsetzung der Publikationsreihe
«Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz»)

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

Siebenunddreißigster Band

**Les levés aéromagnétiques
de la Suisse**

Emile Klingelé

1986

Adresse der Schweizerischen Geodätischen Kommission:

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Eidg. Technische Hochschule Zürich
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Adresse der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission:

Institut für Geophysik und
Schweizerischer Erdbebendienst
Eidg. Technische Hochschule Zürich
ETH-Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Redaktion des 37. Bandes:

Prof. Dr. William Lowrie
Prof. Dr. Stephan Müller
Prof. Dr. Jean-Jacques Wagner

Druck: Offsetdruck Bern AG

PREFACE

Les levés géophysiques de la Suisse sont depuis de nombreuses années un des points forts de l'activité de la Commission Suisse de Géophysique (CSGP), membre de la Société Helvétique des Sciences Naturelles (SHSN).

Dans le passé, la commission a, en particulier, préparé et publié des cartes géophysiques nationales à l'échelle 1:500'000⁰ en collaboration avec l'Office Fédéral de Topographie; par exemple et pour n'en citer que quelques-unes: les cartes du champ magnétique au sol (cartes n⁰ 1, 2 et 3), les cartes des anomalies de la pesanteur (cartes n⁰ 3 et 4) et la carte du géoïde (carte n⁰ 6). Les campagnes intensives de mesures ainsi que le traitement des données ont été conduits, en partie interdisciplinairement, par des membres des commissions de géodésie et de géophysique (notamment pour la carte n⁰ 6).

Dans le cas de la carte aéro-magnétique aussi, de nombreux problèmes d'infrastructure (p.ex. la mise à disposition de l'avion) ont été résolus par un travail en commun des scientifiques des deux commissions. A cette occasion, il convient de remercier tout particulièrement la Direction Fédérale des Mensurations Cadastrales de son aide désintéressée.

Si l'on veut parler de l'étendue du travail engagé dans le projet national de la carte aéro-magnétique, il est impératif de souligner l'infatigable engagement de M. E. Klingelé. Celui-ci a mené à terme, avec succès et en solitaire, l'ensemble de ce projet dont l'idée initiale revient au Prof. W. Lowrie.

Prof. Dr. St. Mueller
Président de la
Commission Suisse
de Géophysique

M. F. Jeanrichard
Directeur de l'Office Fédéral
de Topographie
Vice-Président de la Commission
Géodésique Suisse

Prof. Dr. H.-G. Kahle
Président de la
Commission Géodésique
Suisse

VORWORT

Die geophysikalische Landesaufnahme der Schweiz ist seit vielen Jahren ein Schwerpunkt der Aktivitäten der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK) der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (SNG). Insbesondere wurden in der Vergangenheit geophysikalische Landeskarten im Massstab 1:500'000 erarbeitet und publiziert. Beispiele hierfür sind die in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopographie herausgegebenen Karten des erdmagnetischen Feldes an der Erdoberfläche (SGPK-Karten Nr. 1,2 und 3), die Schwere-Karten (Nr. 4 und 5) oder die Geoid-Karte (Nr. 6). Die umfangreichen Messkampagnen und Auswertungen wurden zum Teil interdisziplinär von SGPK- und SGK-Mitgliedern (insbesondere bei der Karte Nr. 6) durchgeführt. Auch im vorliegenden Fall der Aeromagnetischen Karte (Nr. 9) wurden zahlreiche Probleme der Infrastruktur, wie z.B. die Bereitstellung des Mess-Flugzeuges, in gemeinsamer Zusammenarbeit von SGPK- und SGK-Wissenschaftlern gelöst. Besonderer Dank gebührt in diesem Zusammenhang der Eidgenössischen Vermessungsdirektion für die Übernahme der Flüge.

Wenn man aus dem umfangreichen nationalen Projekt der Aeromagnetischen Karte eine Einzelleistung hervorheben will, so muss der unermüdliche und überaus erfolgreiche Einsatz von Herrn Privatdozent Dr. E. Klingelé gewürdigt werden, der das gesamte Forschungsprogramm nach einer anfänglichen Starthilfe durch Herrn Prof. Dr. W. Lowrie nahezu im Alleingang bewältigt hat.

Prof. Dr. St. Mueller
Präsident der SGPK

Direktor F. Jeanrichard
Vizepräsident der SGK

Prof. Dr. H.-G. Kahle
Präsident der SGK

<u>TABLE DES MATIERES</u>	<u>Pages</u>
Liste des tables	III
Liste des figures	IV
Résumé	VI
Zusammenfassung	VII
Summary	VIII
Remerciements	IX
I. Introduction	1
II. Généralités	3
III. Les paramètres du levé	4
IV. Opération et acquisition des données	7
V. L'avion et son équipement	14
VI. Le traitement des données	18
6.1 Introduction	18
6.2 La reformatisation	19
6.3 Le positionnement	19
6.4 Les corrections des variations diurnes et séculaires	20
6.5 Le tri et l'égalisation des données	23
6.6 La préparation de la cartographie	25
6.7 La cartographie	26
6.8 Les procédures spéciales	29
6.8.1 La prolongation du champ vers le haut	29
6.8.2 L'élimination des perturbations de très fortes amplitudes	32

	<u>Pages</u>
6.9 Le contrôle de la fiabilité du système	38
6.9.1 Généralités	38
6.9.2 Description du test	39
6.9.3 Paramètres du champ d'épreuve	39
6.9.4 Les perturbations sur le champ d'épreuve	41
6.9.5 Les résultats du test	41
VII. Les résultats du levé	44
7.1 Généralités	44
7.2 Les déviations des lignes de vol	45
7.3 Les différences aux croisements	45
VIII. La précision des résultats	52
IX. Analyse qualitative des résultats	54
9.1 Les cartes du champ total	54
9.2 Le champ régional et la notion d'anomalie	57
9.3 Les cartes résiduelles	61
9.3.1 Introduction	61
9.3.2 La carte C_I	62
9.3.3 La carte C_{II}	62
X. Bibliographie	67

<u>Liste des tables</u>	<u>Pages</u>
I. Les paramètres de vol	5
II. Locations de la station de base	8
III. Résultats des croix de test	11
IV. Caractéristiques de l'avion	14
V. Les erreurs et leurs sources	53
VI. Différences entre les champs de références et des points expérimentaux	59
VII. Coefficients des polynômes des champs de références	60

<u>Liste des figures</u>	<u>Pages</u>
1. Schéma de la croix d'anisotropie	12
2. Exemple de test d'anisotropie	13
3. L'avion en vol avec la sonde	16
4. Le système d'acquisition des données	16
5. Le poste de commande du navigateur	16
6. Diagramme schématique du système d'acquisition des données	17
7. Organigramme du système du traitement des données (STRADAG) utilisé pour la carte aéromagnétique de la Suisse	28
8. Organigramme schématique de la procédure de continuation du champ vers le haut	33
9. Organigramme schématique de la procédure de restitution des lignes fortement perturbées	34
10./11./12. Exemples de lignes fortement perturbées et de leurs restitutions	35-37
13. Champ d'épreuve, sans perturbation, calculé directement sur les points de grille	42
14. Champ d'épreuve perturbé, restitué par le système de traitement des données	43
15. Carte des lignes de vol réelles du levé à l'altitude 5000 m	46
16. Cartes des lignes de vol réelles du levé à l'altitude 6000 '	47
17. Statistique des déviations des lignes de vol par rapport aux lignes idéales	48

	<u>Pages</u>
18. Statistique des différences aux croisements entre lignes de mesure et lignes de contrôle	49
19. Carte des différences aux croisements entre lignes de mesure et lignes de contrôle pour l'altitude 5000 m	50
20. Carte des différences aux croisements entre lignes de mesure et lignes de contrôle pour l'altitude 6000 '	51
21. Carte du champ résiduel à l'altitude 6000 '	64
22. Carte du champ résiduel dans la zone du Marchairuz	65
23. Carte du champ résiduel à l'altitude 5000 m	66

Résumé

Deux cartes aéromagnétiques du champ total ont été préparées à l'aide des mesures effectuées entre 1978 et 1981 à l'aide d'un avion Twin-Otter de Havilland mis à la disposition de la Commission Suisse de Géophysique par la Direction Fédérale des Mensurations Cadastrales. Les mesures ont été effectuées sur les lignes orientées nord-sud, espacées de 5 km, et volées aux altitudes de 5000 m pour la totalité du territoire et 6000' pour la partie au nord des alpes.

Les chapitres I à VIII du présent travail décrivent la méthode du levé, les procédures de traitement et de corrections de données ainsi qu'une analyse des erreurs et de la qualité des résultats.

Le chapitre IX traite de l'analyse qualitative des cartes du champ total et le passage de celles-ci aux cartes résiduelles.

Zusammenfassung

In den Jahren 1978 bis 1981 wurden zwei aeromagnetische Karten des Totalfeldes für das Gebiet der Schweiz erstellt. Das dazu verwendete Flugzeug, eine de Havilland Twin Otter, wurde der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission von der Eidgenössischen Vermessungsdirektion zur Verfügung gestellt. Die Vermessung, entlang Nord-Süd streichenden Linien mit einem Abstand von 5 km zueinander, wurde für das gesamte Gebiet auf einer Flughöhe von 5'000 Meter über Meer und zusätzlich für das Gebiet nördlich der Alpen auf 6000 Fuss über Meer durchgeführt.

Die ersten acht Kapitel der vorliegenden Arbeit beinhalten eine Beschreibung der Vermessungsmethode und der Datenverarbeitungsprozeduren sowie eine Analyse der Messgenauigkeit und der Qualität der Resultate.

Nach einer qualitativen Deutung der Karten des Totalfeldes werden aus ihnen in Kapitel 9 die Karten des Residualfeldes abgeleitet.

Summary

Between 1978 and 1981, two aeromagnetic maps of Switzerland, displaying the total field intensity, were compiled under the auspices of the Swiss Geophysical Committee. The measurements were performed with the aid of a de Havilland Twin Otter operated by the Eidgenössische Vermessungsdirektion, along north-south trending lines, 5 km apart from each other, at an altitude of 5000 m for the whole territory and at 6000 feet for the area north of the Alps.

The first eight chapters of this study are devoted to a description of the methodology of the survey and of the data processing procedures. This first part also includes a discussion of the accuracy of the measurements as well as an analysis of the quality of the results.

After presenting a qualitative analysis of the total field intensity maps, chapter 9 discusses the derivation of the residual maps.

Remerciements

Ce travail a pu être entrepris grâce à la compréhension de Monsieur le Conseiller Fédéral Kurt Furgler qui a mis gracieusement à notre disposition l'outil le plus important de ce levé: l'avion de la Direction Fédérale des Mensurations Cadastrales. Qu'il trouve ici l'expression de notre très sincère gratitude.

Notre reconnaissance va aussi à M. Broillet, responsable des levés aériens à la Direction Fédérale des Mensurations Cadastrales, qui s'est chargé de transmettre en termes enthousiastes notre requête au Département Fédéral de Justice et Police et qui, tout au long du levé, nous a fait bénéficier de sa bienveillante compréhension.

Monsieur Jeanrichard, directeur de l'Office Fédéral de Topographie a accepté que les cartes soient imprimées dans ses services. Nous l'en remercions de tout coeur au nom de la Commission Suisse de Géophysique.

Nous voudrions aussi exprimer notre reconnaissance à la Direction Fédérale des Aéroports Militaires qui a mis à notre disposition ses collaborateurs pour l'installation du système de mesure à l'intérieur de l'avion et qui a pris en charge les coûts résultants de cette installation.

A la firme GEOMETRICS, Sunnyvale/Californie, et à son collaborateur Monsieur F. Faber, nous voudrions pouvoir exprimer notre gratitude. Leur compréhension à l'égard de nos demandes de modification et d'adaptation de l'appareillage ainsi que leur spontanéité à répondre à nos questions, nous ont grandement facilité la tâche tout au long du levé et du traitement des données.

Nous ne saurions passer sous silence les très fructueuses discussions que nous avons eues tout au long de ce travail avec Messieurs les Professeurs W. Lowrie (Zurich) et

J.-J. Wagner (Genève). Les conseils qu'ils nous ont prodigués lors de la rédaction du présent travail nous ont été d'une aide inestimable.

Le traitement et l'interprétation des données de ce travail n'ont été possibles que par l'emploi massif des moyens de calcul électronique de l'EPF-Z. Nous sommes reconnaissants à la direction de l'Ecole et du Centre de calcul d'avoir mis tous les moyens à notre disposition dans un esprit de franche collaboration.

Monsieur Alain Geiger s'est chargé d'effectuer les tests du système de traitement des données. Pour le soin et la précision avec lesquels il a accompli cette tâche, il mérite toute notre reconnaissance.

Enfin, "last but not least", nos pensées émues et reconnaissantes vont aux mécaniciens, pilotes et navigateurs en qui nous avons trouvé non seulement des collaborateurs efficaces et dévoués, mais des compagnons dont le souvenir restera inoubliable. Que Messieurs Scherrer, Schilling et Payer, nos pilotes, Messieurs Hubscher et Jäggi, nos navigateurs, et Messieurs Nigg, Widmer et Baumberger, nos mécaniciens, acceptent ici et en toute simplicité l'expression de nos remerciements les plus sincères.

I. INTRODUCTION

Jusqu'en 1979, année de la publication par la Commission Suisse de Géophysique des cartes magnétiques au sol de notre pays (intensité totale, inclinaison, déclinaison), dues à G. Fischer, P.A. Schnegg et J. Sesiano, la Suisse ne possédait pas de levé couvrant l'ensemble du pays avec une densité de mesures permettant une interprétation globale à grande échelle.

En effet, à cette date, les seuls documents disponibles étaient les résultats du levé de Bruckmann effectué entre 1930 et 1933 et ayant une densité de mesures d'une station pour 308 km². Notons qu'en 1959 déjà un levé aérien avait été effectué sur une partie du Jura Vaudois par la compagnie SAPA mais sans qu'aucune carte n'ait été publiée (Schwab 1960). En 1970, la CGG (Compagnie Générale de Géophysique) effectua à son tour un levé aéromagnétique du Jura et d'une partie du plateau pour le compte de la compagnie SHELL. Le résultat de ce levé a été publié sous forme d'une carte à l'échelle 1/785000 par Bitterli (1970).

Du fait de la taille restreinte de cette carte, les données de ce levé n'ont pas été intégrées dans l'étude présente.

Bien que la qualité du levé de Fischer, Schnegg et Sesiano soit remarquable, il apparut à la Commission Suisse de Géophysique en 1977 déjà, qu'un levé magnétométrique aérien pourrait être un complément nécessaire aux levés en cours ou déjà existants.

Les raisons qui guidèrent la Commission dans le choix de la méthode aéroportée furent principalement: la rapidité de la méthode, la haute densité des mesures, le bon rapport quantité de mesures/prix et enfin le fait que ces mesures pourraient être effectuées à altitude constante.

Cette dernière raison a joué un rôle important dans ce choix, car en volant à une altitude absolue constante, on place toutes les mesures au-dessus des corps perturbateurs et, surtout, l'on minimise les effets des structures affleurantes et de petite dimension. Cet effet filtrant de la méthode n'est pas à négliger, particulièrement lors d'un levé de reconnaissance à large maille, comme celui présenté dans ce fascicule.

II. GENERALITES

On entend par levé aéromagnétique un levé du champ total effectué à l'aide d'un avion à voilure fixe ou mobile (hélicoptère) équipé d'un magnétomètre donnant l'intensité du champ magnétique. Ce magnétomètre peut être du type à précession ou à pompage optique.

Deux techniques différentes de levé se disputent la faveur des géophysiciens:

La première de ces méthodes consiste à effectuer les mesures en suivant au plus près et à distance constante la topographie et la seconde, plus commune aux levés de reconnaissance, consiste à voler à altitude absolue (référée au niveau de la mer) constante.

Dans les deux méthodes de levé, le véhicule porteur de l'appareillage ne subissant pas ou peu les contraintes de la topographie, il est aisé d'effectuer les mesures d'une façon doublement optimale, pour la mise en évidence des corps perturbateurs et pour le traitement des données, la cartographie surtout.

La façon de procéder consiste à effectuer les mesures sur des lignes droites parallèles et équidistantes. Ces lignes sont de préférence orientées nord-sud pour les levés de reconnaissance et perpendiculairement aux structures géologiques dans les levés de détail.

Enfin et afin d'éviter des "marches d'escaliers" dans les résultats, dues aux vols étalés dans le temps (voir chapitre de la réduction des mesures), l'on procède à un calage sur des lignes perpendiculaires aux lignes de mesure. Ces lignes de contrôle sont généralement espacées d'un multiple entier de l'espacement des lignes de mesure.

III. LES PARAMETRES DU LEVE

On entend par paramètres d'un levé aéromagnétique des grandeurs relatives à la sensibilité des mesures, de l'altitude de vol, de la vitesse de l'avion, de l'espacement des lignes, etc., et définissant le cadre du dit levé. Ces paramètres, définis en fonction des objectifs à atteindre, sont fixés avant le début des opérations et restent constants tout au long de celles-ci.

Les plus importants de ces paramètres sont: l'espacement des lignes de mesure et l'altitude de vol. Dans le cadre d'un levé de reconnaissance ces deux grandeurs sont généralement calculées en tenant compte des trois relations empiriques suivantes:

- a) L'espacement des lignes doit être environ égal à la profondeur moyenne des structures à mettre en évidence.
- b) L'altitude de vol optimale est comprise entre 0.2 et 0.5 fois l'espacement des lignes de mesure.
- c) L'espacement des lignes de contrôle doit être compris entre 3 et 5 fois celui des lignes de mesure.

Evidemment, ces relations ne peuvent pas toujours être respectées du fait qu'il est parfois impossible de voler en dessous d'une certaine altitude, particulièrement à cause de la topographie.

Dans ce cas on recherche une solution de compromis respectant au mieux les contraintes économiques, topographiques et géophysiques.

La Suisse est un exemple typique où une solution hybride s'est imposée. En effet, la profondeur extrême du socle cristallin sous le plateau molassique étant d'environ 5 km, alors que l'altitude moyenne de la topographie est de 500 m, l'espacement idéal

des lignes de mesure aurait dû être de 4500 m et l'altitude de vol comprise entre 900 m et 2250 m. Mais alors comment couvrir tout le territoire, dont près de la moitié comporte des sommets de plus de 3000 m, avec de tels paramètres ?

Devant ce dilemme, il parut préférable à la Commission Suisse de Géophysique de procéder à deux levés dont les paramètres seraient les mêmes, à l'exception des altitudes de vol. Le premier levé d'envergure nationale, devant couvrir tout le territoire, nous a contraint de choisir une altitude supérieure au plus haut point des Alpes suisses. Le second levé, plus destiné au calcul des profondeurs du socle de l'avant-pays et du Jura, a été volé en respectant au mieux les règles énoncées précédemment.

Les paramètres définitivement adoptés sont résumés dans la table I.

Altitude de vol	5000 m	6000' (1829 m)
Espacement des lignes de mesure	5000 m	5000 m
Espacement des lignes de contrôle	20000 m	20000 m
Orientation des lignes	NS et EW	NS et EW
Base de temps des mesures	1 sec	1 sec
Sensibilité de l'appareillage	0.25 nT	0.25 nT
Vitesse de l'avion	180 km/h	180 km/h
Base de temps pour le positionnement	36 sec	36 sec

Table 1

Notons que Reid (1980) a démontré, en utilisant les résultats de Spector et Grant (1970) et en tolérant au maximum 5% d'alias sur les fréquences, que les lois suivantes devraient être respectées pour un levé aéromagnétique:

$x = 2.$	h	pour une cartographie simple
$x =$	h	pour des transformations telles que: réduction au pôle, calcul des dérivés, etc.
$x = 0.5$	h	pour une modélisation d'anomalies isolées

h = profondeur moyenne des sources magnétiques,

x = espacement des lignes de vol.

On voit immédiatement que dans la partie septentrionale de la Suisse, l'espacement des lignes de vol du levé à basse altitude (6000') n'est pas des meilleurs pour une modélisation des anomalies à partir de la carte (cette remarque ne s'applique pas pour une interprétation strictement bi-dimensionnelle).

IV. OPERATION ET ACQUISITION DES DONNEES

Préalablement à tout levé, il importe de procéder à sa préparation. Cette phase consiste principalement à l'élaboration des documents de vol devant servir au pilote et au navigateur pour le maintien de l'avion au plus près de la ligne idéale. Ces documents se présentent sous forme de bandes de cartes d'une largeur de 50 cm environ sur lesquelles sont reportés en intégralité les chemins théoriques de vol.

Parallèlement à ce travail, il est nécessaire de dresser une carte de synthèse du territoire à lever, comportant des lignes de vol, les émetteurs de radio-navigation disponibles, les principaux points topographiques et les restrictions de vol dues aux aéroports par exemple. Cette carte doit être envoyée aux services responsables de la sécurité de vol avant le début des opérations.

Les corrections des variations diurnes et séculaires du champ magnétique jouant un rôle important dans le traitement des données, l'enregistrement de celles-ci s'impose de lui-même. Pour cela il faut dès le début du levé choisir des emplacements où l'on pourra placer une station automatique d'enregistrement du champ total.

Ces emplacements devront être choisis pour leur proximité des zones de levé et/ou pour leur quiétude magnétique (pas d'anomalie et gradients horizontaux et verticaux du champ faibles).

Les emplacements qui ont été retenus pour les levés de la Suisse sont énumérés dans la table 2.

Lieu	Canton	Coordonnées kilométriques suisses
Avegno di Fuori	Tessin	701.5/117.6
Anzère	Valais	597.3/127.7
Wil	Zürich	680.7/273.4
Hackab	Zürich	692.1/256.2

Table 2

En plus de ces valeurs enregistrées à la cadence d'une par minute, nous avons pu bénéficier des données fournies par la station AMOS de l'observatoire de Neuchâtel et consistant en valeurs annuelles et mensuelles du champ total.

Nous avons pu aussi disposer, grâce à l'amabilité de MM Schnegg et Fischer, des bandes magnétiques d'enregistrement de cette station, lors de pannes de notre propre station.

Lors des vols proprement dits, un bon passage de l'avion sur les lignes de vol idéales ainsi qu'un bon maintien de l'altitude et de la vitesse ont été assurés par l'emploi d'un pilote automatique et par des corrections transmises au pilote par le navigateur. Le rôle joué par le navigateur dans un tel levé est primordial, car aux altitudes choisies le pilote ne peut pas guider son avion avec suffisamment de précision, ne voyant pas le sol à la verticale de son appareil. L'utilisation de la lunette du système photogrammétrique dont est équipé l'avion a été particulièrement décisive dans l'économie de temps réalisée durant des procédures de positionnement de l'avion.

Les données mesurées lors de ce levé, à la cadence d'une par seconde, ont été directement enregistrées sur bandes magnétiques, permettant ainsi un traitement direct par ordinateur.

Les données enregistrées et leur structure sont les suivantes:

Un caractère alphabétique (A)	1 digit
Le numéro de la ligne	5 digits
Le numéro fiduciaire	6 digits
Le temps (heures, minutes, secondes)	6 digits
L'intensité du champ magnétique	5 digits
Un caractère alphabétique de séparation (B)	1 digit
L'altitude absolue (barométrique)	3 digits.

L'écriture sur la bande magnétique s'est faite par blocs de 10 enregistrements, séparés les uns des autres par un IRG (Inter Record Gap).

En plus de l'enregistrement digital des données, le système d'acquisition comporte un enregistreur sur papier à deux canaux.

Cet enregistreur sur lequel figurent les marques fiduciaires (les marques fiduciaires correspondent au déclenchement de la caméra de positionnement) et le champ magnétique en deux échelles différentes doit servir à suppléer à une défaillance éventuelle de l'enregistreur à bande magnétique.

Classiquement, le positionnement de l'avion s'effectue à l'aide d'une caméra 35 mm synchronisée à la prise des échantillons et délivrant un film continu du terrain survolé; chaque photo comportant en surimpression dans la marge supérieure, le numéro correspondant de l'échantillon du champ magnétique.

Cette méthode, très précise pour des vols à faible altitude (150 à 500 m au dessus du sol), perd de sa fiabilité lorsqu'il s'agit de voler à haute altitude. C'est pourquoi une caméra photogrammétrique synchronisée au système d'acquisition des données et équipée d'un système automatique d'horizontalisation a été utilisée. Cette caméra fournit des photographies à haute définition de 220 m de côté et comportant la date, un numéro d'ordre, le temps (heure, minute, seconde) ainsi que l'altitude barométrique.

Avant de commencer les opérations, il est important de connaître l'influence de l'avion sur la valeur du champ mesuré. Cet effet, s'il est isotrope, c'est-à-dire ne dépend pas de la direction de vol, peut simplement être négligé, puisqu'il est constant. Dans le cas contraire, il est nécessaire d'en tenir compte dans les corrections des mesures.

Afin de déceler une éventuelle anisotropie des mesures (effet de cap), on choisit généralement de voler une croix, orientée Nord-Sud/Est-Ouest, deux fois en parcourant chaque branche dans les deux sens dans une région sans anomalie (fig. 1). Le test consiste à comparer les valeurs aux croisements entre les lignes orientées différemment.

Le présent test, s'il est répété périodiquement au cours du levé, peut aussi donner une indication sur une dérive éventuelle des appareils.

Pour le levé aérien de la Suisse, nous avons choisi de centrer notre croix de test sur le Bichelsee, coordonnées 710200/257300 et d'y effectuer des mesures à chaque début et fin de campagne de levé. La figure 2 montre un des ces tests sous la forme d'un graphique du champ magnétique en fonction du temps.

A titre d'exemple, nous donnons les résultats issus des croix mesurées lors du premier et du dernier jour du levé (table 3 et figure 2).

2 juillet 1978

Lignes	Croisements N-S	Croisements S-N
W-E	- 2. nT	- 2. nT
E-W	+ 2. nT	- 2. nT

Valeur moyenne du champ = 46882.4 nT

7 août 1981

Lignes	Croisements N-S	Croisements S-N
W-E	0. nT	- 2. nT
E-W	0. nT	- 2. nT

Valeur moyenne du champ = 46945.6 nT

1978-1981 = 63.1 nT

soit

21 nT/année

Table 3

Ce test ne montre pas une anisotropie significative; c'est pourquoi nous avons renoncé à corriger nos mesures pour l'effet du cap.

Notons que la différence des valeurs annuelles moyennes obtenues correspond assez bien à la variation séculaire enregistrée à l'Observatoire de Neuchâtel (différence des valeurs moyennes entre 1978 et 1981 = 57.5 nT).

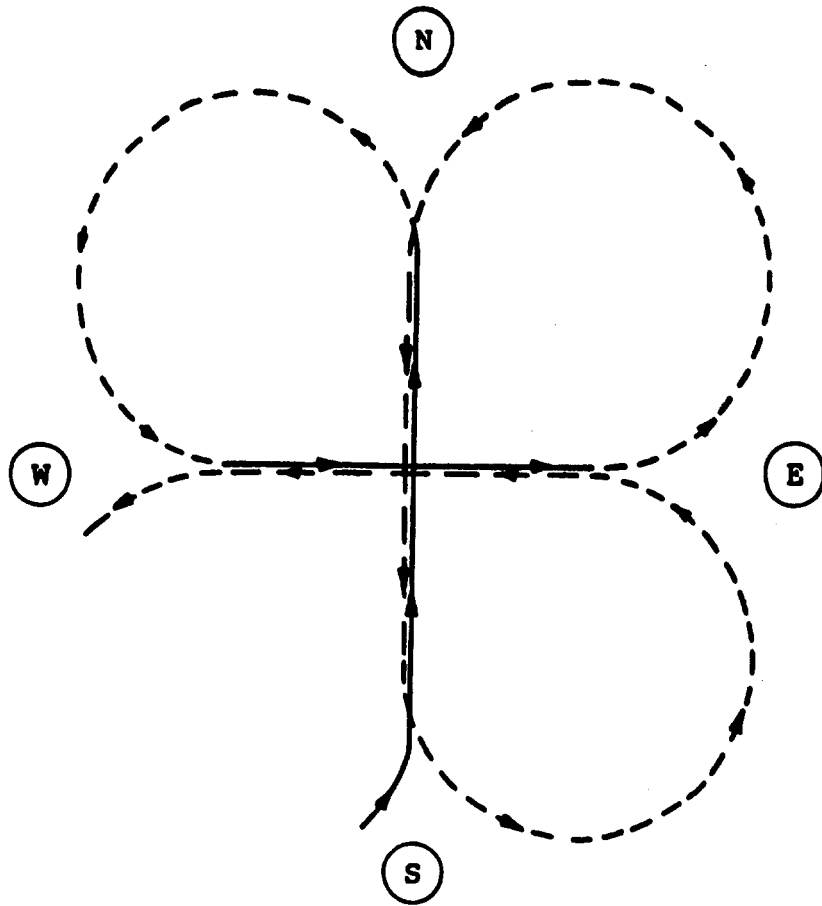


fig. 1

2 juillet 1978

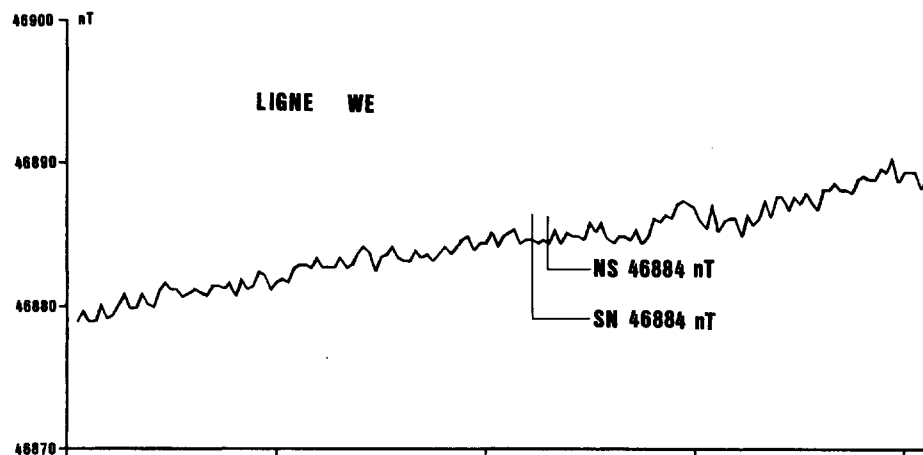
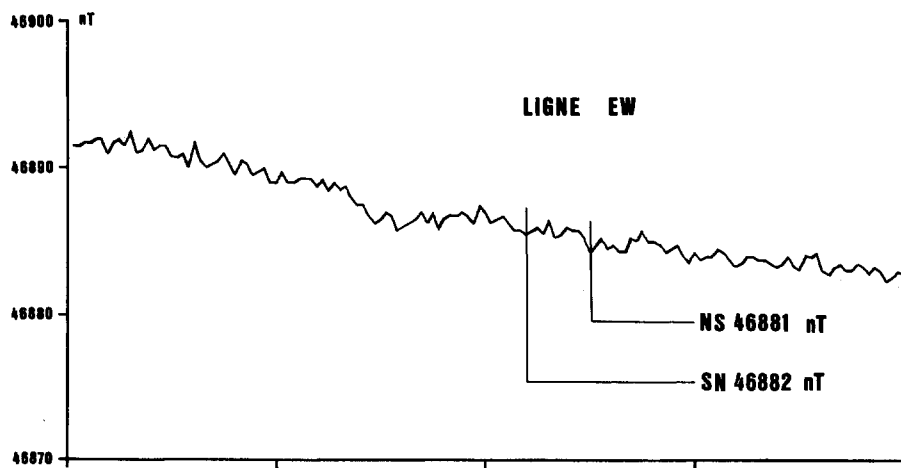
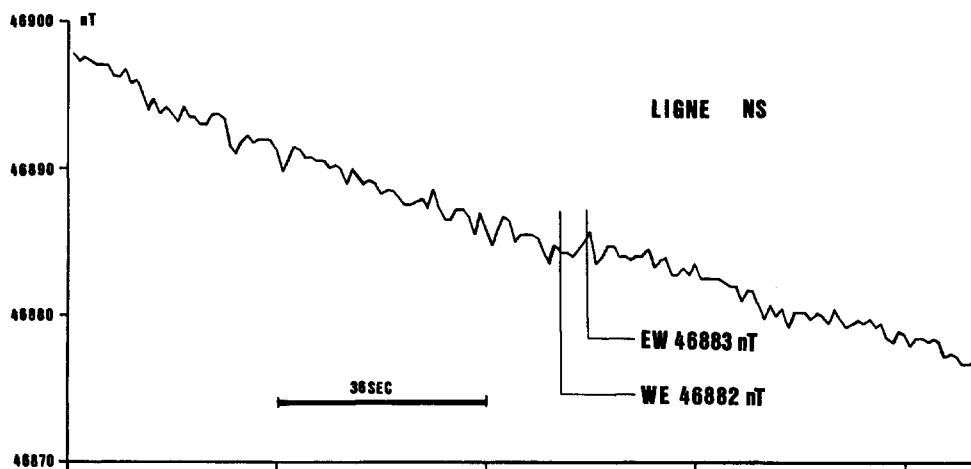
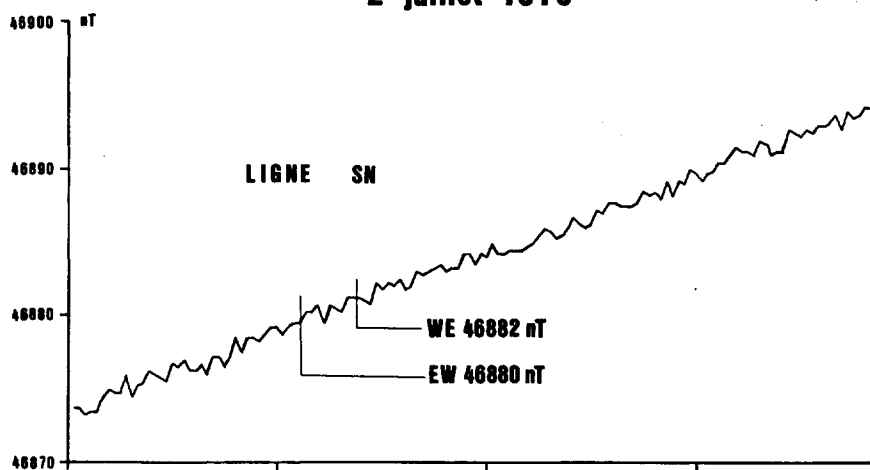


fig. 2

V. L'AVION ET SON EQUIPEMENT

L'avion utilisé pour les levés magnétiques de la Suisse fut un Twin Otter de Havilland Canada, immatriculé HB-LID et appartenant à la Direction des Mensurations Cadastrales, Département Fédéral de Justice et Police. Ses caractéristiques sont résumées dans la table 4:

Catégorie STOL (Short Take Off and Landing)

Moteurs	deux turbo-propulseurs GE/PT GA de	652 CV
Longueur		15.77 m
Envergure		19.81 m
Hauteur		5.67 m
Poids à vide		3350 kg
Charge max.		2320 kg
Vitesse max.		335 km/h
Vitesse de décrochage		108 km/h
Vitesse ascensionnelle		8 m/sec
Altitude de vol max. à pleine charge		8140 m
Longueur de décollage (15 m au dessus du sol)		366 m
Longueur d'atterrissage		320 m
Charge en carburant	max.	1112 kg

Table 4

Les principaux éléments du système d'acquisition des données et de navigation équipant l'avion sont donnés ci-dessous avec leurs caractéristiques:

1. Magnétomètre à précession GEOMETRICS, modèle G 801/3 -
Sensibilité maximum: 0.25 nT à 1 sec d'intervalle. (Une description détaillée du principe de fonctionnement des magnétomètres à précession peut être trouvée dans: Applied Geophysics - Telford, Geldart, Sheriff et Keys.)
2. Intervallomètre électronique avec horloge à quartz, modèle G-803-201.
3. Système d'acquisition des données Geometrics G-704.
4. Enregistreur analogique sur papier à deux canaux Hewlett Packard, modèle 7130 A.
5. Enregistreur digital à bande magnétique, sept pistes, Kennedy 1600, 200 Bpi.
6. Sonde pour le magnétomètre avec 30 m de câble.
7. Treuil électrique pour la manipulation de la sonde avant atterrissage et après décollage.
8. Caméra WILD 220 mm, type RC 10, couplée à l'intervallomètre avec système automatique d'horizontalisation.
9. Poste de navigation et de commande de la caméra.
10. Pilote automatique Collins, type AP 106.

Les figures 3 à 5 montrent l'avion en vol avec la sonde de mesures, le système d'acquisition des données et le poste de commande du navigateur et la figure 6, un diagramme schématique du fonctionnement du système d'acquisition des données.

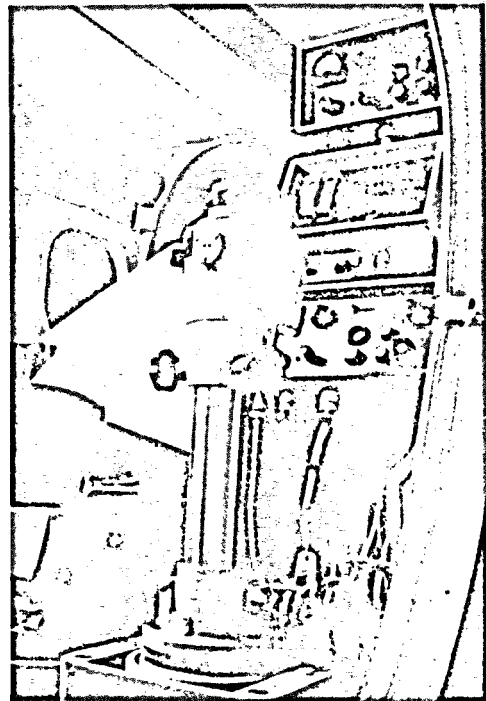
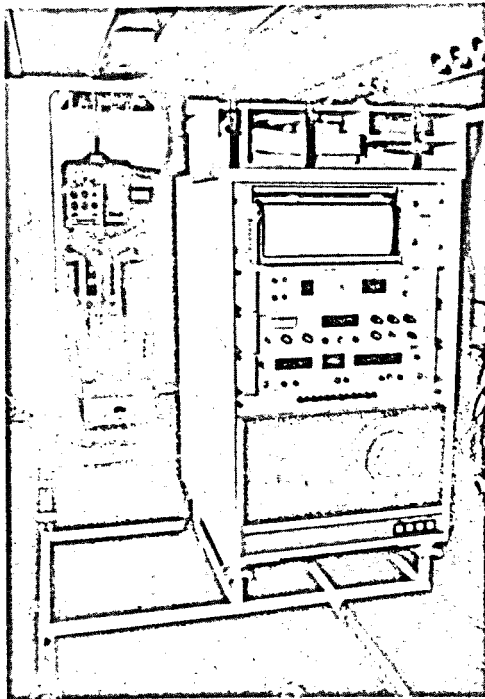
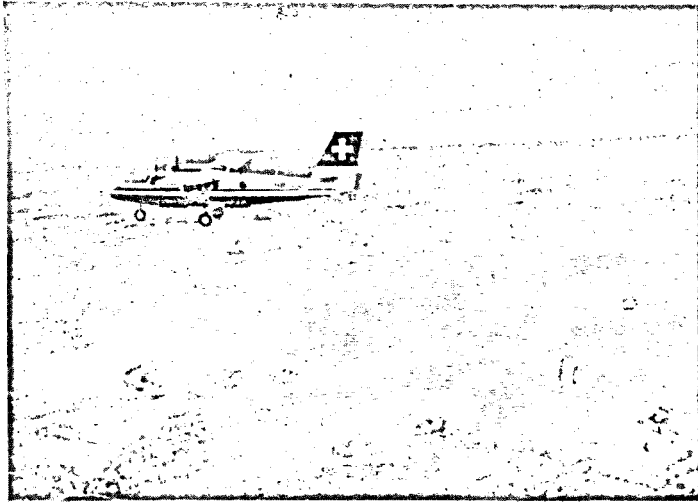


fig. 3,4,5

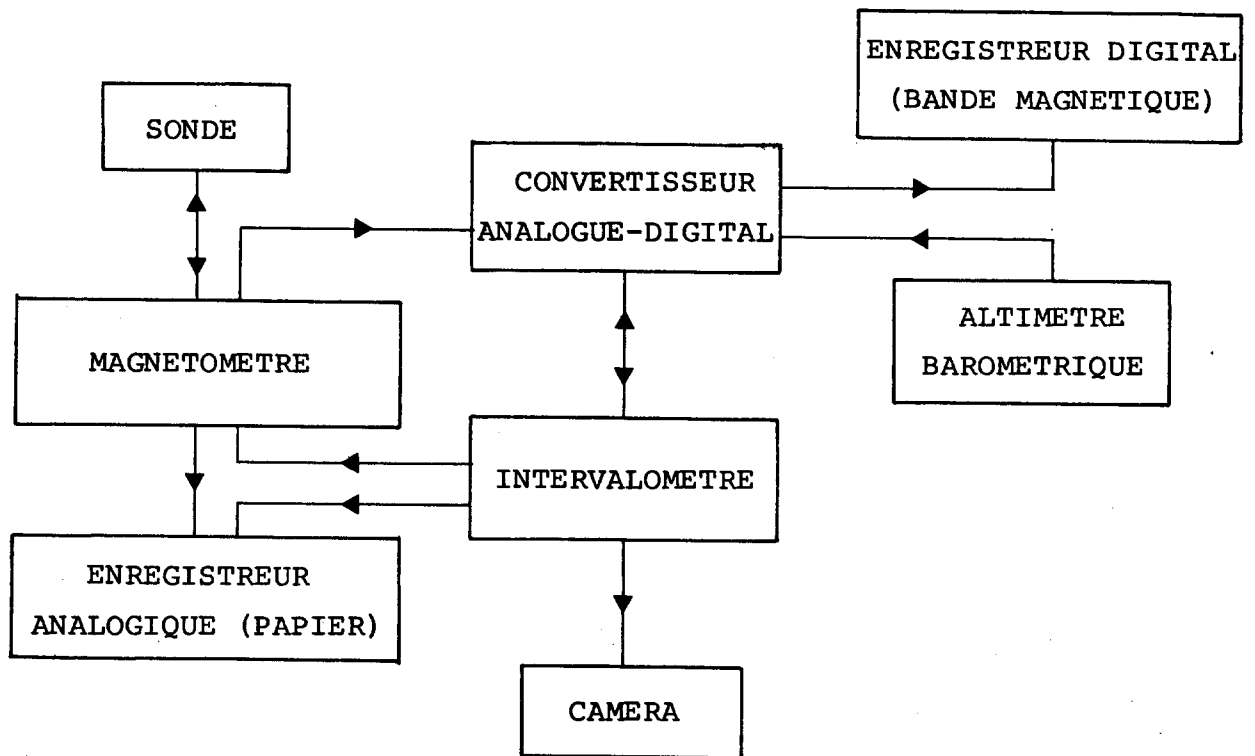


fig. 6

VI. LE TRAITEMENT DES DONNEES

6.1 Introduction

Sous le terme "traitement des données", on entend les opérations que doivent subir les données, depuis la bande magnétique de terrain jusqu'aux résultats du levé sous forme de cartes du champ magnétique.

Depuis l'apparition, en géophysique aéroportée, de l'acquisition digitale des données, la tendance générale du marché a été d'augmenter le nombre des paramètres mesurés. Parallèlement, et par nécessité, le traitement automatique de ces données par des calculateurs électroniques s'est généralisé.

Les paragraphes suivants décrivent les lignes générales du traitement qu'ont suivi les données au travers du système STRADAG (Système de Traitement Automatique des Données Aéro-Géophysiques). Ce système, développé dans le cadre du projet de la carte aéromagnétique de la Suisse, comporte plus de 7000 pas de programme en langage FORTRAN, répartis en 32 programmes et 80 fonctions et sous-routines.

On peut à l'intérieur du traitement complet, distinguer 6 blocs principaux qui sont: la reformatisation, la correction des variations diurnes et séculaires, l'assignation des coordonnées, le tri et l'égalisation, la préparation pour la cartographie (gridding) et la cartographie proprement dite. En plus, certaines procédures spéciales de restitution des données ont été incluses dans le système, en raison des conditions particulières de ce levé. Un organigramme de ce système est donné à la figure 7.

6.2 La reformatisation

La bande de terrain contenant, comme nous l'avons vu au chapitre 4, les données en bloc de dix enregistrements écrits en BCD (Binaire Codé Décimal) séparés par un IRG (Inter Record Gap), il est nécessaire de réécrire séquentiellement les enregistrements à raison d'un par ligne, sur un fichier, en un format propre au traitement des données. Après la reformatisation les bandes de terrain sont archivées comme documents de références.

6.3 Le positionnement

La première phase du positionnement consiste à marquer sur des cartes topographiques la position des ortho-photos prises depuis l'avion. Afin d'accélérer cette procédure, on ne note, avec leur numéro, que les photos correspondant à un changement de direction de l'avion (spots). Ce travail est généralement effectué chaque jour sur le terrain, avec les données du jour précédent.

Ce sont ces cartes topographiques que le centre de dépouillement reçoit en même temps que les rapports de vol et les bandes magnétiques pour la seconde phase du travail. A l'aide d'une table à digitaliser, un opérateur relève les coordonnées locales (sujet) des spots. Celles-ci sont ensuite stockées sur un support magnétique quelconque, puis transformées en coordonnées absolues (objet) par l'ordinateur. Ces dernières sont alors contrôlées graphiquement par superposition d'un dessin d'ordinateur et de la carte de terrain. Lorsque les erreurs éventuelles ont été éliminées, ces données, généralement fragmentées, sont classées pour former un bloc correspondant à une ligne de vol entière. L'ensemble de ces blocs est stocké, au fur et à mesure de l'avancement du levé, sur un fichier d'où ils pourront être extraits par la suite par le programme d'assignation des coordonnées.

6.4 Les corrections des variations diurnes et séculaires

Si pour une raison quelconque l'ensemble du levé ne peut être effectué sur une seule année, il est judicieux de réduire les données magnétiques à une année de référence. Pour ceci, il est nécessaire de disposer de deux stations de base: L'une d'elle fonctionnant comme observatoire magnétique, c'est-à-dire restant en fonctionnement constant durant toute la durée du levé et en un endroit fixe; la seconde pouvant être déplacée de région en région, selon les nécessités, et ne fonctionnant que durant les périodes de vol. L'utilité de deux stations s'explique par le fait qu'il n'est pas seulement nécessaire de corriger les variations diurnes, mais aussi les variations séculaires.

Si nous supposons que sur toute l'étendue du levé les variations magnétiques, diurnes et séculaires, sont synchrones, on peut alors exprimer la réduction à une année A_0 de la façon suivante:

Soit	$F_s(t)$	la valeur de F à la station S au temps t
	$\overline{F_s(a)}$	la valeur moyenne de F à la station S pour l'année A_0
	$F_p(t)$	la valeur de F au point P (x,y) au temps t
	$\overline{F_p(a)}$	la valeur moyenne de F au point P (x,y) pour l'année A_0 .

Posons $F_p(t) = \overline{F_p(a)} + \Delta 1$

$F_s(t) = \overline{F_s(a)} + \Delta 2$

de notre hypothèse de synchronisme des variations, il vient

$$\Delta 1 = \Delta 2$$

$$\Delta 2 = F_s(t) - \overline{F_s(a)}$$

$$\overline{F_p(a)} = F_p(t) - F_s(t) + \overline{F_s(a)}$$

Comme la valeur de S n'est pas connue sur toute l'année, il est nécessaire d'utiliser la valeur moyenne à la base fixe fonctionnant comme observatoire:

$$\text{Alors } \delta_1 = \overline{F_s(a)} - \overline{F_s(m)}$$

$$\delta_2 = \overline{F_o(a)} - \overline{F_o(m)}$$

avec $\overline{F_o(m)}$ valeur moyenne de F à la base fixe durant le temps $m < a$

$\overline{F_s(m)}$ valeur moyenne de F à la base mobile durant le temps $m < a$

En vertu de l'hypothèse de synchronisme il vient

$$\delta_1 = \delta_2$$

$$\overline{F_s(a)} = \delta_1 + \overline{F_s(m)}$$

d'où la valeur au point P pour l'année de référence

$$\overline{F_p(a)} = F_p(t) - F_s(t) + \underbrace{\overline{F_s(m)} - \overline{F_o(m)} + \overline{F_o(a)}}_{\text{valeur constante}}$$

valeur constante

On voit que le passage d'une période à une autre se fait simplement par l'addition d'une constante. Dans le cas du levé magnétique de la Suisse, les valeurs $F_0(m)$ et $F_0(a)$ nous ont été fournies par l'observatoire de Neuchâtel (voir chapitre IV).

A la station de base mobile, les valeurs du champ sont enregistrées sur papier. Lors du dépouillement des enregistrements, les variations du champ ont été approximées par des segments de droites, qui ont ensuite été digitalisées avant d'être fournies à l'ordinateur sous forme de cartes perforées.

Bien évidemment, ces variations ont été contrôlées graphiquement avant d'être stockées, afin de parer à toute erreur éventuelle.

Cette procédure ne permet malheureusement pas d'éliminer les variations à front raide d'origines spatiales ou temporelles (bruit). Pour pallier à cette défaillance de la méthode, un sous-programme de filtrage digital a été introduit après la procédure de l'assignation des coordonnées.

6.5 Le tri et l'égalisation des données

La conception du système développé pour le traitement des données des cartes de la Suisse permet de traiter un levé pouvant comporter jusqu'à plusieurs centaines de milliers de kilomètres de lignes. Pour ceci, le levé est hiérarchisé en blocs contenant $N \times M$ cartes à l'échelle choisie: par exemple $1/25\ 000^e$ ou $1/50\ 000^e$ pour un espacement de ligne de 500 m à 1 km, $1/50\ 000^e$ à $1/200\ 000^e$ pour des espacements de 1 km à 5 km, l'étude étant elle-même subdivisée en un certain nombre de blocs. Ces paramètres, nombre de blocs et nombre de cartes par bloc, sont définis au début du travail, puis mémorisés par le système, qui peut ainsi rechercher lui-même, dans sa banque de données, les valeurs nécessaires pour la carte à traiter.

Le programme de tri ordonne les lignes par ordre croissant des x et les échantillons par ordre décroissant des y , ceci à l'intérieur d'une carte (notation matricielle). Il met en forme un bloc à la fois pour l'égalisation et la cartographie. A la sortie de cette procédure, une routine recherche automatiquement les points de croisement entre lignes de mesure et lignes de contrôle, puis calcule les différences et les mémorise. Ces différences de la valeur de F aux croisements entre les deux différents types de lignes servent à égaliser les valeurs sur les lignes de mesure. Différentes méthodes ont été proposées pour cette égalisation. Bhattacharyya (1971) prône, par exemple, une égalisation en deux temps: le premier temps consistant à mouvoir pour chaque intersection la position de celle-ci dans un cercle de rayon choisi, puis à fixer cette position là où la différence est la plus faible.

Quand cette procédure est terminée, on passe alors à une égalisation par moindres carrés, comme pour l'égalisation d'un réseau géodésique classique. Zurflueh (1968),

pour sa part, introduit une technique impliquant la soustraction d'un polynôme ajusté sur les erreurs entre lignes de mesure et lignes de contrôle.

Yarger et al. (1978) décrivent une méthode permettant de réduire les différences aux croisements en ajoutant des polynômes de faible degré sur les intersections, en partant de l'hypothèse que ces différences ne sont dues qu'aux variations diurnes du champ magnétique et que, par conséquent, elles ne dépendent que du temps.

L'examen de la distribution spatiale et temporelle des différences aux croisements de la carte aéromagnétique de la Suisse montre une corrélation très forte entre ces différences et les périodes de mesures. C'est-à-dire qu'un bloc de lignes mesurées durant la même semaine, par exemple, recoupé par une ligne de contrôle mesurée à une époque différente, montre des écarts quasiment constants, et ceci assez systématiquement pour que l'on puisse en tirer la conclusion suivante: La part la plus importante des différences aux croisements, particulièrement dans un levé étalé sur plusieurs années, provient d'un désaccord entre la valeur moyenne calculée du champ et sa valeur moyenne réelle.

Au vu de cette remarque, nous avons décidé d'appliquer une méthode originale pour l'égalisation des données.

Dans un premier temps, toutes les lignes de contrôle ont été réduites au même niveau de valeur en utilisant des lignes de mesure communes. Puis la même procédure a été appliquée aux lignes de mesure, en se basant alors sur les lignes de contrôle. Avec cet ensemble de données, dont les croisements situés sur de fortes anomalies ont été retirés en raison de l'influence trop forte du positionnement (difficulté d'une pondération objective), il a alors été possible de calculer, par moindres carrés, des polynômes d'égalisation comme l'a décrit Zurflueh (1968), puis de les appliquer directement sur les valeurs des lignes de mesure.

6.6 La préparation de la cartographie

A l'entrée de cette procédure, l'on dispose, par carte, jusqu'à six données par échantillon, les échantillons étant répartis sur des lignes brisées plus ou moins régulièrement espacées.

Afin de pouvoir fournir au programme de cartographie une information compréhensible, c'est-à-dire, des données régulièrement espacées en x et y, il est nécessaire de procéder en deux temps.

Le premier temps consiste à générer une grille à pas régulier dans le sens des lignes de vol et ayant une taille de maille double de la grille définitive. La seconde étape reprend la grille précédemment calculée et procède à une double interpolation unidimensionnelle qui procure au programme de cartographie une grille à maille carrée, de taille égale au dixième de l'espacement entre lignes de vol. La procédure d'interpolation elle-même utilise un spline sous tension, dont la variation du facteur de contrainte permet des interpolations allant d'une droite à un spline cubique classique (Cline, 1974). C'est cette dernière option qui a été utilisée pour l'ensemble des interpolations de ce travail.

6.7 La cartographie

Afin de pouvoir dessiner une carte à l'aide d'une table traçante asservie, il est nécessaire de disposer d'une grille de valeurs à maille carrée; de plus, pour que le dessin soit d'une qualité esthétique suffisante, il faut qu'à l'échelle choisie, la taille de cette maille soit au maximum de 3 mm.

Ainsi, les courbes sont bien approximées par des segments de droite, et une interpolation linéaire entre les points de passage d'une isoligne, à l'intérieur d'une maille, est suffisante.

Le dessin d'une isoligne par une table à dessiner (plotter) requiert de celle-ci la connaissance d'une suite de couples de valeurs x_i, y_i ordonnées dans l'ordre naturel du dessin. L'obtention de ces couples peut se faire selon deux méthodes: La première consiste à trouver dans la grille un point de passage pour l'isoligne à dessiner puis de la suivre, de passages en passages, jusqu'à sa terminaison. Cette méthode, qui est en quelque sorte une simulation du travail d'un dessinateur, n'est en fait pas bien adaptée à l'ordinateur. En effet, elle nécessite en plus de la grille de valeurs, une grille "d'état" permettant à tout instant de connaître si un "passage" a déjà été utilisé ou non. Elle présente de plus l'inconvénient de ne pas permettre la résolution du problème des points de selle.

La seconde méthode, utilisée par notre système, consiste à parcourir, pour chaque valeur d'isoligne, la totalité de la grille, puis de mémoriser l'ensemble des couples X_i, Y_i .

Ce processus terminé, il est alors possible, en utilisant une routine de tri suffisamment efficace, de mettre bout à bout l'ensemble des segments formant une isoligne, puis de donner l'ordre au traçeur de la dessiner.

On voit que cette méthode ne nécessite pas de grille d'état et qu'elle permet de résoudre le problème des points de selle.

Un bon programme de cartographie, en plus de pouvoir dessiner les isolignes rapidement, doit aussi être capable de remplir certaines fonctions auxiliaires, nécessaires à la compréhension des images. Ce sont principalement: Dessin d'un cadre avec coordonnées, le report des lignes de vol, le marquage des courbes en utilisant la courbure des lignes, l'adoucissement des courbes sur demande, le dessin des courbes intercalaires pointillées aux endroits où le gradient horizontal est faible, l'évitement de zones noires par élimination de certaines courbes, la solution du problème des zones sans valeur.

Le programme de dessin inclu dans notre système de traitement possède ces options, avec en plus quelques routines d'optimisation des chemins de plume, le rendant particulièrement efficace (Klingelé 1974).

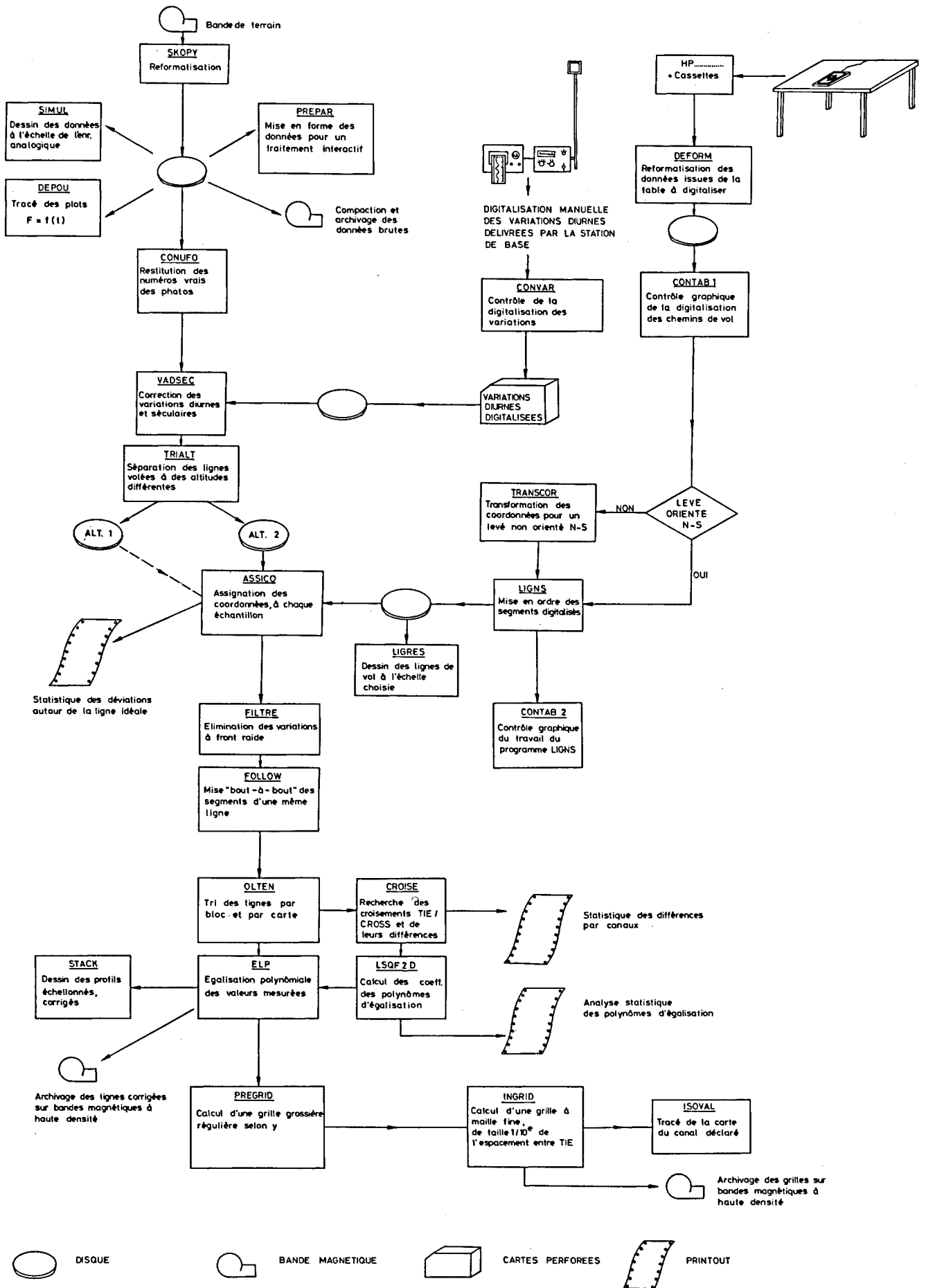


fig. 7

6.8 Les procédures spéciales

6.8.1 La prolongation du champ total vers le haut

Pour des raisons dépendantes de la sécurité aérienne de l'aéroport de Milan (Italie), il n'a pas été possible de voler, à l'altitude de 5000 m, une zone située au sud du Tessin. Cette zone délimitée au nord et au sud par les coordonnées 132500/75000, et à l'ouest et l'est par les coordonnées 687500/730000, tombe dans une région où le vol non commercial est interdit sans autorisation, entre les altitudes 10000 et 40000 pieds (3048 m et 12192 m). Les procédures administratives nécessaires à l'obtention de cette autorisation risquant d'être longues, et par là de perturber le déroulement normal du levé, il fut décidé d'effectuer les mesures à l'altitude de 3000 m au lieu de 5000 m, puis de transposer les valeurs à cette dernière altitude par un procédé mathématique.

Cette procédure, plus connue sous le nom de continuation vers le haut, upward continuation des anglo-saxons, se fait communément en appliquant un opérateur de convolution bi-dimensionnel sur la grille des anomalies (Henderson et Zietz, 1949; Baranov, 1953; Baranov 1975).

Outre le fait que la prolongation par cette méthode ne peut se faire que pour un multiple entier de la taille de la maille de la grille, elle présente un inconvénient majeur, qui est le suivant:

Si nous écrivons l'opération de convolution sous la forme d'une double série appliquée dans le plan x, y représenté par une grille de valeurs de maille $\Delta p, \Delta q$,

$$t(x,y) = \Delta p \cdot \Delta q \cdot \sum_{m,n} F(x - m\Delta p, y - n\Delta q) \cdot C_{mn}$$

nous voyons que la grille résultante sera plus petite de $(m - 1)$ et $(n - 1)$ points que la grille originale; ce rétrécissement se faisant de chaque côté sur une bande de $(m - 1)/2$, respectivement $(n - 1)/2$, valeurs.

Même en appliquant sur la zone en question des opérateurs très petits, tels que ceux décrits par Mufti (1972) et Baranov (1975), et en prenant une grille de maille égale à 1000 m, il ne resterait de la grille originale de 43 km par 57 km qu'une grille transformée de 23 km par 37 km !!

Une seconde possibilité consiste à travailler dans le domaine fréquentiel; c'est-à-dire à multiplier les valeurs de la transformée de Fourier du champ par l'opérateur de prolongement, $e^{2\pi iz}$ (z = longueur du prolongement), puis d'effectuer la transformation inverse pour revenir dans le domaine spatial.

Cette méthode, très rapide, ne s'applique avec succès que sur un champ connu sous forme d'une grille complète (ne présentant pas d'élément dont la valeur n'est pas définie). On voit immédiatement que la zone en question ne remplit pas cette condition minimale.

Evidemment, il aurait été possible de voler des lignes supplémentaires à l'est et à l'ouest de la zone et d'augmenter la longueur de toutes les lignes. Mais pour des raisons économiques (coût de l'heure de vol), nous avons préféré utiliser un autre procédé mathématique plus économique et élégant.

La méthode retenue se fonde sur la solution d'un problème de Dirichlet, citée par Henderson et Zietz (1949), permettant la continuation du champ magnétique d'un point $(x,y,0)$ sur un autre point (x,y,z) par intégration.

Cette intégration appliquée en une dimension, c'est-à-dire sur les profils de vol, peut s'écrire:

$$T(x,h) = -\frac{h}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{T(x,0) d\alpha}{(x - \alpha)^2 + h^2}$$

le problème pratique de la méthode se résumant à remplacer une intégration de moins l'infini à plus l'infini par une intégration sur un espace borné. Il existe une manière élégante de résoudre ce problème, en prolongeant le champ le long de l'axe x , de part et d'autre des limites définissant le segment de droite AB.

Plusieurs possibilités existent pour cette prolongation. La fonction peut être considérée soit comme paire ($F(2A - x) = F(x)$; $F(2B - x) = F(x)$), soit comme impaire ($F(2A - x) = -F(x)$; $F(2B - x) = -F(x)$) ou même comme constante en dehors de l'intervalle AB ($F(2A - x) = F(A)$; $F(2B - x) = F(B)$).

Lors d'essais effectués avec chacune de ces trois possibilités, il est apparu que la solution utilisant une fonction impaire pour la prolongation était celle qui donnait les meilleurs résultats.

La figure 8 montre un organigramme de cette procédure. Remarquons qu'il est nécessaire de soustraire le champ normal (régional) pour l'altitude H_1 avant la continuation, puis d'ajouter le champ normal (régional) pour l'altitude H_2 après cette continuation.

6.8.2 L'élimination des perturbations de très fortes amplitudes

Lors des mesures à basse altitude (6000') dans la zone de l'anomalie du Jorat, de très fortes perturbations à caractère aléatoire sont venues perturber les données (figures 9 à 11).

L'origine de ces perturbations n'a pas pu être élucidée (émetteur radio, radar?) et, fait plus ennuyeux, un filtrage digital classique n'en est pas venu à bout. C'est pourquoi plutôt que de revoler les lignes en cause, une procédure de reconstruction des valeurs a été développée pour l'ordinateur.

Cette procédure commence par l'examen visuel des valeurs du champ sur la ligne à corriger. Cet examen, qui peut être fait sur papier ou sur écran graphique, permet de déterminer l'intervalle, ab , sur lequel la reconstruction devra être effectuée. Ensuite, la totalité des valeurs sont filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas, dont la fréquence de coupure est choisie par l'opérateur. Cette part du traitement étant terminée, l'ordinateur élimine le segment ab et mémorise les parties A et B (fig. 12). A l'aide des points de ces deux segments, les coefficients d'un spline sont calculés et permettent de restituer la partie manquante par interpolation. Il reste alors à assembler les segments A, B et C pour avoir à disposition la ligne au complet.

L'organigramme de cette procédure est dessiné à la fig. 12. Les figures 9 à 11 montrent, deux par deux, les lignes originales, puis restituées par ce procédé. La qualité du résultat se passe de commentaire.

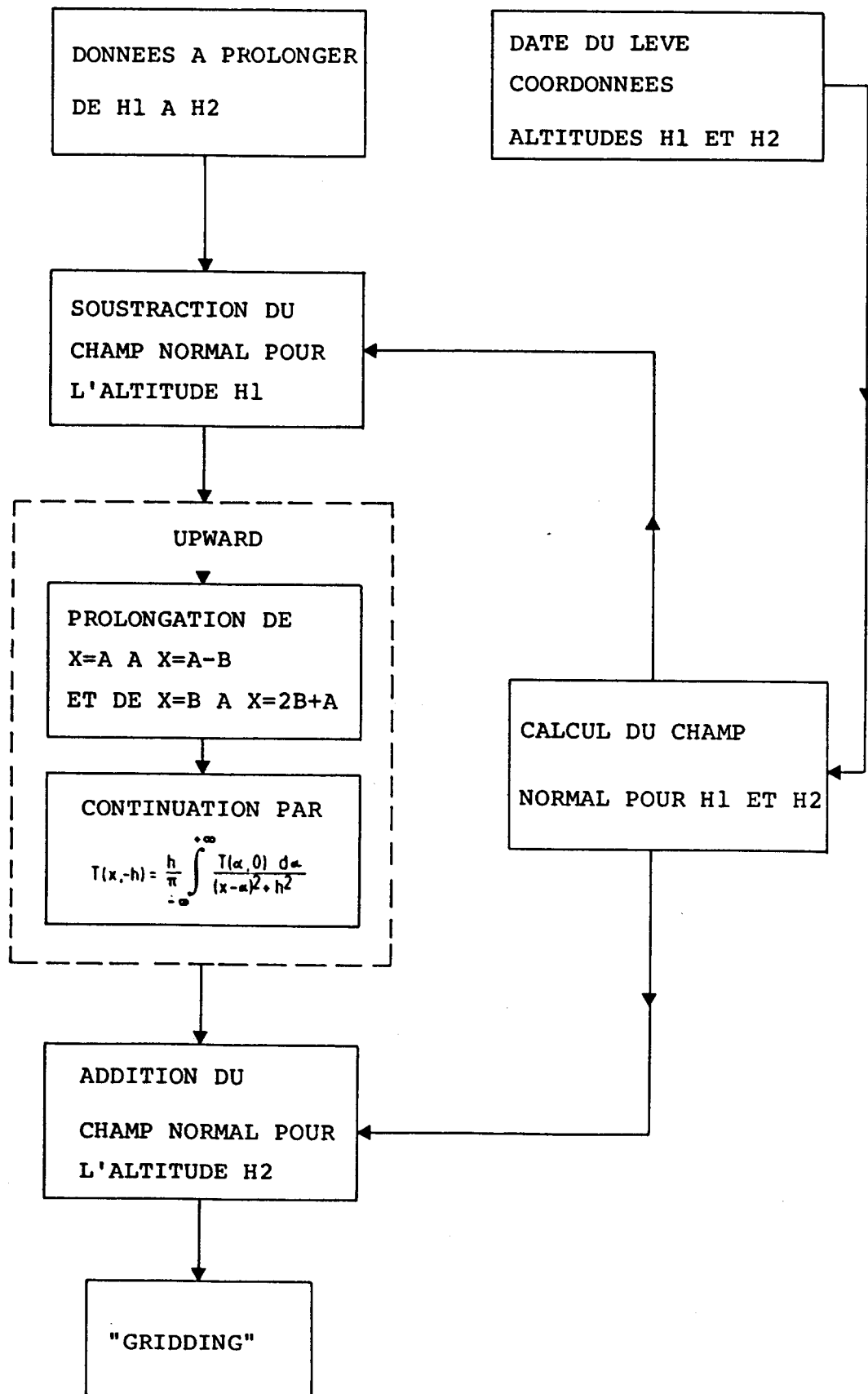


fig. 8

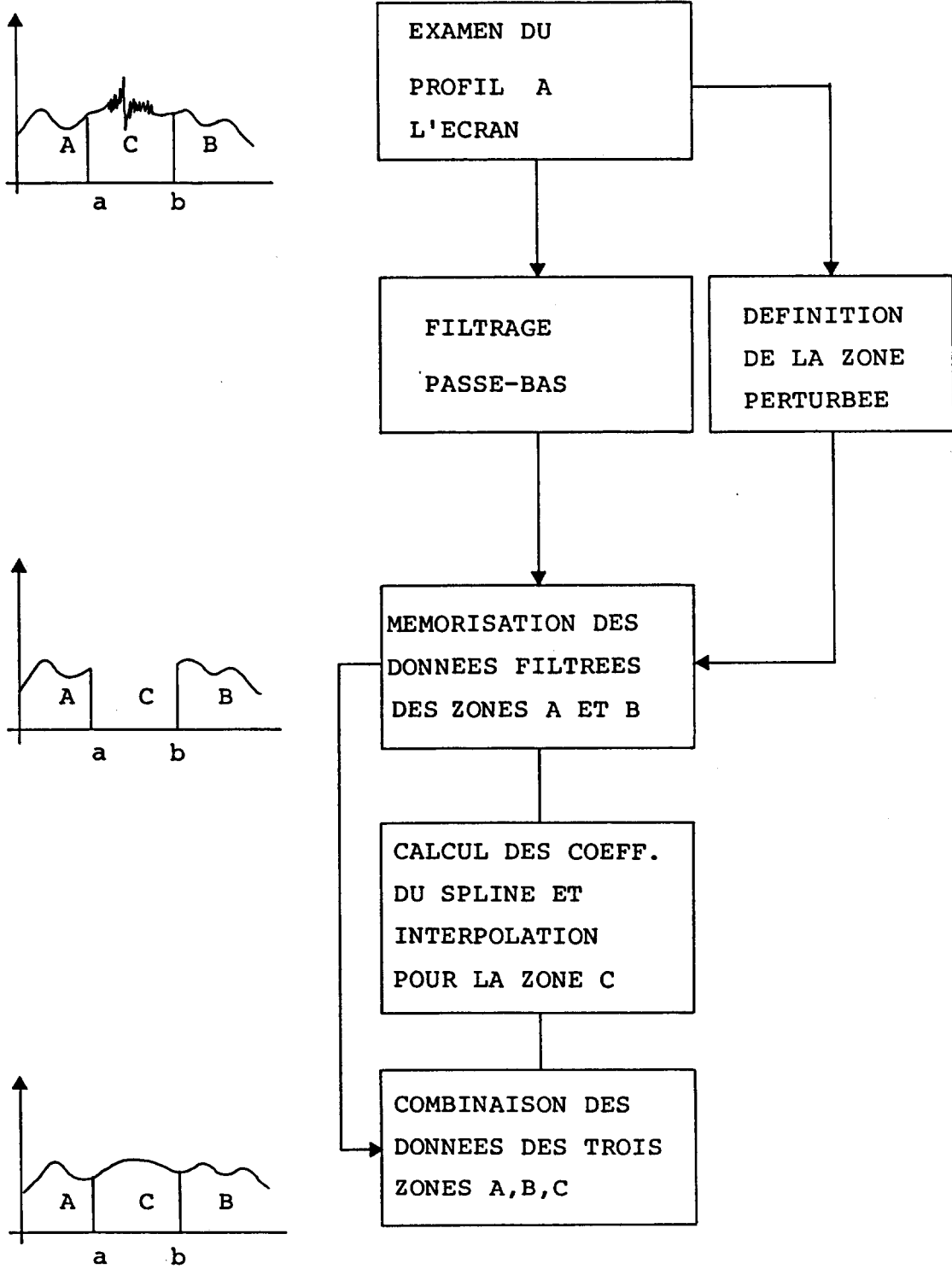


fig. 9

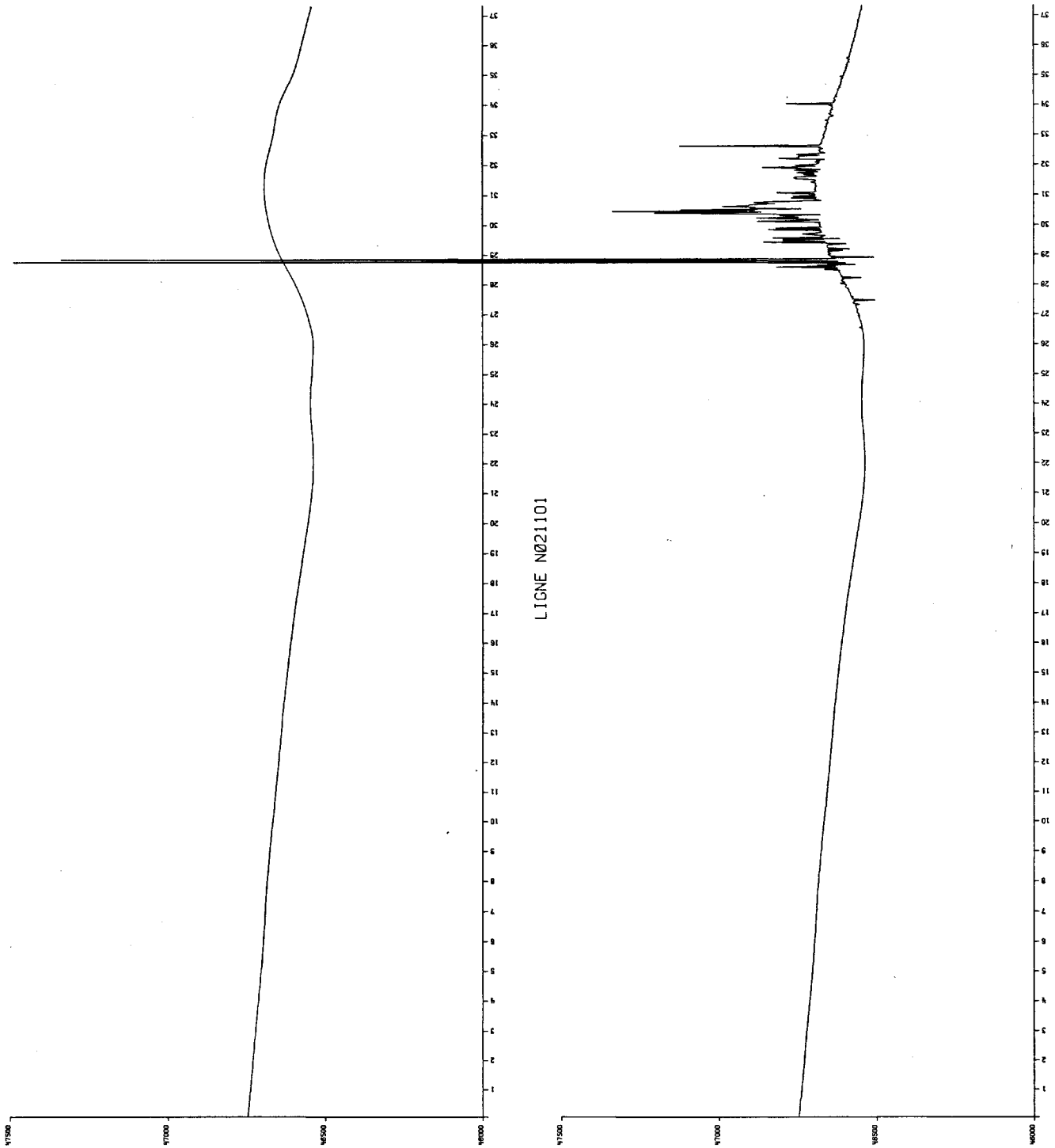


fig. 10

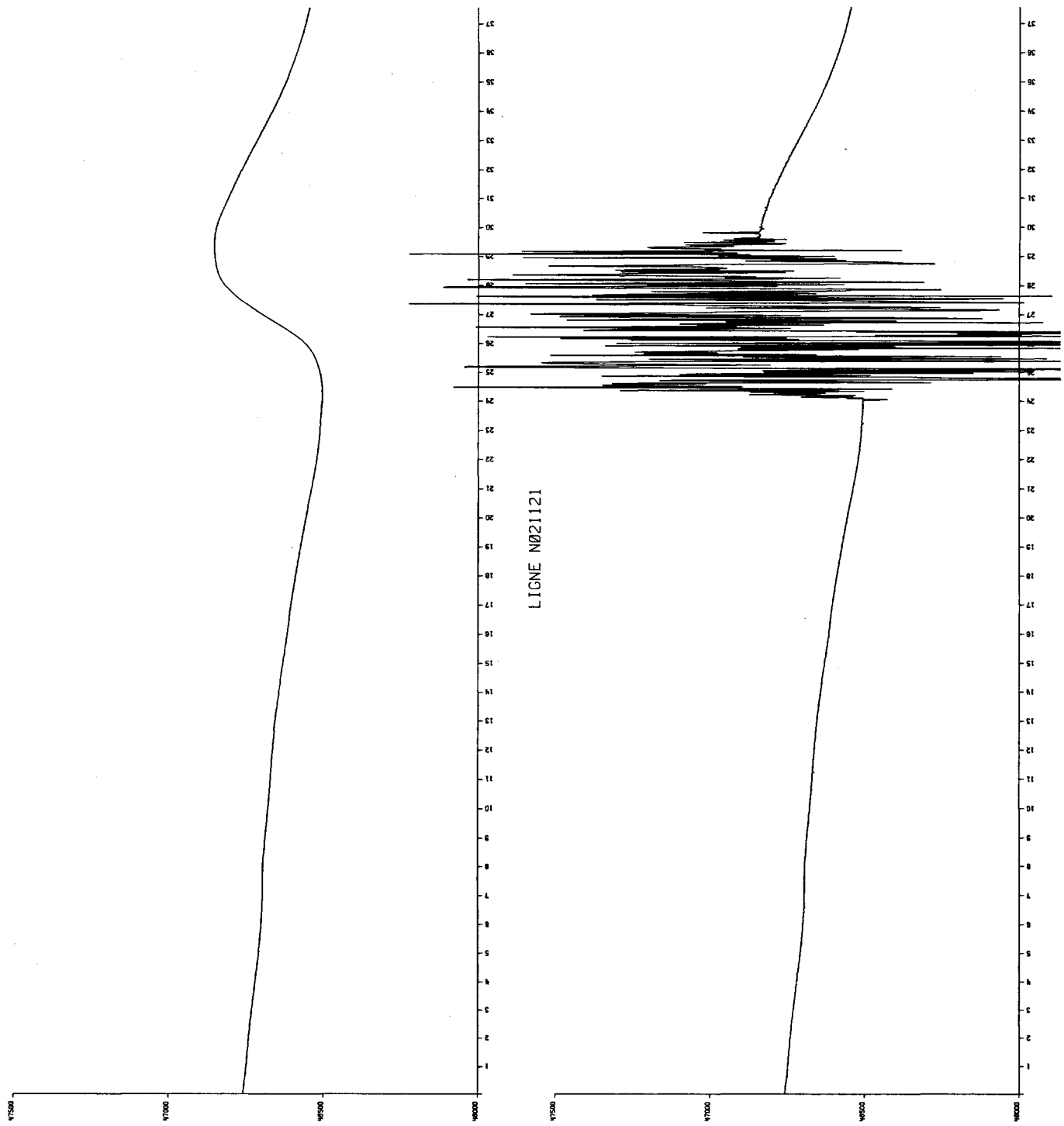


fig. 11

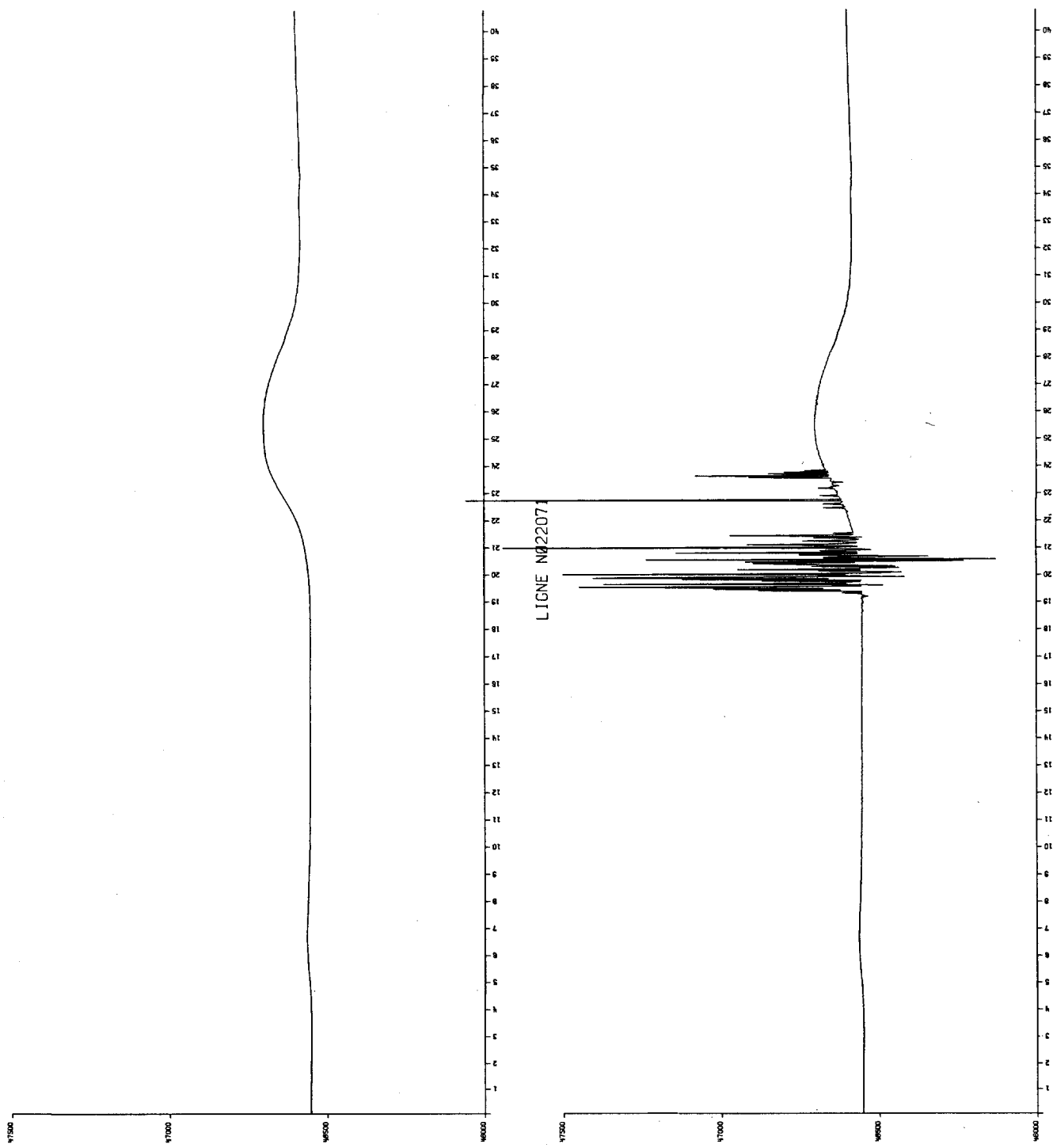


fig. 12

6.9 Contrôle de la fiabilité du système

6.9.1 Généralités

Le souci principal que peut connaître l'utilisateur d'un système de traitement de données, tel que celui décrit dans les paragraphes précédents, est sa fiabilité, c'est-à-dire, sa capacité à restituer les anomalies mesurées, non seulement en amplitude, mais aussi en phase. Toute zone de test prise dans la nature ne permet pas de donner une réponse objective à ce problème; car d'une part, la valeur vraie du champ d'épreuve n'est pas connue et, d'autre part, les défauts de fiabilité des appareils, facteurs biaisant les résultats, ne peuvent être totalement éliminés.

Afin de posséder une idée de la fiabilité du système STRADAG, nous avons procédé à une simulation des levés aéromagnétiques. Un logiciel spécial (SYNTSU) a été écrit dans ce but. Ce logiciel permet de générer une série de fonctions mathématiques pouvant être combinées linéairement et fournissant un ou des champs d'épreuve aussi compliqués et difficiles à restituer que possible. De plus, en faisant appel aux fonctions aléatoires, il a été possible de simuler le tangage et le roulis de l'avion (pitch and roll), les erreurs de positionnement par imprécision du spotting et les orages magnétiques.

Il est aussi possible d'introduire des variations diurnes et séculaires du champ, ainsi qu'un "bruit blanc" sur celles-ci. Il suffit, à l'utilisateur du programme, de déclarer le nombre de lignes à voler, la vitesse de l'avion, les limites du levé et le nombre de jours de vol, et le programme délivre une "bande magnétique de terrain", conforme aux paramètres précédents.

Evidemment, l'utilisateur doit préalablement choisir parmi les fonctions disponibles, celles qu'il entend utiliser et fournir au programme, les paramètres associés nécessaires.

6.9.2 Description du test

Paramètres de l'étude de test

Zone de 24 x 37 km, soit environ 880 km²

Espacement des lignes de mesure 1 km

Espacement des lignes de contrôle 5 km

Altitude de vol constante 150 m au dessus du plan

6.9.3 Paramètres du champ d'épreuve

Combinaison linéaire de fonction du type

$$F_{(x,y)} = A + Bx + Cy \sum_i D_i \left(\frac{\sin f R_i}{f \cdot R_i} \right)^2 + \sum_j E_j \cdot \exp - \left[\left(\frac{x - x_0}{H_x} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{H_y} \right)^2 \right] + \varepsilon(t)$$

avec

$$R = \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right]^{1/2}$$

$$f = \frac{2\pi}{R_0}$$

avec R_0 abscisse du premier zéro

$\varepsilon(t)$ = bruit aléatoire d'amplitude maximum ± 5 nT

a) Fonction du type: $\frac{\sin x}{x}$

$x_0(m)$	$Y_0(m)$	$D(m)$	$R_0(m)$
550 000	243 000	600	3000
560 000	247 000	1000	2000
566 000	246 000	600	3000
567 000	238 000	600	5000
579 000	237 000	- 300	2000

b) Fonction exponentielle:

$x_0(m)$	$Y_0(m)$	$E(m)$	$H_x(m)$	$H_y(m)$
575 000	240 000	1000	2000	20 000
578 000	233 000	1000	8000	2000
558 000	252 000	500	1000	1000
584 000	248 000	- 400	2000	2000
555 000	238 000	- 1000	1000	30 000

c) Polynôme algébrique

$$A_0 = 0$$

$$\text{Pendage} = 3^\circ$$

$$\text{Direction du pendage} = 45^\circ \text{ par rapport à l'axe } x.$$

6.9.4 Les perturbations

Variations diurnes du champ magnétique de forme sinusoidale, de période journalière avec superposition d'une dérive linéaire mensuelle et un bruit aléatoire (blanc) d'amplitude maximum + 2.5 nT.

Angle de roulis maximum	:	$\pm 30^\circ$
Angle de tangage maximum	:	$\pm 20^\circ$
Erreur manuelle de pointage	:	± 20 m

En résumé, les perturbations peuvent être écrites en fonction du temps de la manière suivante:

$$P(t) = -D + A_0 \sin kt - R_{n_1}(t) + \Delta P(x,y)$$

$$\Delta P(x,y) = F(x,y) - F(x + \Delta x, y + \Delta y)$$

avec:

$$\Delta x = Z \operatorname{tg} [(R_{n_2}(t) - 0.5) \alpha_0] + [R_{n_3}(t) - 0.5] \cdot PT_0$$

$$\Delta y = Z \operatorname{tg} [(R_{n_4}(t) - 0.5) \beta_0] + [R_{n_5}(t) - 0.5] \cdot PT_0$$

R_{ni} = générateurs de nombres aléatoires normalisés

α_0 = angle de tangage maximum

β_0 = angle de roulis maximum

PT_0 = erreur de pointage maximum

6.9.5 Le résultat du test

Le résultat de ce test est présenté aux figures 13 et 14. La figure 13 représente le champ d'épreuve calculé directement sur les points de grille, alors que la figure 14 donne ce même champ restitué par le système après le levé synthétique décrit aux paragraphes 6.9.3 et 6.9.4.

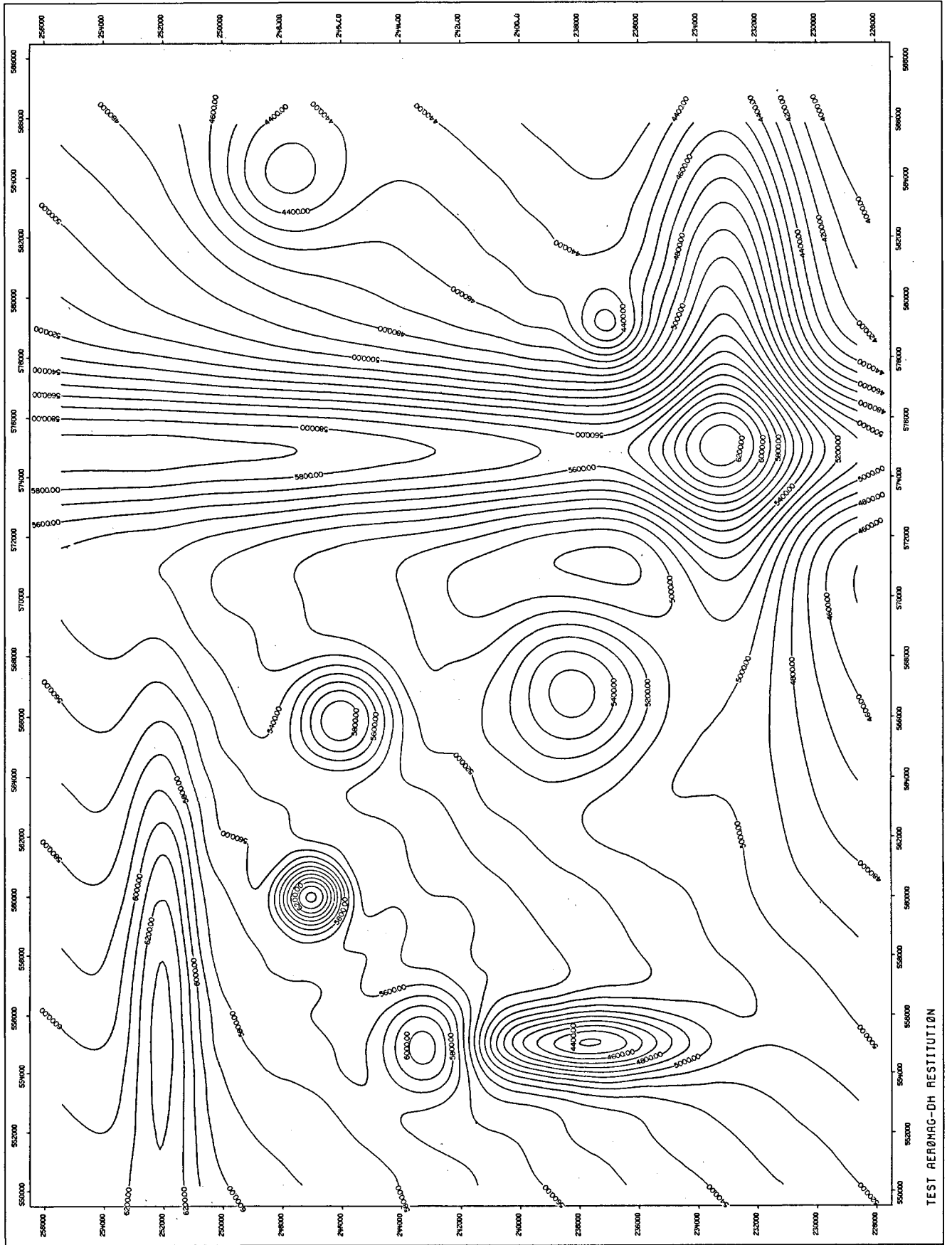
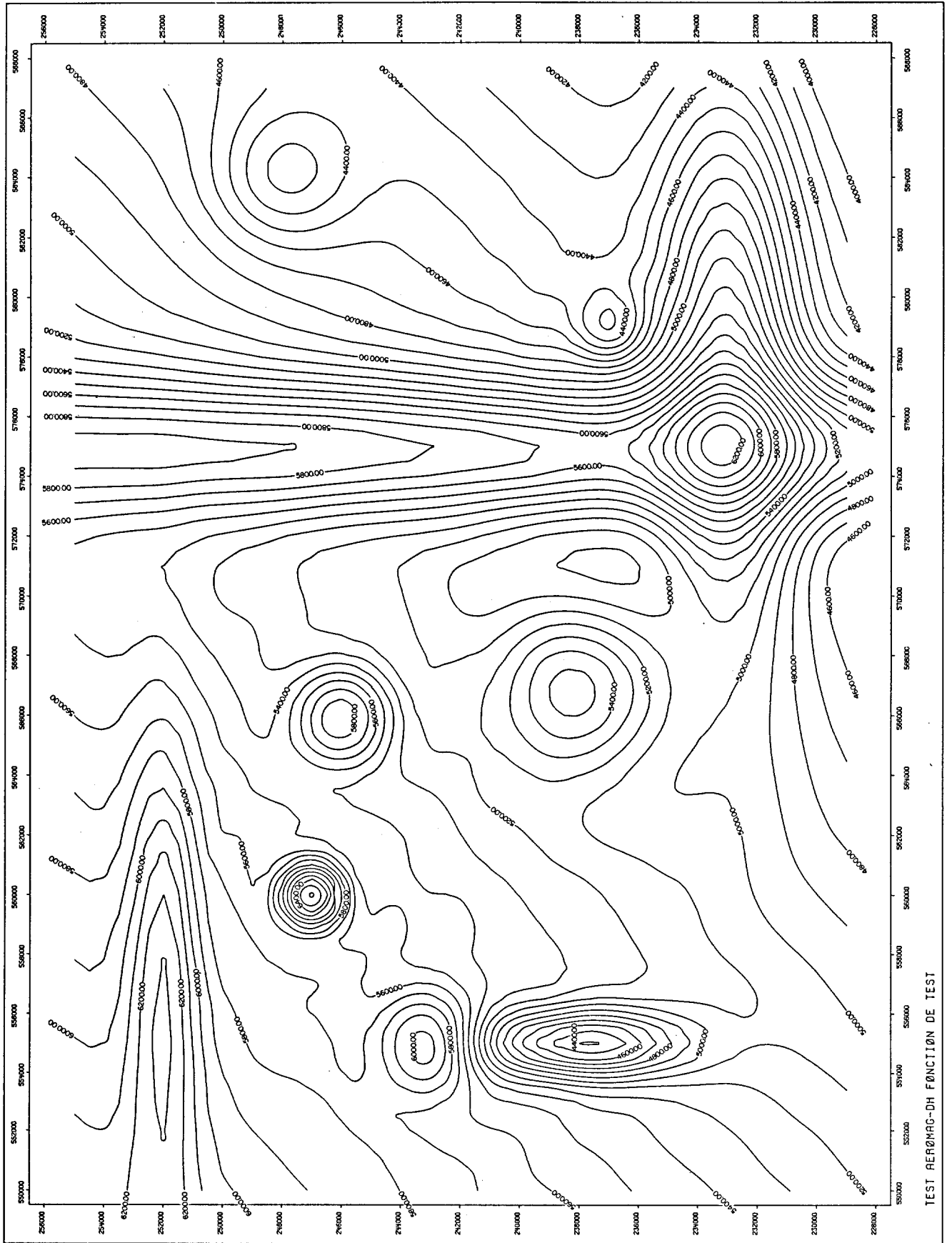


fig. 13



TEST AEROMAG-DH FONCTION DE TEST

fig. 14

VII LES RESULTATS DU LEVE

7.1 Généralités

Les résultats du levé aéromagnétique de la Suisse ont été publiés sous forme de deux cartes du champ total à l'échelle 1/500 000^e. Ces cartes, imprimées par les soins de l'Office Fédéral de Topographie, font partie de la série des cartes géophysiques de la Suisse. Elles comportent un fond géologique modifié, issu de la carte tectonique de la Suisse à l'échelle 1/500 000^e (Spicher, 1972) (annexes 1 et 2).

En raison des gradients horizontaux très violents des anomalies de Poschiavo et de la Dent Blanche, il n'a pas été possible de dessiner la carte de l'altitude 5000 m avec équidistance des courses inférieures à 25 nT.

Cependant pour donner plus d'information, des courbes intercalaires de 12.5 nT ont été dessinées là où le gradient horizontal le nécessitait. Cette carte montre les valeurs du champ réduites à l'année 1981.5, correspondant à la dernière année de mesures pour l'altitude 5000 m. Par contre, il a été possible de tracer une équidistance de 10 nT sur la carte volée à 6000', la réduction de cette dernière carte se rapportant à l'année 1980.5.

7.2 Les déviations des lignes de vol

Le bon passage de l'avion sur les positions des lignes idéales est le meilleur critère de la qualité d'un levé aérien. Ce passage au plus près, ainsi que la rectitude des lignes, permettent de minimiser les risques d'anomalies artificielles. En effet, un système de traitement des données, aussi parfait soit-il, ne peut restituer des valeurs d'une qualité supérieure à celles qu'il a reçues.

Les figures 15 et 16 montrent les lignes de vol réelles des deux levés. Les courts traits transversaux correspondent aux photographies utilisées pour le positionnement. Sur ces deux cartes toutes les lignes volées apparaissent; il est ainsi aisé de repérer les lignes qui ont dû être revolées du fait de leur qualité jugée insuffisante.

Une analyse détaillée n'étant pas possible, en raison de l'échelle réduite de ces deux cartes, une statistique des déviations est donnée sous forme d'histogrammes à la figure 17.

7.3 Les différences aux croisements

Comme il l'a été souligné au paragraphe 6.5, les différences aux croisements entre lignes de mesure et lignes de contrôle sont d'une importance primordiale. C'est pourquoi les résultats représentant les différences avant l'égalisation finale sont donnés sous deux formes. Une forme statistique (histogrammes) à la figure 18 et une répartition spatiale sous forme de cartes, aux figures 19 et 20.

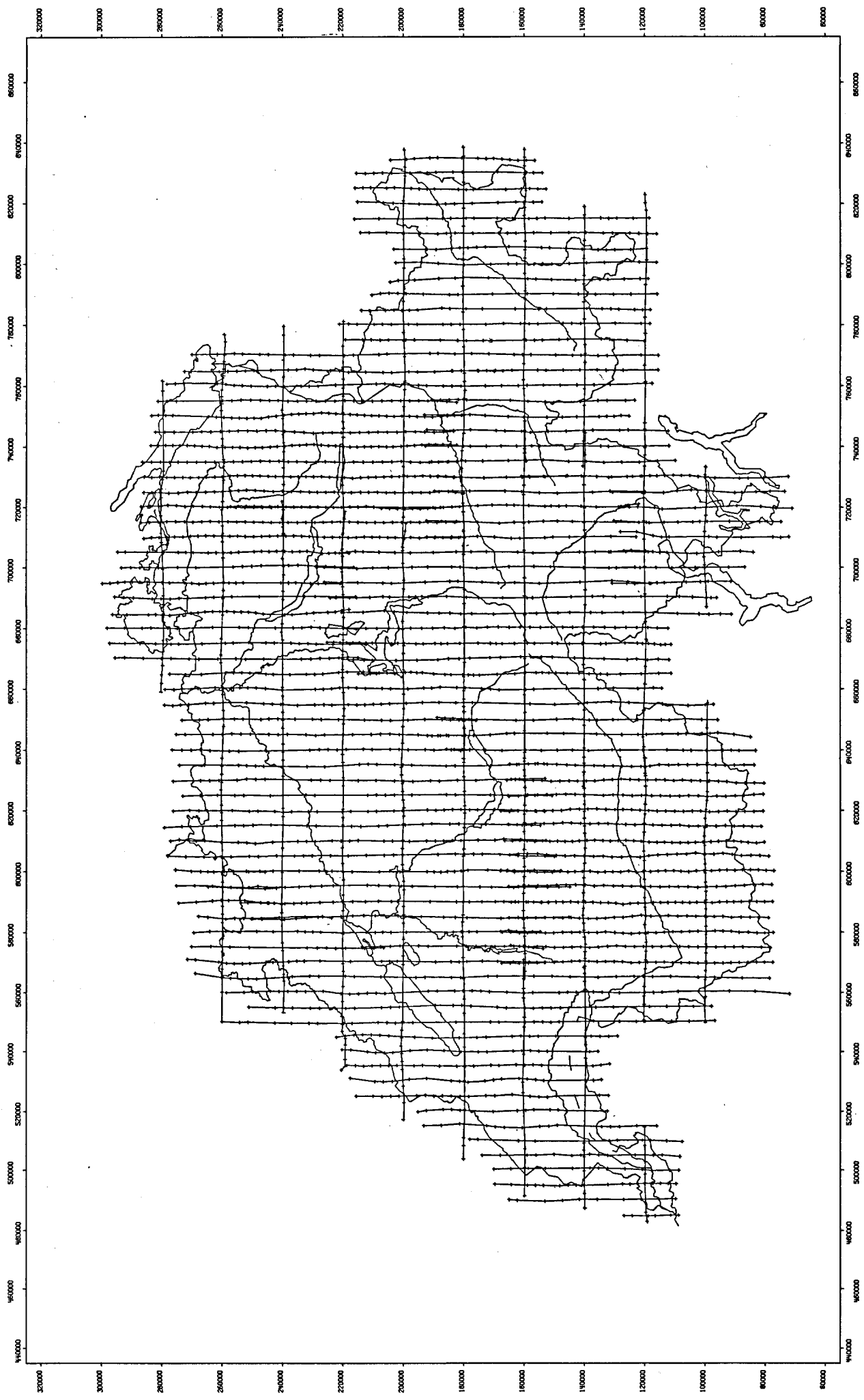


fig. 15

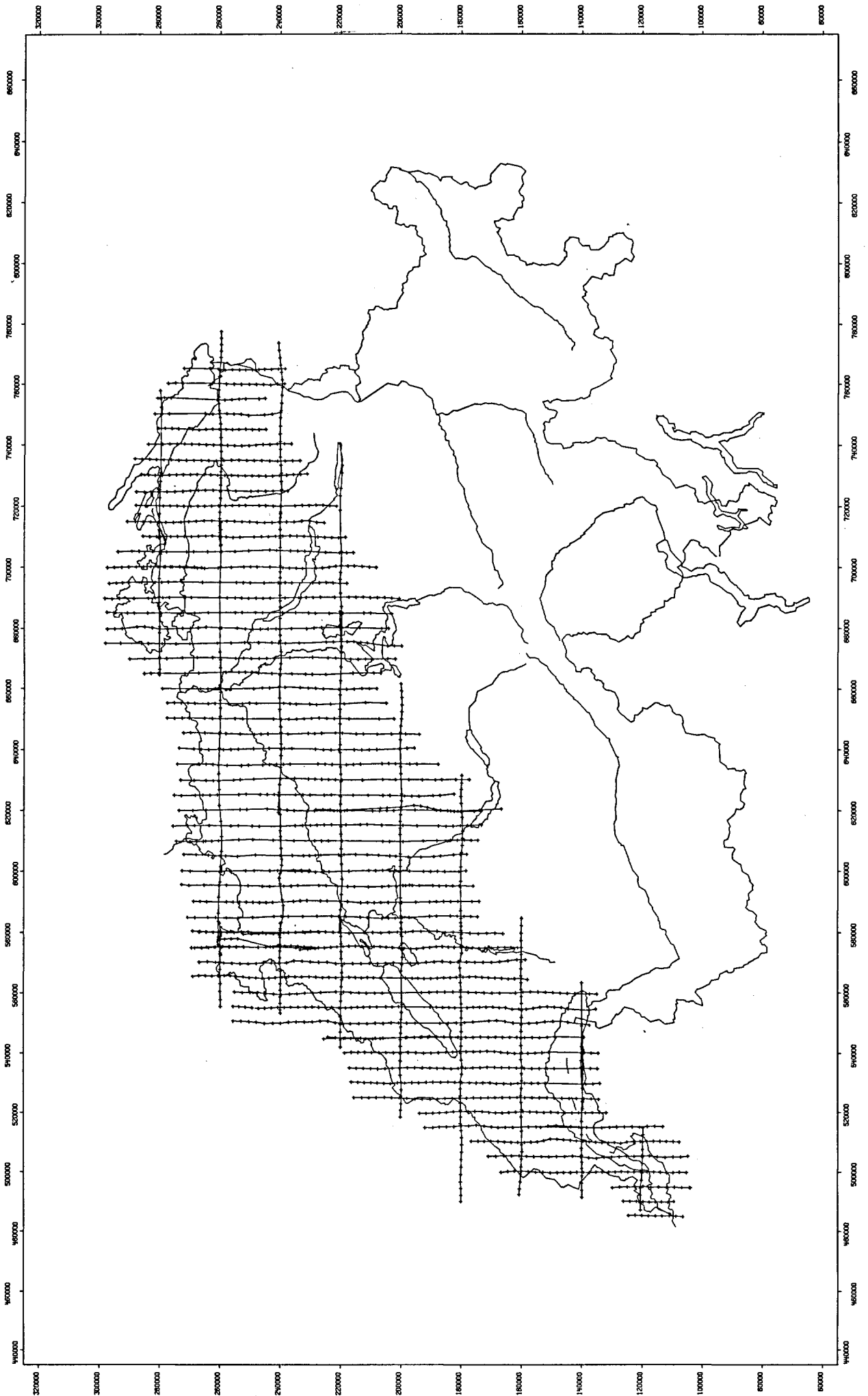


fig. 16

HISTOGRAMMES DES DEVIATIONS AUTOUR DE LA LIGNE IDEALE DE VOL

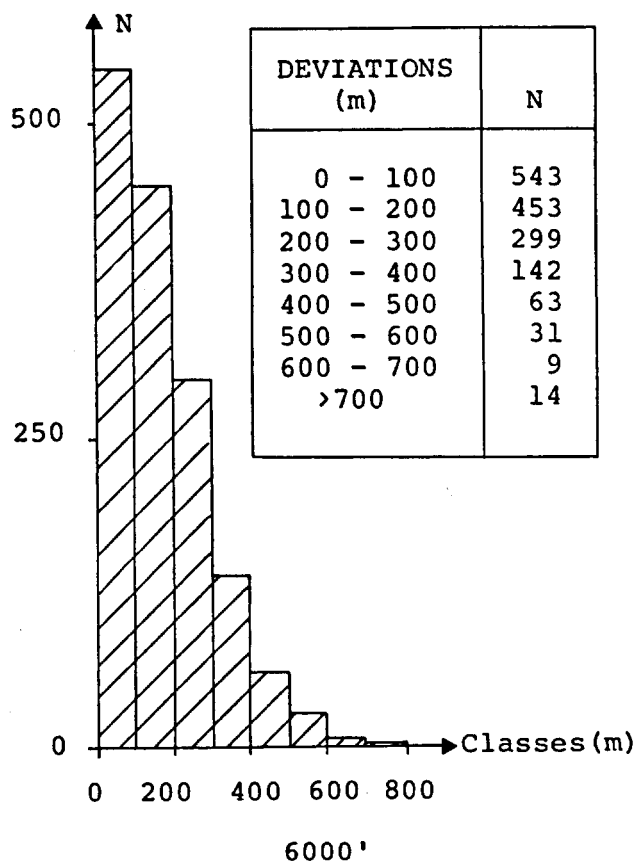
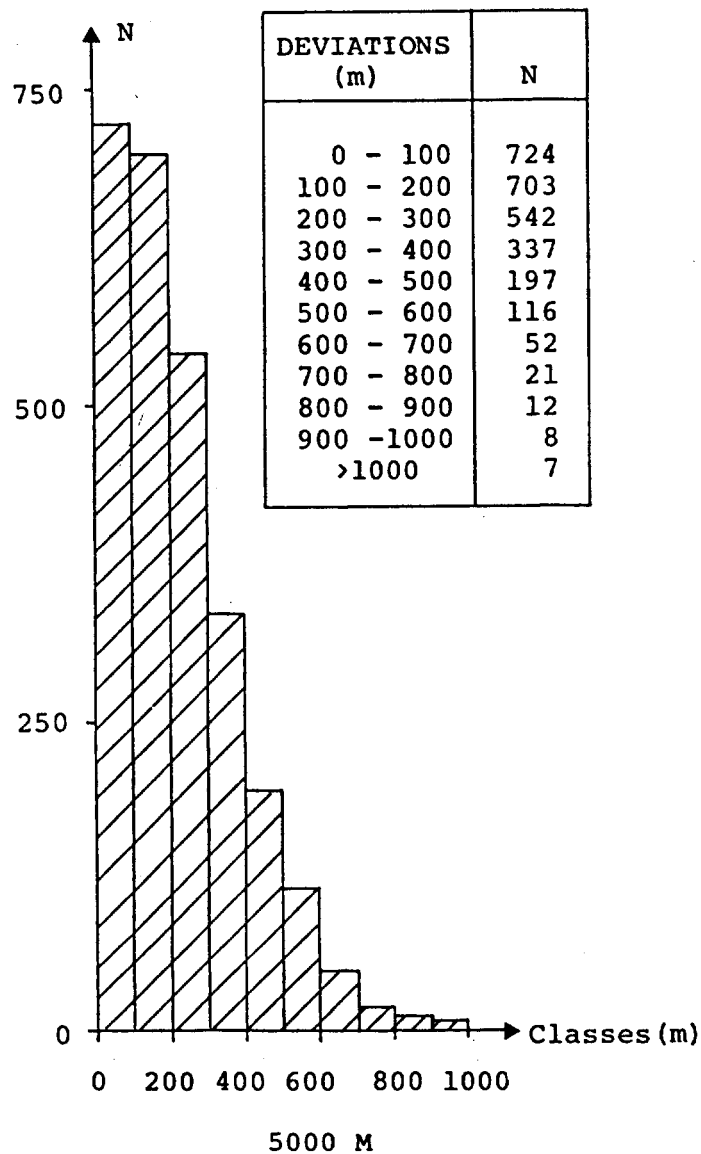
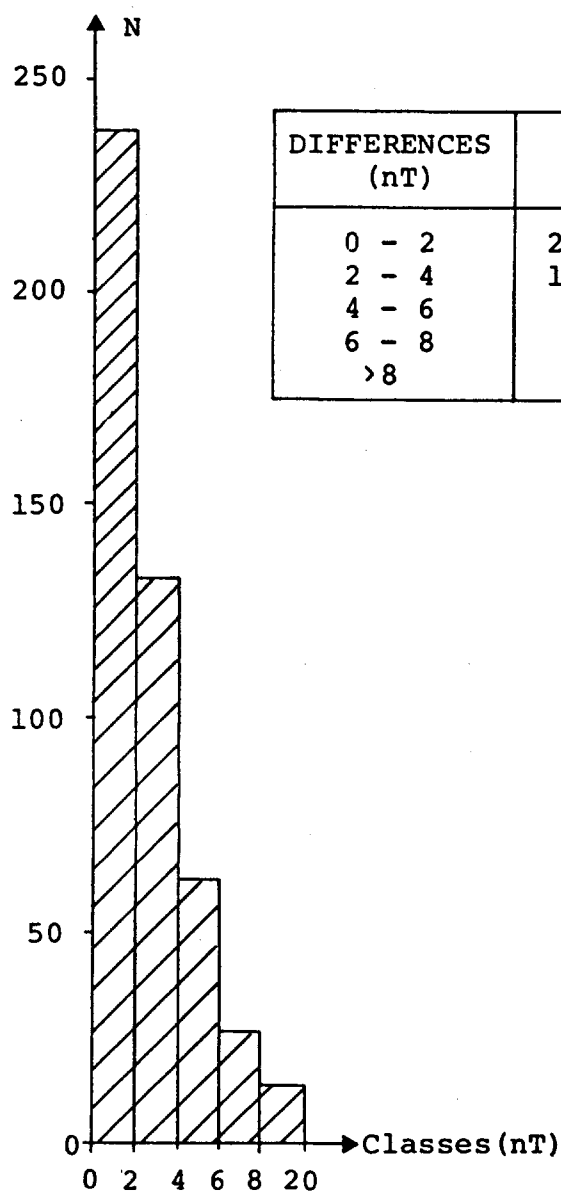
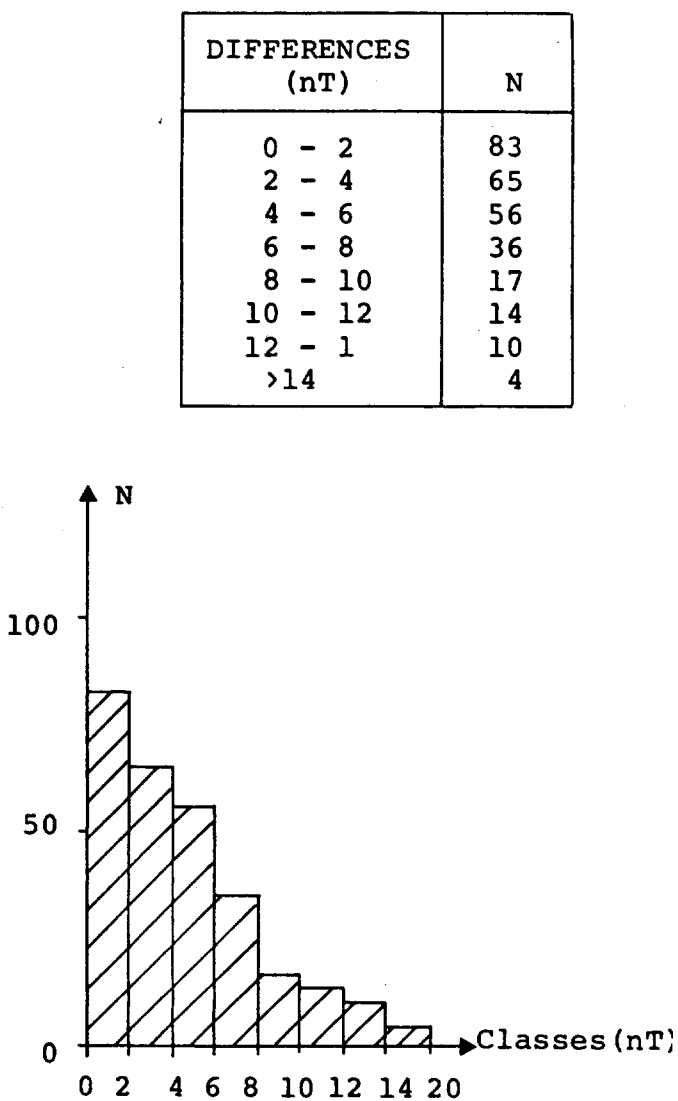


fig. 17

HISTOGRAMMES DES DIFFERENCES AUX CROISEMENTS



5000 M



6000'

fig. 18

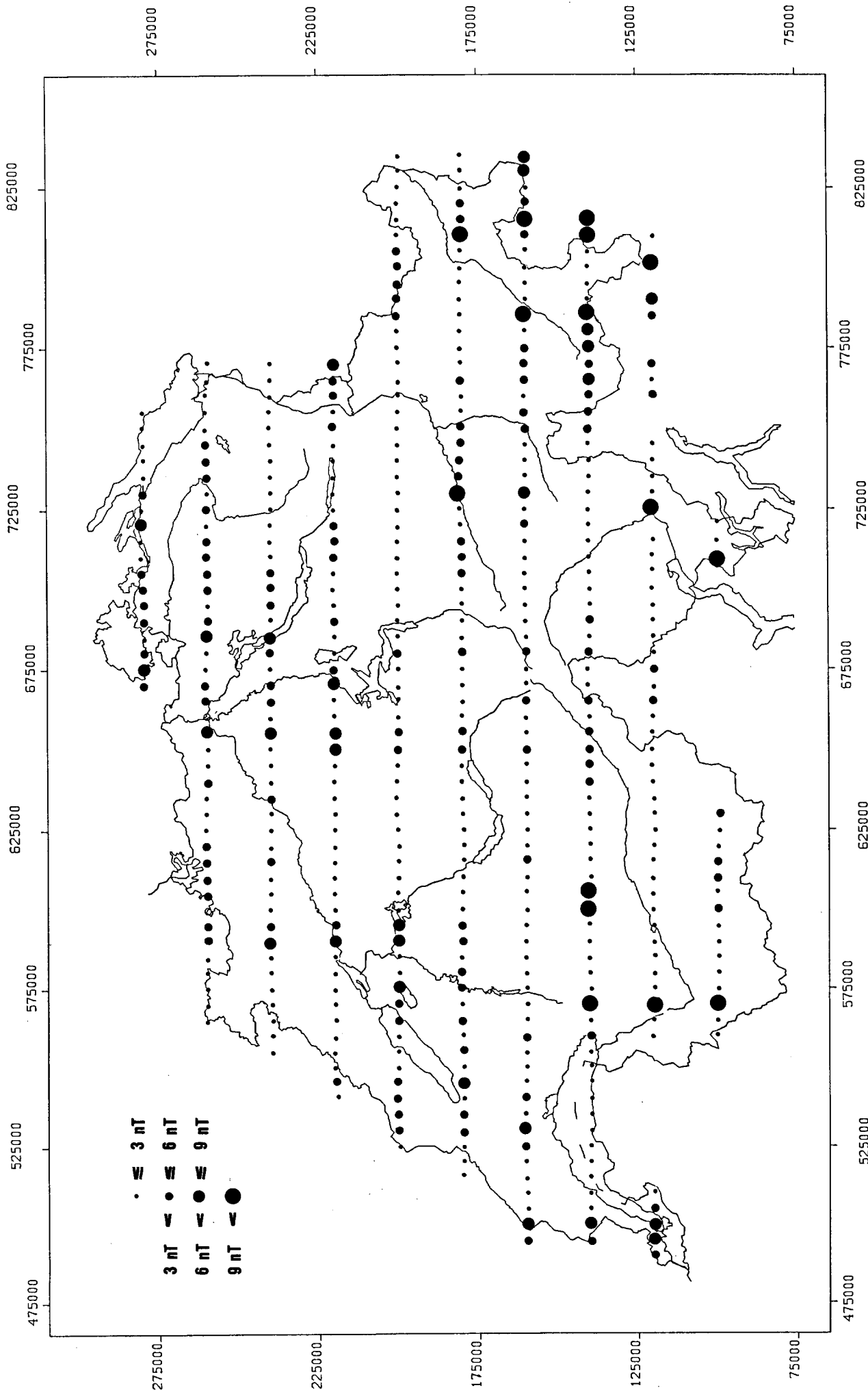


fig. 19

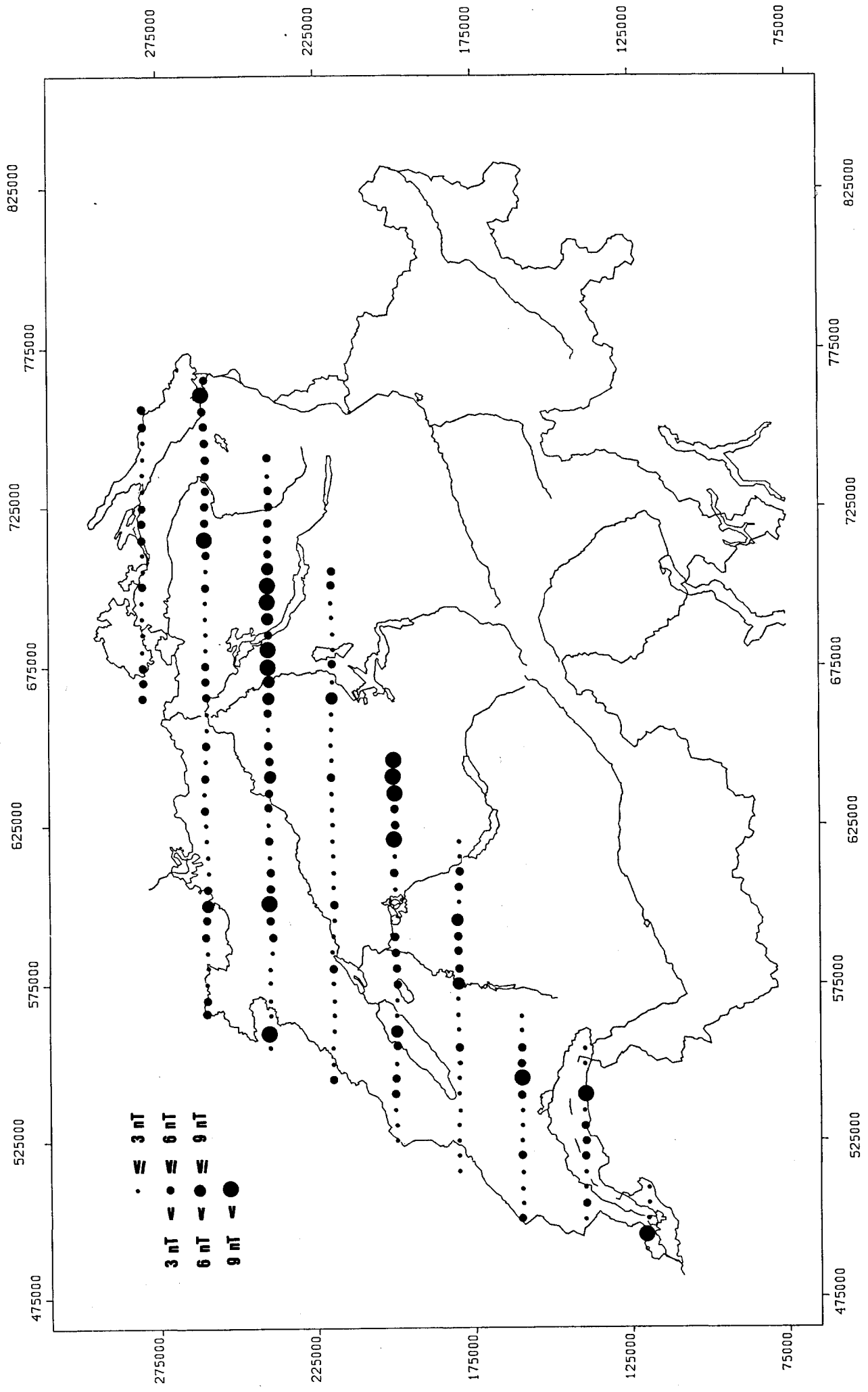


fig. 20

VIII LA PRECISION DES RESULTATS

La précision des résultats dépend très fortement et en premier lieu de la qualité des corrections des variations diurnes, puis, dans une moindre mesure, de la précision du positionnement, en particulier dans le sens du plus fort gradient.

Du fait que les variations diurnes du champ magnétique sont approximées sur les enregistrements analogiques par des segments de droites, il se peut que certaines variations, de l'ordre de quelques nT, s'étalant sur une période de 2 à 3 minutes, ne puissent être totalement corrigées. D'autre part, il est évident que ces corrections ne peuvent être d'une précision supérieure à celle de leur enregistrement, c'est-à-dire, supérieure à la sensibilité maximale de la station de base; dans notre cas, ± 1 nT.

Pour le positionnement, et du fait de l'emploi d'une caméra de haute précision comportant un système d'horizontalisation automatique, on peut admettre que l'erreur sur la position ne provient que de la difficulté du pointage sur les cartes au 1/25 000^e. Par conséquent, l'on peut affirmer que cette erreur est toujours inférieure à 50 m.

Ce défaut dans la connaissance de la position réelle introduit une erreur, non pas dans la mesure elle-même, qui n'en est pas affectée, mais sur le résultat de ces mesures qui est la carte.

L'imprécision introduite dans ce cas dépend du gradient horizontal local du champ magnétique. Celui-ci étant variable, il a été admis pour cette discussion trois cas:

a) Cas où il n'y a pas d'anomalie apparente:

Le gradient horizontal est de l'ordre de 5 nT/km; l'erreur est de ± 0.25 nT.

b) Cas où les anomalies sont faibles:

Le gradient horizontal est de l'ordre de 20 nT/km; l'erreur est de ± 1 nT.

c) Cas où les anomalies sont fortes à très fortes:

Le gradient horizontal est de l'ordre de 100 nT/km; l'erreur est de ± 5 nT.

En ce qui concerne l'imprécision introduite sur l'altitude, disons d'emblée que celle-ci est très faible, car le gradient vertical l'est aussi, environ 23 nT/km, et que l'altitude de l'avion peut être déterminée à ± 30 m.

La table 5 résume les sources d'erreurs et leurs contributions.

Source des erreurs		Amplitude
Variation diurne	(E_D)	$\pm 1.$ nT
Position verticale	(E_V)	± 0.7 nT
Position horizontale	(E_H)	
Pas d'anomalie		± 0.25 nT
Anomalies faibles		$\pm 1.$ nT
Anomalies fortes		$\pm 5.$ nT

Table 5

Les erreurs quadratiques moyennes pour les trois cas envisagés sont

$$EQM = (E_D^2 + E_V^2 + E_H^2)^{1/2}$$

$$EQM_1 = 1.25 \text{ nT}$$

$$EQM_2 = 1.58 \text{ nT}$$

$$EQM_3 = 5.15 \text{ nT}$$

La répartition spatiale de ces valeurs peut être aisément trouvée en regardant la carte du champ total et en localisant les anomalies.

IX ANALYSE QUALITATIVE DES RESULTATS

9.1 Les cartes du champ total

Une inspection rapide du levé à 5000 m laisse apparaître une variation lente et dégressive du champ magnétique, allant de 46950 nT dans la région de Schaffhausen, à 43000 nT, dans la région d'Orsières (VS). Cette variation se retrouve dans la carte 6000', où elle a la même forme, les valeurs absolues étant naturellement différentes.

Le gradient horizontal moyen observable du champ est grosso-modo le même pour les deux cartes et se situe autour de 3.0 nT/km.

Sur ce champ-plan se superposent des pics, dont l'amplitude maximum peut aller jusqu'à +850 nT, dans la région de Poschiavo, par exemple.

Ces principaux pics, que nous appellerons anomalies, tout en gardant la définition de ce terme pour un chapitre suivant, sont au nombre de 7 sur la carte 5000 m, et de 3 sur la carte 6000'. L'anomalie la plus à l'ouest se trouve dans la région du Marchairuz (510 000/150 000). Son amplitude est d'environ 20 nT et n'est pas visible sur la carte 5000 m.

Une seconde anomalie, bien visible sur les deux cartes, est celle dite du Jorat (540000/150 000), dont l'amplitude va de 170 nT (5000 m) à 270 nT (6000'). Cette anomalie fut levée en détail pour la première fois par Mercanton et Wanner (1943, 1945, 1946), puis interprétée successivement par Mercanton et Wanner (1948), Meyer et al. (1973) et finalement par Fischer et al. (1980).

La troisième et dernière anomalie, visible sur la carte 6000', se situe dans la région du Chasseral (570 000/220 000). Son amplitude maximale se situe autour de 80 nT (carte 6000'). Remarquons que cette anomalie figure déjà sur la carte du champ total de G. Fischer et al. (1979).

Les trois anomalies précédemment décrites se trouvent dans la région de couverture sédimentaire de la Suisse, et de ce fait, doivent être interprétées en termes de corps profonds (quelques kilomètres).

Les deux groupes anomaliques suivants sont situés dans la région de la Dent Blanche (610 000/105 000). Leurs amplitudes sont comprises entre 110 nT et 300 nT. Un examen de la base géologique de la carte permet de corréliser sans risque ces anomalies avec des péridotites serpentinisées, associées généralement aux ophiolites "posées sur" les nappes penniques.

La même corrélation peut être aisément faite avec les anomalies dites de Poschiavo (790 000/130 000), où les amplitudes peuvent atteindre 900 nT et plus.

Autour de ces deux anomalies majeures, on remarque de petites anomalies, elles aussi bien corrélées avec des masses ophiolitiques près de Chiavenna, par exemple, dans la région des Piz Platta et Piz d'Err enfin.

Le fait le plus intéressant de cette région est qu'il existe une "linéation magnétique" partant du Piz d'Err, passant par le Piz Kesch et pouvant être suivie assez aisément jusqu'au Piz Tasna (815 000/190 000). Si l'on admet qu'une corrélation existe entre la présence d'ophiolites et les anomalies magnétiques de cette région (comme semblent le montrer les masses affleurantes), alors de telles roches doivent se trouver, à coup sûr, enfouies le long de cette ligne. Remarquons de plus que cette linéation suit assez bien la faille de l'Engadine.

La dernière anomalie, mais non la moindre pour son importance géologique, est celle de Locarno (695 000/110 000). Elle fut levée en détail, en composantes verticales et horizontales dans sa partie suisse, durant les années 1944 et 1945 par Weber, Gassmann, Niggli et Röthlisberger (voir Weber et al., 1949) qui, les premiers, la mirent en relation avec le corps d'Ivrée.

Une analyse qualitative plus poussée des cartes du champ total n'est pas possible, du fait de la présence du gradient NNE - SSW qui masque les anomalies de faibles amplitudes. Afin de pouvoir, d'une part, continuer notre analyse qualitative, puis passer, dans un stade ultérieur, à une analyse quantitative, il est nécessaire de faire disparaître la contribution biaisant les anomalies. Pour ceci, il faut introduire la notion de champ régional et d'anomalie, ce sujet faisant l'objet du paragraphe suivant.

9.2 Le champ régional et la notion d'anomalie

En règle générale, les variations locales du champ magnétique terrestre, engendrées par des contrastes de susceptibilité locaux, sont plus ou moins masquées par les variations du champ à grande échelle. Ces variations, à faibles rayons de courbure, sont appelées anomalies, car différant d'un modèle régional analytique.

Le modèle régional peut être compris comme un modèle du champ magnétique terrestre faisant abstraction de toutes les variations latérales de susceptibilité à petite échelle.

Il est bien évident que la notion de champ régional et d'anomalie est une notion relative. Telle anomalie pourra toujours être considérée comme constituée d'un champ régional et de sous-anomalies à partir du moment où l'on s'intéressera à une analyse plus fine et plus locale des résultats.

Dans le cas des levés de la Suisse où la surface à analyser est suffisamment grande, le meilleur modèle du champ régional est le modèle IGRF 1975 (International Geomagnetic Reference Field), permettant une modélisation spatiale et temporelle.

Nous ne donnerons pas de détails sur la manière de calculer ce champ, mais il faut seulement se rappeler qu'il peut être calculé pour n'importe quelle latitude, longitude et altitude pour un temps donné, au moyen d'un développement en série d'harmoniques sphériques (voir Peddie, 1982, par exemple).

Pour le calcul des valeurs de ce champ sur le territoire de la Suisse, nous avons procédé selon les six étapes suivantes:

- a) Calcul du champ international sur une cinquantaine de points, sur chaque carte, choisis en dehors des zones à fortes variations latérales.
- b) Comparaison des valeurs calculées avec les valeurs expérimentales.
- c) Corrections des champs calculés par addition d'une constante destinée à minimiser les résidus.
- d) Calcul par moindres carrés des coefficients d'un polynôme algébrique du premier degré, approximant au mieux le champ de référence corrigé.
- e) Calcul du champ régional polynomial sur les points de grille de la carte à l'aide des coefficients calculés sous (d).
- f) Soustraction du champ régional obtenu aux valeurs expérimentales et dessin de la carte.

Cette procédure peut paraître à première vue compliquée, mais en réalité elle est beaucoup plus économique que le calcul direct du champ de référence, car elle remplace le calcul d'un développement en série harmonique sphérique de degré 13 par un calcul d'un polynôme algébrique à 3 coefficients.

Si l'on tient compte du fait que la grille à calculer comporte environ 230 lignes et 350 colonnes, la justification de ce procédé apparaît immédiatement.

La comparaison entre le champ international et des valeurs expérimentales prises sur des profils orientés Nord-Sud a montré les différences suivantes:

Coordonnées (longitude)	ΔT [nT] 5000 m	ΔT [nT] 6000 '
500'000	210.	245.
550'000	210.	235.
600'000	220.	250.
650'000	200.	250.
700'000	205.	235.
750'000	185.	235.
Valeurs moyennes	210.	240.

Table 6Années de références

levé à 5000 m: 1981.5

levé à 6000 ' : 1980.5

Les différences du tableau précédent, obtenues graphiquement, montrent que l'hypothèse formulée au point (c) (décalage constant entre le champ régional vrai et le champ international) était fondée.

Les coefficients du polynôme algébrique du premier degré, obtenus par moindres carrés et adoptés pour le calcul du champ régional, sont les suivants:

Altitude	A_0 [nT]	A_1 [nT/m]	A_2 [nT/m]
5000 m	45810.124	$5.2022857 \cdot 10^{-4}$	$2.684333 \cdot 10^{-3}$
6000 '	45878.857	$5.1622857 \cdot 10^{-4}$	$2.679000 \cdot 10^{-3}$

Table 7

avec pour expression du champ

$$F_{(x,y)} = A_0 + A_1x + A_2y$$

Les résidus maximum obtenus entre les valeurs de ce polynôme et le champ international corrigé sont:

(voir IGRF pour comparaison)

Pour 5000 m: -3.9 nT (500'000/100'000)

Pour 6000 ': +3.7 nT (500'000/100'000)

9.3 Les cartes résiduelles

9.3.1 Introduction

En raison des très fortes anomalies des Grisons, du Valais et du Jorat et afin de rendre la lecture des cartes plus aisée, celles-ci ont été divisées en deux et trois zones, séparées par une ligne brisée continue, et où l'équidistance des courbes diffèrent.

Pour la carte à 6000', la zone située à l'est de la longitude 620000 a été dessinée avec une équidistance de 5 nT et courbes intercalaires de 2.5 nT; la zone à l'ouest de la même coordonnée a été divisée en deux à la latitude 192000: La zone au nord comporte des courbes à 10 nT d'intervalle et 5 nT intercalaires, alors que la partie sud comporte des courbes à 25 nT d'équidistance et des courbes intercalaires de 12.5 nT (fig. 21). De plus, l'anomalie du Marchairuz a été tracée séparément, afin de clarifier la représentation graphique des résultats (fig. 22).

Pour la carte à 5000 m, l'équidistance est de 5 nT et courbes intercalaires à 2.5 nT pour la zone au nord de la ligne de démarcation et 25 nT (12.5 nT) pour la zone au sud (fig. 23).

Dans le texte, la référence sera simplement donnée par C_I (carte à 6000') et C_{II} (carte à 5000 m) pour les cartes magnétiques et par A_4 et A_5 (Atlas de la Suisse, feuilles 4 et 5) pour les références géologiques et tectoniques.

9.3.2 La carte C_I

Sur cette carte, les anomalies décrites au chapitre 9.1 apparaissent avec leurs valeurs absolues et leurs formes exactes: En plus de ces anomalies, bien visibles sur les cartes du champ total, en apparaissent d'autres, insoupçonnables auparavant. Elles ont des amplitudes relativement faibles, entre 10 nT et 20 nT, et leurs tailles varient de 5 km à 20 km. Une superposition des cartes C_I et A₅ ne montre aucune corrélation, alors que pour C_I et A₄ certaines correspondances sont visibles presque immédiatement. Ces correspondances sont au nombre de trois: Au nord de la carte, dans la région de Rheinfelden, le très fort gradient horizontal peut être associé à la présence toute proche des roches de la Forêt Noire.

Dans la zone du Napf, l'anomalie semble coïncider presque à la perfection avec la limite des poudingues polygéniques. Cette même similitude se retrouve dans la région dite du Hörnli (Oberland zurichois), où les courbes isanomales, là aussi, "enveloppent" la masse des poudingues.

9.3.3 La carte C_{II}

La comparaison entre les cartes C_{II} et A₄ montre encore plus clairement les corrélations décrites au paragraphe 9.1, à savoir la coïncidence entre les zones des schistes lustrés à ophiolites et les plus fortes anomalies.

Sur cette carte (C_{II}) apparaissent les anomalies "alpines", jusqu'alors inconnues, comme par exemple, celle centrée sur Airolo, celle du Val Antigorio, celle à l'est de Disentis, etc.

Afin d'affiner notre analyse qualitative, comparons maintenant C_{II} à A₅ (Anomalies avec Géologie).

Là encore, les corrélations apparaissent presque sans ambiguïtés entre certaines anomalies et la présence de schistes lustrés à ophiolites ou de serpentines:

Anomalies de Chiavenna, de la Bernina, de la Dent Blanche, de l'Allalinhorn, d'Airolo, etc.

Certaines particularités de la carte méritent une mention spéciale en raison des problèmes qu'elles posent:

Que penser de l'appendice anomalique entourant Schwyz, Einsiedeln, Zug et Goldau, et plus particulièrement du gradient de son flanc est?

Pourquoi la masse permienne de Spitzmeilen semble-t-elle "repousser" les anomalies à un point tel que cette zone a le gradient horizontal le plus faible de toute la Suisse? A quoi attribuer les trois anomalies de -40 nT, -30 nT et -60 nT, posées sur une ligne allant du Piz Cristallina au Helsenhorn (région de Binn)?

Pourquoi les courbes anomaliques suivent-elles si bien le front de la nappe du Grand Saint-Bernard, depuis le col du même nom jusqu'à Viège?

Que signifie la coïncidence (sur les deux cartes) entre anomalie et poudingues du Hörnli?

Autant de questions auxquelles une simple analyse qualitative ne peut répondre, mais qui doivent en tout cas exciter notre curiosité!

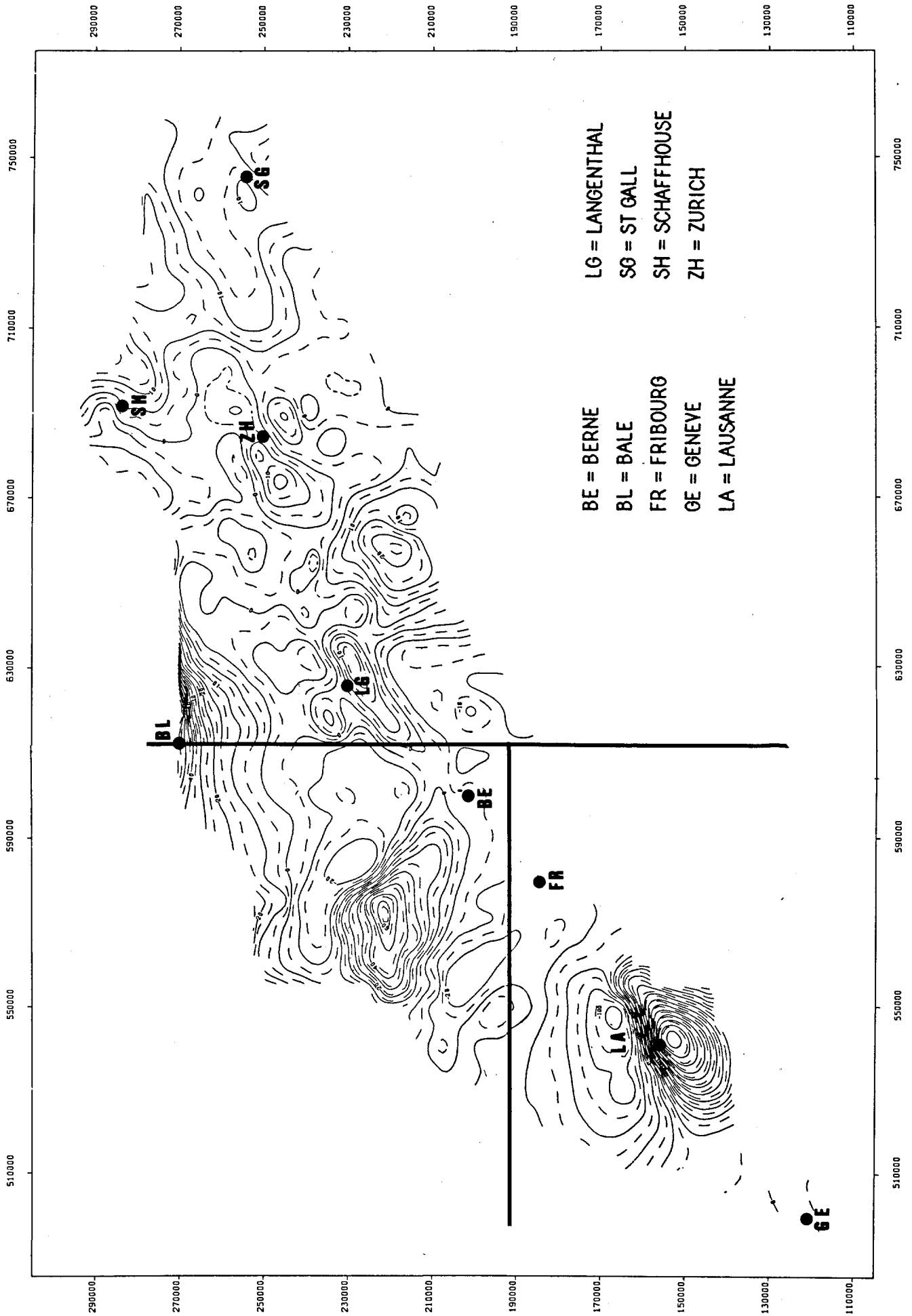


fig. 21

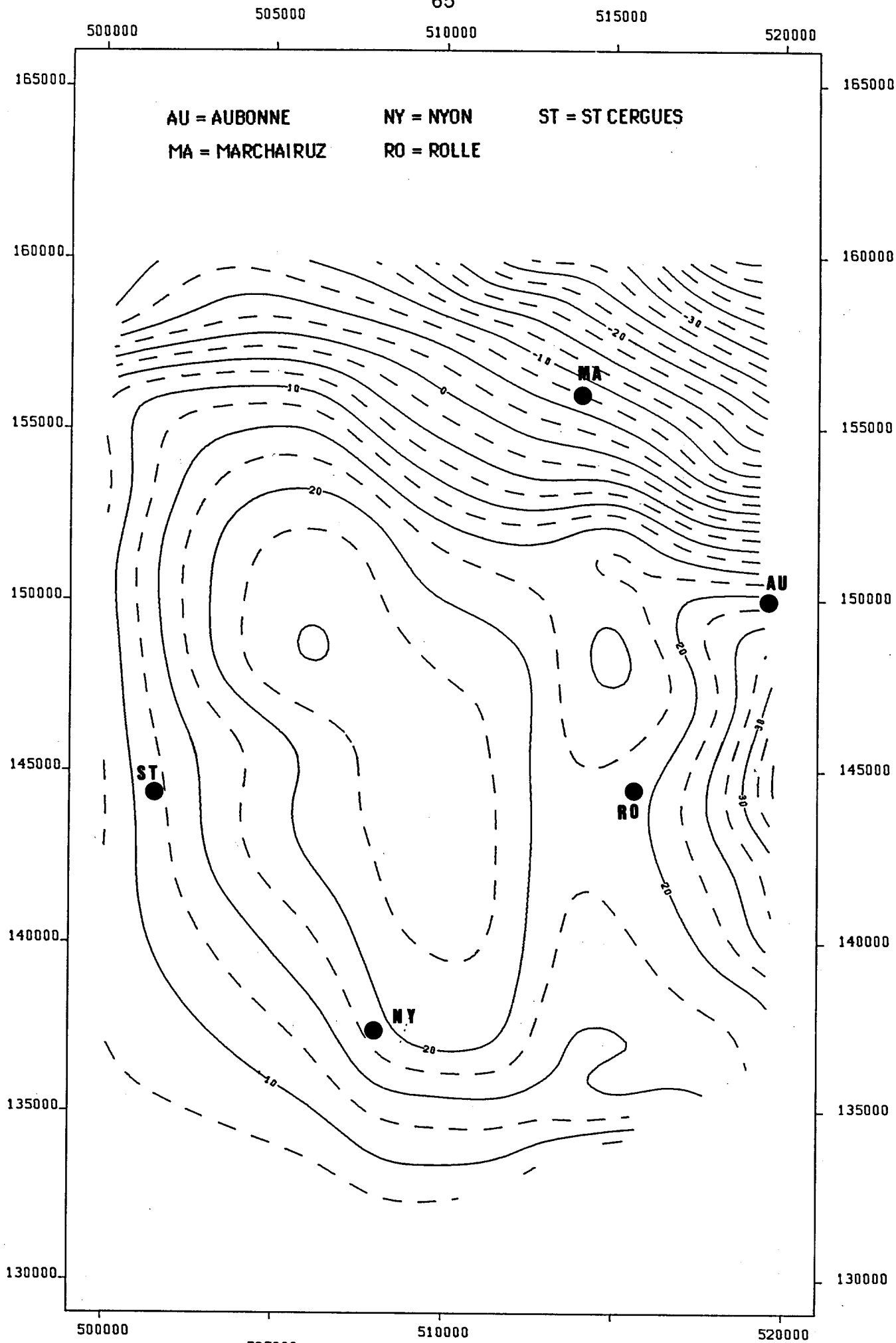


fig. 22

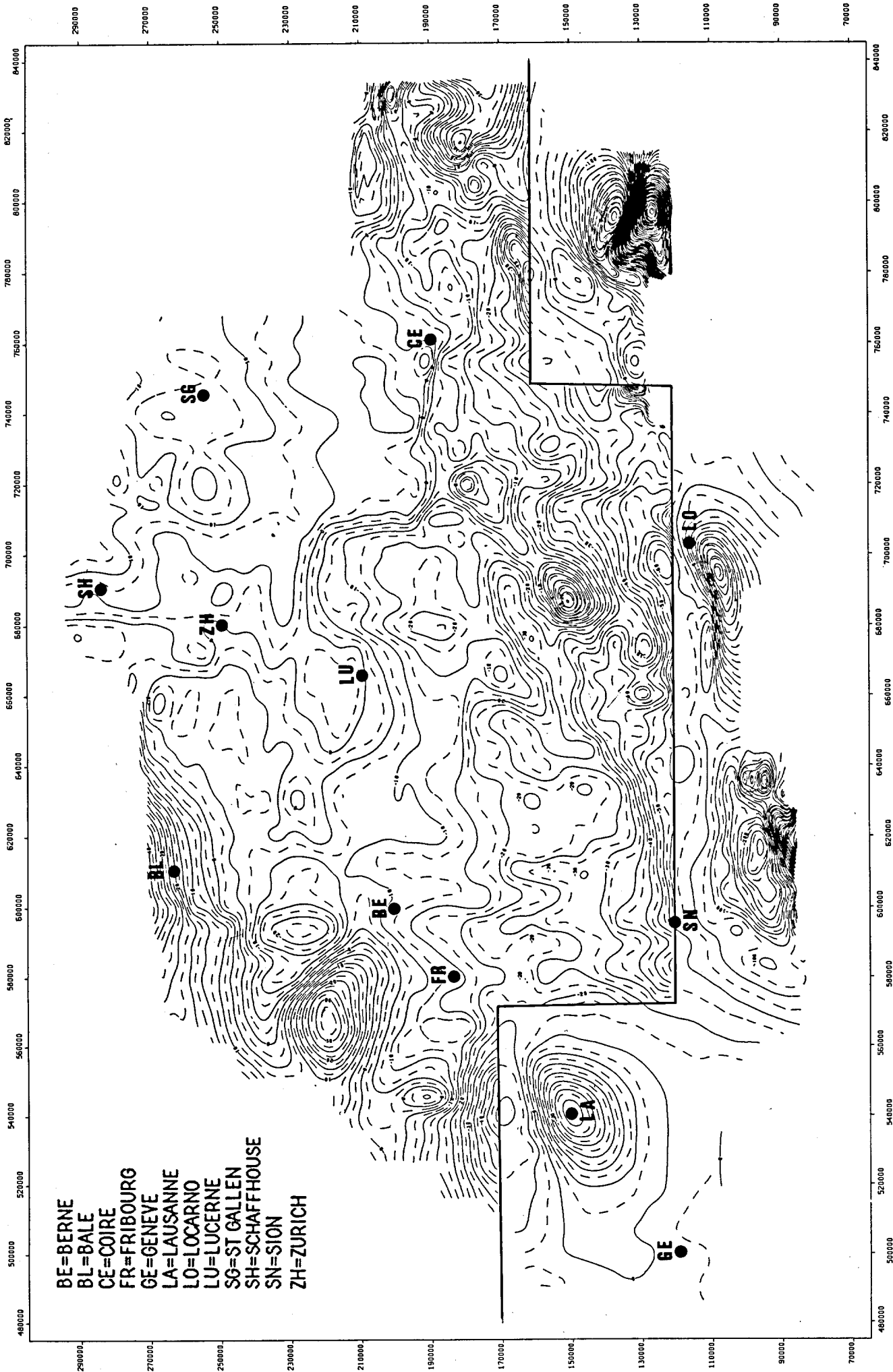


fig. 23

X BIBLIOGRAPHIE

- Baranov, W., 1975: Potential Fields and their Transformations in Applied Geophysics. Gebrüder Borntraeger - Berlin-Stuttgart, 121 p.
- Bhattacharyya, B.K., 1971: An automatic method of compilation and mapping of high-resolution aeromagnetic data. *Geophysics* 36, 4, (695-716).
- Bitterli, P., 1972: Erdölgeologische Forschungen im Jura. Bull. Ver. Schweiz. Petrol-Geol- und -Ing., 39, (13-28).
- Brückmann, W., 1930: Erdmagnetische Vermessung der Schweiz I. Allgemeines - Deklination. Ann. der Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt, Jahrgang 1930, Nr. 7, 24 S. und 1 Karte.
- Brückmann, W., 1931: Erdmagnetische Vermessung der Schweiz II. Horizontalintensität, Inklination. Ann. der Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt, Jahrgang 1931, Nr. 6, 10 S. und 3 Karten.
- Brückmann, W., 1933: Karte der magnetischen Deklination in der Schweiz für Mitte 1935, bei Beziehung auf Kartennord im rechtwinkligen Koordinatensystem. Ann. der Schweiz. Meteorol. Zentralanst., Jahrgang 1933, Nr. 6, 2S. und 1 Karte.
- Cline, A.K., 1974: Scalar and planar curve fitting using spline under tension. *Comm. of ACM*, 17, 4, (218-223).
- Fischer, G., P.-A. Schnegg, J. Sesiano, 1979: A new geomagnetic survey of Switzerland. *Géol. Suisse-Série Géophysique*, no. 19, Kümmerly + Frey, Berne, 43 pages and 10 maps.
- Fischer, G., B.C. Le Quang, 1980: A model of the Jorat magnetic anomaly based on the three field components. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 73, 2.
- Henderson, R.G., I. Zietz, 1949: The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields. *Geophysics* 14, 4, (517-534).

- Klingelé, E., 1974: Sur un programme de traçage automatique des isolignes. Rapport annuel à la Commission Suisse de Géophysique (non publié).
- Mercanton, P.-L., E. Wanner, 1943: Die magnetische Anomalie im Jorat (Kanton Waadt), (1. Teil: Die Verteilung der Vertikalintensität). Ann. der Schweiz. Meteorol. Zentralanst., Jahrgang 1943, Addendum.
- Mercanton, P.-L., E. Wanner, 1945: L'Anomalie Magnétique du Jorat (Vaud). I. La composante verticale. Bull. Soc. Vaudoise des Sc. Nat., Vol. 63, no. 264, pp. 1-14.
- Mercanton, P.-L., E. Wanner, 1946: Die magnetische Anomalie im Jorat (Kanton Waadt), (2. Teil, Horizontalintensität und Deklination). Ann. der Schweiz. Meteorol. Zentralanst., Jahrgang 1946, Nr. 6.
- Mercanton, P.-L., E. Wanner, 1948: L'Anomalie Magnétique du Jorat (Vaud). II. Composante Horizontale. Déclinaison. Champ Perturbateur. Esquisse d'une Interprétation. Bull. Soc. Vaudoise des Sc. Nat., Vol. 63, no. 270, pp. 15-24.
- Meyer de Stadelhofen, C., W. Sigrist, A. Donzé, 1973: L'Anomalie Magnétique du Jorat. Bull. des Laboratoires de Géol., Minéral., Géophys. et du Musée géol., Université de Lausanne, no 202, 8 pages.
- Mufti, I.R., 1972: Design of small operators for the continuation of potential field data. Geophysics, 37, 3, (488-506).
- Peddie, N.W.,-1982: International geomagnetic reference field: the third generation. J. Geomag. Geoelectr., 34, (309-326).
- Reid, A.B., 1980: Aeromagnetic survey design. Geophysics, 45, 5, (973-976).
- Schwab, R.F., 1960: Einige Ergebnisse einer aeromagnetischen Studie im Gebiet des Waadtländerjuras. Bull. Ver. Schweizer Petrol.-Geol. und -Ing., 26, (31-32).
- Spicher, A., 1972: Carte tectonique de la Suisse: Commission Géologique Suisse. Service Fédéral de Topographie, Wabern-Berne.

- Telford, W.M., L.P. Geldart, R.E. Sheriff, D.A. Keys, 1976: Applied Geophysics. Cambridge University Press; Cambridge, London, New York, Melbourne; 80 pages.
- Weber, E.K., F. Gassmann, E. Niggli, H. Röthlisberger, 1949: Die magnetische Anomalie westlich von Locarno, Schweiz. Min. Petr. Mitt., 29, 2, (492-510).
- Yarger, Ch., 1978: Diurnal drift removal from aeromagnetic data using least squares. Geophysics, 43, 6, (1148-1156).
- Zuerflueh, E.G., 1968: High speed processing of aeromagnetic survey data (abstract), E.O.S. Trans. AGU, 49, (671).





