

Le nouveau levé géomagnétique de la Suisse

Autor(en): **Fischer, G. / Schnegg, P.-A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK =
Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **75 (1977)**

Heft 8

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-228770>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Le nouveau levé géomagnétique de la Suisse*

G. Fischer et P.-A. Schnegg

Zusammenfassung

Zurzeit ist in der Schweiz eine neue Landesaufnahme der erdmagnetischen Elemente im Gange. Eine brauchbare Deklinationkarte kann aber jetzt schon publiziert werden. Die Totalintensität wird mit einem Protonenmagnetometer gemessen. Deklination und Inklination werden mit einem Magnetometer neuer Konzeption ermittelt. Das Arbeitsprinzip des neuen Instrumentes besteht darin, dass eine «Fluxgate»-Sonde im Erdfeld gedreht wird. Die Orientierung der Drehachse wird verstellt, bis alle Wechsel-signale verschwinden. Dies trifft ein, sobald die Drehachse parallel zum Erdfeld steht. Ein Klinometer liefert die Inklination, während die Deklination mit einem Kreiselscheidolit bestimmt wird.

Mit Hilfe eines kalibrierten Bussolentheodolits und der neuen Deklinationkarte ist es möglich, absolute Azimute mit einer Genauigkeit von etwa ± 2 Altminuten zu bestimmen, auch wenn keine Bezugspunkte anvisiert werden können. Um die bestmögliche Genauigkeit zu erreichen, müssen aber die zeitlichen Variationen herauskompensiert werden. Die Korrektionswerte dazu liefert die beschriebene automatische Referenzstation des Observatoire Cantonal in Neuchâtel, welche diejenige von Regensberg ersetzt.

Im Laufe des Jahres 1978 beabsichtigt die Eidgenössische Landestopographie, definitivere Karten der Elemente D, I und F (Deklination, Inklination und Totalintensität) im Massstab 1 : 500 000 in den Handel zu bringen.

I. Introduction

Il y a quelques temps nous avons présenté au lecteur un article sur le champ magnétique terrestre, ou champ géomagnétique [1]. Nous y avons abordé les problèmes relatifs à son origine, à ses fluctuations temporelles, à ses variations d'un endroit à l'autre et aux liens qui l'unissent à l'histoire de la Terre. Ces liens ont laissé leurs marques dans les sédiments et les laves qui se sont déposées au cours des âges et ils fournissent ainsi aux géologues et géophysiciens d'aujourd'hui un de leurs moyens d'étude les plus puissants de l'évolution de notre planète. Comme nous l'avons vu [1], les études paléomagnétiques ont livré les preuves définitives de la dérive des continents et ont même permis d'établir avec précision leur cheminement à la surface de la Terre pendant les cents derniers millions d'années.

Mais le champ géomagnétique n'a pas qu'un intérêt scientifique. Autant à l'échelle du globe qu'à l'échelle locale, il est souvent utile de connaître grandeur et direction du champ magnétique terrestre. En général on s'intéresse avant tout à la déclinaison magnétique, c'est-à-dire à l'angle D que fait la projection horizontale H du vecteur champ F avec le Nord géographique du lieu, ce que nous avons représenté schématiquement en fig. 1. Quiconque désire s'orienter avec précision en s'aidant du champ magnétique terrestre aura besoin non seulement d'une bonne boussole, mais devra connaître la valeur de la déclinaison à l'endroit où il se trouve et au

* La conception d'ensemble de ce levé, de même que celle du nouveau magnétomètre vectoriel, incombent au premier auteur. Le traitement des données et la production des nouvelles cartes géomagnétiques sont l'œuvre du second auteur.

moment de la mesure. En effet, il faut trouver un moyen de s'affranchir de la double variation par rapport au temps et au lieu. Dans les pages qui suivent nous reviendrons en détail sur ces deux problèmes.

Avant de poursuivre il est bon de se demander quelle est la précision angulaire qu'on peut raisonnablement atteindre en s'aidant du champ magnétique terrestre. Nous verrons plus loin qu'on peut, en prenant certaines précautions, atteindre une précision de l'ordre de la minute d'arc, mais qu'il est illusoire de vouloir aller au-delà. Une telle précision est bien sûr plus que suffisante pour le promeneur égaré dans le brouillard, mais elle suffit aussi à bien d'autres fins. Nous citerons comme exemples:

1. La navigation maritime en général et la navigation aérienne des petits avions de tourisme sans équipement de radio-navigation.
2. L'orientation des antennes directionnelles d'émission et de réception radio, y compris les antennes paraboliques pour ondes ultra-courtes.
3. L'orientation des cadrans solaires.
4. L'arpentage au moyen du théodolite à boussole, en particulier lors de travaux souterrains, comme la construction de tunnels et galeries de moyenne longueur et les levés topographiques de grottes.
5. L'orientation de constructions avec le théodolite à boussole.
6. L'orientation des pièces d'artillerie.
7. La détermination de l'orientation de structures géologiques ou de celle d'échantillons prélevés.
8. La construction d'oléoducs dans les déserts ou autres régions (par exemple dans les forêts et montagnes de l'Amérique du Sud) où n'existent pas de repères topographiques. Ici encore l'instrument approprié est le théodolite à boussole.

Comme le suggère cette énumération, le théodolite à boussole est peut-être l'instrument le mieux adapté à tirer parti du champ magnétique terrestre pour résoudre la plupart des problèmes d'orientation énumérés.

II. Problèmes fondamentaux des levés géomagnétiques

Un levé géomagnétique complet commence par la mesure, en un grand nombre de sites plus ou moins régulièrement répartis dans le pays, de tous les éléments qui définissent le vecteur magnétique F . La fig. 1 montre que différentes représentations équivalentes sont possibles pour F . Pour des raisons instrumentales nous choisissons de décrire F par le triplet (D, I, F) . Une fois que $F = (D, I, F)$ a été mesuré sur le grillage des sites choisis on procède au traçage de cartes géomagnétiques. Ainsi la carte des isogones (voir la fig. 6) donne le tracé des lieux géométriques sur lesquels la déclinaison D prend des valeurs bien définies $D = \text{const.}$ Pour réaliser ce programme il faut résoudre deux problèmes fondamentaux:

- a) Mettre sur pied une instrumentation transportable qui permette de mesurer D, I et F avec une précision spécifiée.

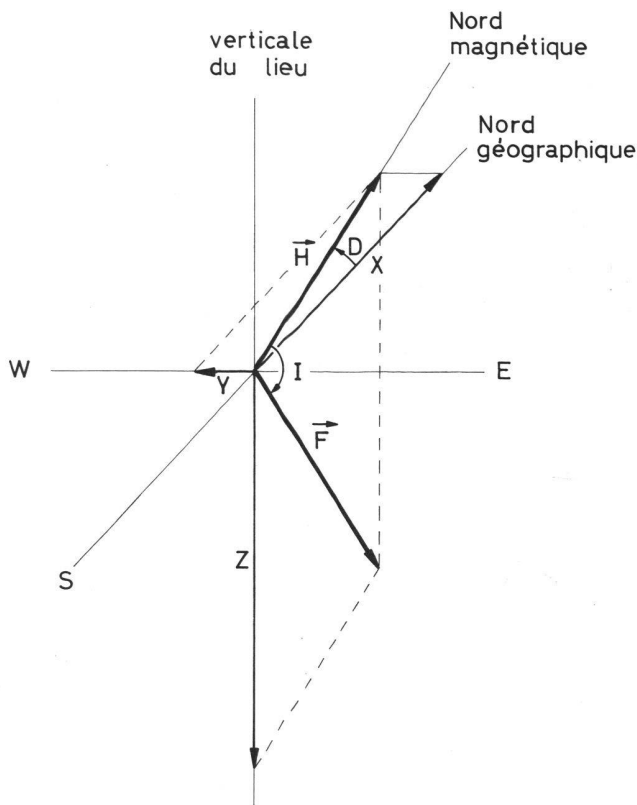


Figure 1 Plusieurs représentations du vecteur F sont en usage: (a) On donne F par ses composantes selon le Nord (X), l'Est (Y) et la verticale du lieu vers le bas (Z). (b) On peut aussi donner les composantes verticale Z, horizontale $H = |\mathbf{H}|$ et l'angle de déclinaison D. (c) Nous choisirons les éléments D, l'angle d'inclinaison I et l'amplitude $F = |\mathbf{F}|$, car ce sont ceux que nous mesurons. En Suisse présentement, comme dans notre dessin, le Nord magnétique se trouve à l'Ouest du Nord géographique. Ceci a pour conséquence que la composante Y est négative et que D est une déclinaison Ouest, à laquelle on attribue aussi quelquefois un signe négatif.

- b) S'affranchir des variations temporelles aléatoires de F . Cette question a deux aspects importants. En effet, d'une part les variations perturbent les mesures de F lors du levé, mais elles viennent aussi perturber l'utilisateur des cartes isogoniques qui cherche à s'orienter. Fort heureusement ces variations sont synchrones sur de vastes étendues, typiquement de plusieurs centaines de km, car leurs sources sont fort éloignées en altitude ou en profondeur. Pour s'affranchir des variations il suffira donc de disposer d'une bonne station de référence où F est mesuré et enregistré de façon continue.

III. Les instruments du levé suisse

L'avènement du magnétomètre à protons portatif [2] a révolutionné la mesure de l'amplitude F du champ magnétique. Cette mesure ne pose donc plus aucun problème, elle se fait à main libre dans les environs de la station.

Pour la mesure de I on peut aussi concevoir un instrument simple, et automatique. En effet, l'inclinaison I est l'angle compris entre le plan horizontal du lieu et la

direction de F . Avec une cellule à bain liquide, par exemple du mercure, on crée aisément le référentiel horizontal. Comme il existe aujourd'hui des capteurs directionnels de grande sensibilité, les fluxgates, on imagine sans peine qu'une mesure rapide et précise de l'angle I soit possible, bien que nécessitant peut-être des calibrations périodiques.

La mesure de la déclinaison est un sujet plus compliqué, car l'angle D est sous-tendu par la projection horizontale H de F et la direction du Nord vrai (voir la fig. 1). Si l'on peut encore imaginer un système simple à base de fluxgates qui cherche automatiquement dans le plan horizontal la direction de H , il n'existe pas de moyen facile et rapide pour trouver la direction du Nord géographique en un lieu quelconque. Les deux méthodes qui viennent le plus aisément à l'esprit sont la triangulation ou l'utilisation d'un gyroscope. Comme la triangulation requiert une bonne visibilité d'au moins trois mires ou repères de coordonnées bien connues, nous avons choisi la solution du gyroscope. Nous avons aussi décidé de tourner le dos aux méthodes classiques, basées sur la magnéto-statique, où l'on travaille avec de petits aimants suspendus à des fils de torsion. Ces méthodes sont lentes, elles nécessitent plusieurs heures de travail en chaque site et exigent un ciel clair, car on s'oriente en général avec l'aide du soleil; dans les meilleures conditions on ne visite en moyenne qu'un seul site par jour. D'autre part il faut travailler avec un soin extrême pour atteindre, avec ces méthodes classiques, la précision d'une minute d'arc. A l'ère de l'électronique nous avons la certitude de pouvoir trouver une méthode s'appuyant sur le fluxgate, plus simple, plus rapide et au moins aussi précise que les méthodes classiques.

Le fluxgate [3] est un capteur magnétique travaillant sur un principe inductif très raffiné et dont le signal est proportionnel à la composante de champ qui est parallèle à son axe sensible. Il s'agit donc d'un capteur rapide, réagissant aussi bien à la direction qu'à l'amplitude d'un champ. Mais si le fluxgate portatif est vraiment très sensible, par contre il n'est pas très précis. En particulier, il souffre de dérives dues aux variations de température, au vieillissement et à l'électronique qui lui est associée. De plus, son axe sensible n'est pas bien défini et en général il n'est pas aligné parfaitement avec son axe géométrique. A première vue, ces défauts semblent devoir éliminer le fluxgate. Mais ses qualités de haute sensibilité et de rapidité peuvent être mises à profit si l'on utilise ce capteur de façon indirecte, en quelque sorte comme détecteur de zéro. Imaginons que l'on fasse tourner régulièrement une sonde de fluxgate, dans un champ magnétique uniforme et constant, à la vitesse d'environ un tour par seconde. Le signal observé sera une oscillation, pas nécessairement monochromatique, mais périodique à environ 1 Hz, à laquelle peut s'ajouter un signal constant. Avec l'aide de la fig. 2 on voit qu'il existe deux géométries de rotation pour lesquelles tout signal alternatif disparaît. La première (fig. 2a) est celle où dans un champ quelconque mais uniforme et constant, l'axe de rotation est parallèle à l'axe sensible de la sonde. On peut, si on le désire et au moyen d'un montage mécanique approprié, tirer profit de cette géométrie pour identifier l'axe sensible d'un capteur fluxgate. La se-

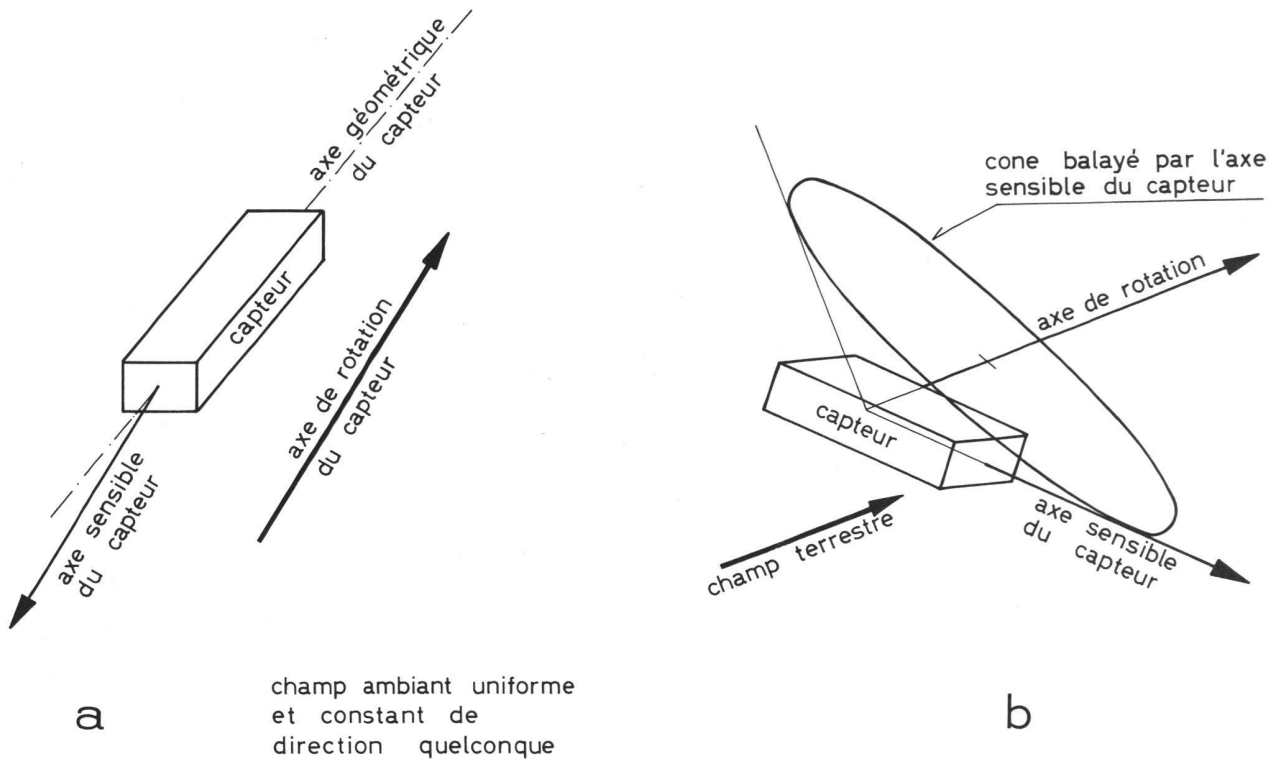


Figure 2 Les deux géométries de rotation d'un capteur directionnel pour lesquelles on n'observe pas de signaux oscillatoires:

(a) l'axe de rotation est parallèle à l'axe sensible du capteur, (b) l'axe de rotation est parallèle au champ ambiant.

conde géométrie (fig. 2b) est beaucoup plus intéressante pour nous. C'est celle où l'axe de rotation est parallèle au champ magnétique ambiant F . Dans cette géométrie l'axe sensible du fluxgate balaie la surface d'un cône circulaire dont l'axe est parallèle au champ. Sur un tel cône la projection de F a toujours même grandeur. Malgré la rotation la sonde échantillonne donc toujours un champ de même amplitude. Ce résultat est vrai pour des cônes circulaires et d'ouverture arbitraire; mais si on veut, au moyen d'un montage mécanique approprié, faire appel à ce principe pour identifier la direction de F , on choisira au sommet du cône un angle proche de 90° qui donnera la sensibilité la plus grande. Il vaut la peine de souligner que la valeur exacte de cet angle ne joue aucun rôle; il suffit de fixer la sonde approximativement en travers sur l'axe de rotation. Il n'est pas non plus nécessaire que la rotation soit régulière. En fait, pour éviter l'emploi de contacts à glissières (collecteurs) avec la sonde, il est préférable de choisir un mouvement de rotation alternatif. Ayant reconnu ce principe nous avons réalisé un montage mécanique, représenté en fig. 3, qui permet de varier de façon progressive la direction d'un support en rotation alternative, sur lequel est fixé un capteur fluxgate. L'amplitude de rotation choisie est d'environ 180° et la période du mouvement d'à peu près deux secondes. L'ensemble du mécanisme rotatoire peut pivoter autour d'un axe horizontal et indépendamment autour d'un axe vertical. Lors d'une mesure on ajuste, au moyen de deux vis micrométriques, l'orientation du montage rotatif jusqu'à disparition de tout signal alternatif. Un clinomètre à niveau d'eau de haute précision [4] solidaire du montage portant l'axe rotatif, permet aussitôt de mesurer l'angle d'inclinaison I .

L'instrument de la fig. 3 comprend aussi une petite lunette télescopique. Cette lunette est montée de façon à pouvoir pivoter autour d'un axe parallèle [5] à l'axe de pivotement horizontal du montage rotatif. La lunette peut ainsi basculer à volonté dans un plan parallèle au plan vertical passant par l'axe rotatif, axe qui vient d'être orienté parallèlement au vecteur du champ F . On plante ensuite un jalon portant une mire à une distance quelconque, entre 20 et 100 m, de telle sorte qu'une marque de la mire soit exactement au centre d'une croix réticulaire de la lunette. Une seconde marque de la mire tient compte de la distance séparant la lunette de l'axe rotatif; elle se trouve donc exactement à l'azimut du Nord magnétique par rapport au pivot vertical, lui-même centré sur la base de notre instrument. Il suffit alors de remplacer notre instrument par un théodolite à gyroscope pour déterminer la déclinaison D du Nord magnétique par rapport au Nord géographique. Comme la lunette peut pivoter librement de 360° autour de l'axe horizontal, on peut aussi viser le Sud magnétique. Cela est utile parfois lorsque des obstacles empêchent la visée vers le Nord. Autant la lecture de D que celle de I se font au dixième de minute près, mais la précision de la mesure n'est que de l'ordre de la minute. Comme la mire possède une échelle graduée, on peut, au moyen du théodolite, mesurer la déviation angulaire correspondant à une unité de cette échelle. Une fois terminée la première mesure de I et D , ce qui nécessite environ une demi-heure, on peut remettre notre instrument sur la base et faire en successions rapides autant de nouvelles mesures qu'on veut et suivre ainsi les variations temporelles de F . En général nous faisons trois mesures par site et nous y passons un temps total d'environ 45 minutes. Comme il

faut se déplacer d'un site à l'autre nous visitons en moyenne cinq à six stations par jour et ne sommes handicapés que par la pluie.

L'instrument que nous venons de décrire, utilisé conjointement avec un théodolite à gyroscope, est en fait un magnétomètre vectoriel absolu et de précision. En effet, tous les alignements et calibrations peuvent être réalisés au moyen d'un théodolite par autocollimation. Il n'est pas nécessaire de calibrer notre instrument dans un observatoire géomagnétique, comme c'est le cas pour les instruments de levés classiques. Nous avons tout de même soumis notre magnétomètre à une comparaison à l'Observatoire géomagnétique de Fürstfeldbruck et avons pu confirmer que les erreurs sont inférieures à une minute d'arc.

IV. La réduction des mesures et la station de référence

L'élimination des variations temporelles pour ramener toutes les valeurs à un même instant, est ce qu'on nomme «la réduction des mesures à une même époque». Cette réduction est possible, nous l'avons vu, par suite du synchronisme des variations temporelles, mais encore faut-il disposer d'une station de référence. Une station de référence géomagnétique a été construite en Suisse à la fin des années vingt, aux abords du village zurichois de Regensberg [6]. Depuis quelques années, cependant, cette station ne pouvait plus fournir les données nécessaires à la réduction des mesures du levé. Nous avons, dès lors, décidé de créer notre propre station de référence aux environs de Neuchâtel. Malheureusement une telle station ne s'érige pas en quelques jours; si elle est maintenant opérationnelle et peut depuis 1977 assurer

un service continu, il a fallu réduire les mesures des campagnes de 1974, 1975 et 1976 en faisant appel à des stations étrangères. Nous avons eu la chance de pouvoir compter sur l'assistance bénévole des observatoires géomagnétiques de Fürstfeldbruck, près de Munich et de Dourbes, au sud de la Belgique.

On voit par la fig. 4 que le processus de réduction engendre des incertitudes de l'ordre de ± 1 minute d'arc. La fig. 5 reproduit deux magnétogrammes, c'est-à-dire deux enregistrements des valeurs mesurées à Dourbes, de H, Z et D. C'est à partir de tels magnétogrammes que se fait la réduction; il est donc évident que lors des levés sur le terrain il faut prendre note de l'heure à laquelle on fait la mesure. Avec notre magnétomètre vectoriel, l'instant précis t est celui où le réglage a permis de faire disparaître les signaux oscillatoires. En effet, à cause des variations temporelles on voit, généralement très vite après le réglage au temps t , apparaître des oscillations qui prouvent que F a changé. L'apparition de ces oscillations démontre naturellement aussi la grande sensibilité du magnétomètre.

Tout comme notre instrumentation de campagne, la nouvelle station de référence est résolument moderne. Un magnétomètre à protons mesure F toutes les minutes. Une tête à trois fluxgates fixes mesure les composantes X, Y et Z à un rythme qui peut être choisi entre une fois et 60 fois par minute. Comme il s'agit d'un instrument d'observatoire, on a pu soigner l'électronique pour réduire les dérives. La tête de mesure est dans un puits de 2 m de profondeur et recouverte de matériaux isolants de façon à assurer une grande stabilité en température. Les valeurs de X, Y et Z ainsi obtenues ne sont

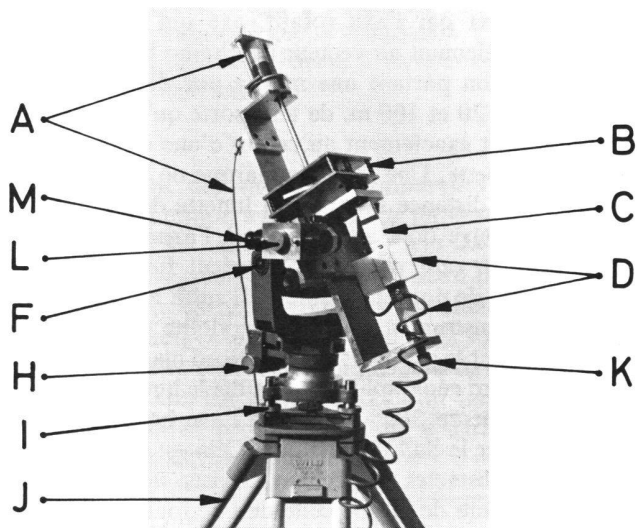
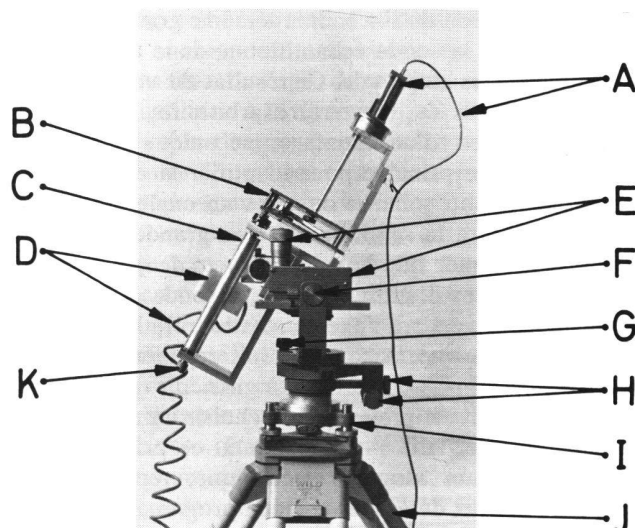


Figure 3 Le nouveau magnétomètre vectoriel. (A) Moteur et câble d'alimentation par batterie (6 V, 200 mA). (B) Inverseur mécanique à came. (C) Axe rotatif portant le capteur. (D) Capteur et câble le reliant à son électronique. (E) Clinomètre de précision avec vis micrométrique. (F) Axe horizontal de pivotement du mécanisme rotatoire. (G) Vis micrométrique pour ajuster l'inclinaison de l'axe rotatoire. (H) Dispositif de blocage et vis micrométrique pour ajuster la déclinaison de l'axe rotatoire. (I) Embase avec niveau d'eau pour mise de niveau grossière. (J) Trépied. (K) Miroir en bout d'axe rotatoire pour calibrer l'in-



clinasion par autocollimation. (L) Miroir au bout du pivot horizontal de la lunette (M) pour contrôler l'orientation du plan de basculement de la lunette [5]. La partie fixe du montage de la lunette porte un niveau d'eau sensible pour une mise de niveau précise. Remarque: Le micromoteur (A) est à environ 35 cm du capteur, distance à laquelle on vérifie, à l'aide du magnétomètre à protons, qu'il n'influence plus magnétiquement le capteur. Une enveloppe de mu-métal (cage de photomultiplicateur) entoure complètement le moteur pour empêcher l'émission de parasites électromagnétiques qui pourraient gêner le capteur.

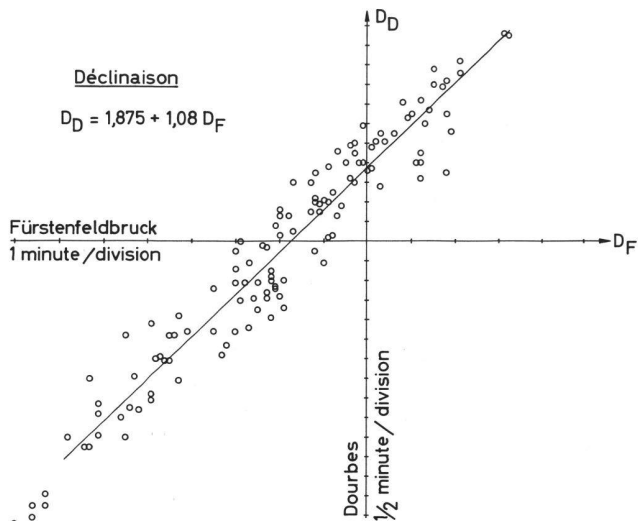
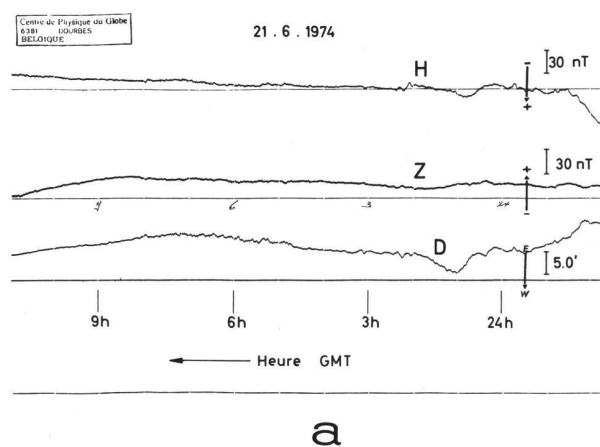
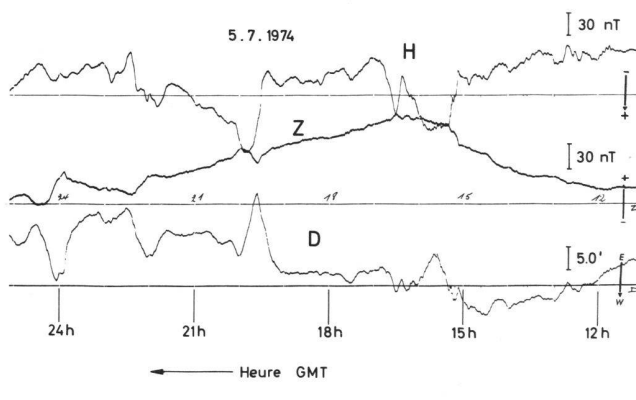


Figure 4 Variations aléatoires de la déclinaison à Fürstenfeldbruck (près de Munich) et à Douibes (au sud de la Belgique). Chaque point du diagramme correspond à une mesure de nos campagnes de 1974. Il donne l'écart de la déclinaison par rapport à la valeur moyenne admise pour ces deux observatoires. Un synchronisme parfait verrait tous ces points sur une même droite d'équation $D_D = \text{const.} + D_F$. La dispersion des points et le coefficient non-unité de 1.08 donnent une idée des écarts de synchronisme pour deux observatoires séparés de 550 km. Il va de soi que le synchronisme s'améliore lorsque la distance séparant les observatoires diminue.

naturellement pas absolues, mais des comparaisons périodiques avec notre magnétomètre absolu et certains calculs de correction permettent d'en déduire des valeurs corrigées qui sont sûres à 10 ou 20 nT près. Au lieu d'enregistrer les éléments par des techniques photographiques, nous faisons un enregistrement digital sur bande magnétique et analogique par enregistreur thermique. Ce deuxième enregistrement permet de voir ce qui se passe et de lire les valeurs instantanément, alors qu'avec des films il faut attendre que l'enregistrement de 24 h soit achevé puis le développer. Notre enregistrement digital est spécialement adapté au traitement par ordinateur pour tous les calculs, soit de corrections, de moyennes, ou d'analyses qu'on désire faire.



a



b

Figure 5 Magnétogrammes des éléments H, Z et D obtenus à l'observatoire géomagnétique de Douibes, (a) un jour magnétiquement calme et (b) un jour de forte activité magnétique. Ces

enregistrements donnent une idée des variations auxquelles il faut s'attendre, en particulier pour D, lorsqu'il y a une grande activité magnétique.

V. Etablissement des cartes géomagnétiques

Une fois rassemblées et réduites à une même époque, les valeurs obtenues sur le terrain doivent être utilisées pour l'établissement de cartes des éléments géomagnétiques. Il existe de nombreux procédés pour tracer des courbes de niveau à partir de jeux de données tels que les nôtres. Nous nous bornerons à décrire brièvement celui que nous avons choisi. Notre procédé est inspiré d'une méthode [7] de «spline» (courbe ou surface de courbure minimale). Nous faisons passer par les points de mesure une surface de courbure minimale. Cette surface aurait la même forme qu'une plaque élastique qu'on obligerait à passer par les points E (x, y), où E représente la valeur d'un des éléments D, I ou F et (x, y) sont les coordonnées kilométriques du point considéré. On obtient alors les isogones de la fig. 6 par l'intersection de la surface passant par les points D (x, y) avec des plans $D = \text{const.}$, et similairement pour les isoclines $I = \text{const.}$ de la fig. 7 et les isodynames $F = \text{const.}$ de la fig. 8.

La carte isogonique de la fig. 6 se rapporte au Nord vrai, ou Nord géographique. L'utilisateur des cartes topographiques préfère souvent se rapporter aux axes du réseau kilométrique (x, y). Pour obtenir la déclinaison D_K par rapport à l'axe x passant par un lieu de coordonnées (x, y) choisi, il faut modifier D pour tenir compte de la convergence des méridiens:

$$D_K = D - \mu,$$

où D et D_K sont négatifs s'il s'agit de déclinaisons Ouest et où μ , exprimé en minutes d'arc, vaut

$$\mu = 0.57607 (y-600) + 9.65 \cdot 10^{-5} (x-200) (y-600) + 23 \cdot 10^{-9} (x-200)^2 (y-600) - 8 \cdot 10^{-9} (y-600)^3.$$

Comme le suggère cette formule, les coordonnées (x, y) dont il s'agit ici sont les coordonnées militaires.

VI. Les sources d'erreur

Il y a essentiellement trois sources d'erreur qui viennent limiter la précision de nos mesures. La première source d'erreur a trait aux imperfections du synchronisme des fluctuations diurnes ou plus rapides entre deux endroits séparés de plusieurs centaines de kilomètres. Comme le

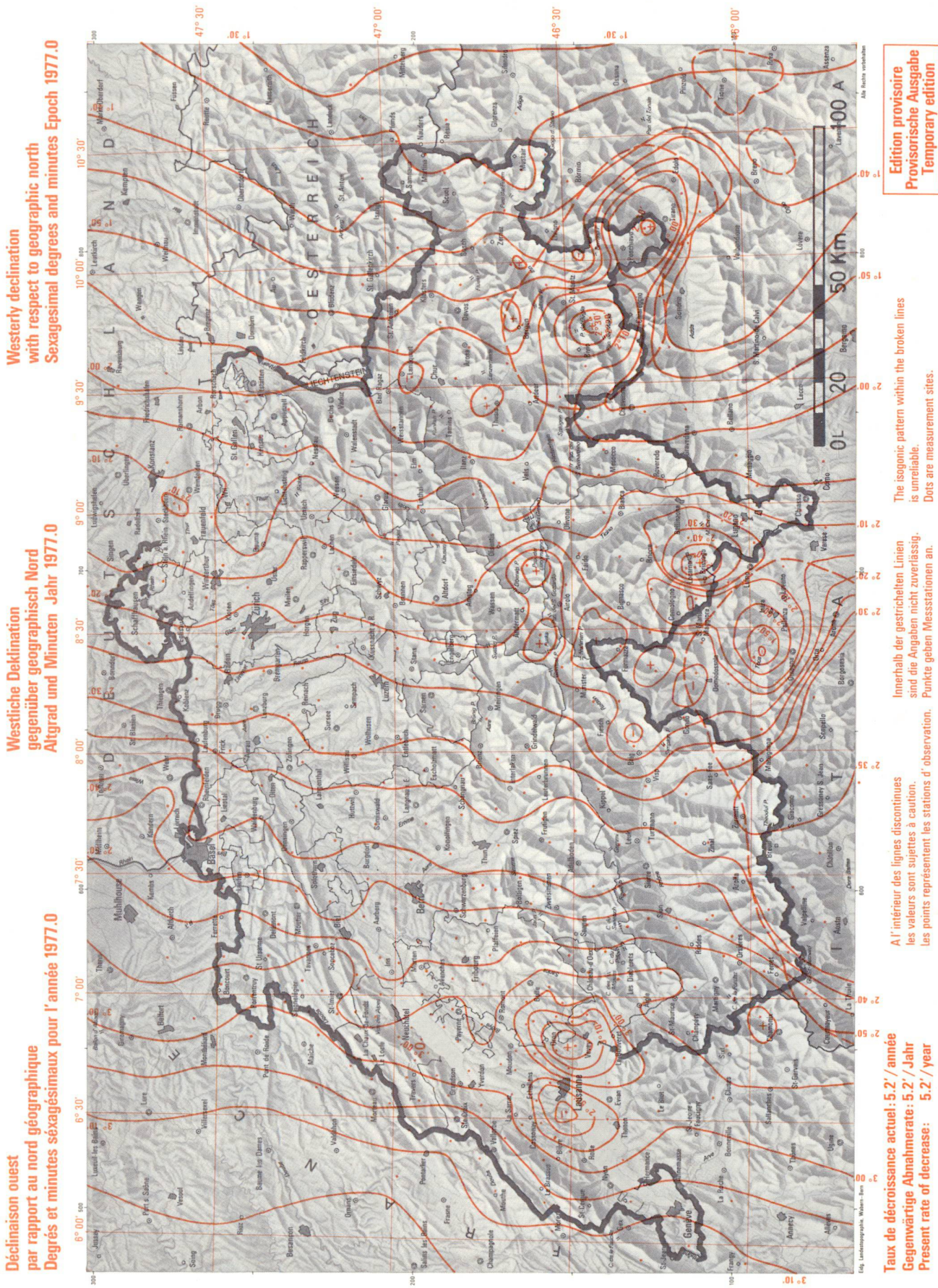


Figure 6 Carte isogonique pour la Suisse [11], réduite à 1977.0 [10].

suggère la fig. 4 cela conduit à des incertitudes de l'ordre de $\pm 1'$. Sur des échelles de temps de l'ordre de dizaines d'années on doit aussi admettre que d'un bout à l'autre du pays les éléments du champ peuvent subir des variations séculaires légèrement différentes. Par exemple, la carte isogonique publiée en 1931 par Brückmann [8] donne entre les extrêmes Ouest et Est de la Suisse une différence ΔD d'environ $1^\circ 45'$, alors que nous trouvons en 1977 une différence de $1^\circ 35'$. Cette décroissance de ΔD avec le temps est faible, elle est cependant parfaitement confirmée sur le territoire de l'Europe depuis plusieurs décennies. Mais cette observation n'affecte pas notre levé dont l'ensemble des travaux s'étale sur quatre années seulement.

Une deuxième source d'erreur provient d'anomalies locales du champ magnétique. Lorsqu'un site de mesure a été choisi il faut établir que ce site n'est pas perturbé, ni par des gisements magnétiques naturels, ni par des constructions humaines. Avant d'installer l'équipement de mesure on vérifie, à l'aide du magnétomètre à protons [2], que le site est magnétiquement homogène. En effet, si le site est perturbé, les valeurs de F ne seront pas uniformes au voisinage du site. Nous nous assurons que le site est «bon» par des mesures de F dans un rayon de 50 m environ du point de mesure et rejetons tout site, en plaine, pour lequel F varie de plus d'un nT sur 10 m. En montagne nous devons quelquefois admettre des gradients deux ou trois fois plus forts, les accidents du terrain ayant une incidence sur l'uniformité du champ. Ces mesures préliminaires révèlent d'ailleurs aussi s'il y a ce jour-là une forte «activité magnétique», c'est-à-dire de fortes et rapides fluctuations temporelles (voir par exemple la fig. 5b) qui naturellement diminuent la précision du levé. Le plus souvent la réjection d'un site résulte de constructions humaines que l'œil n'a pas décelées, telles que les conduites souterraines, les galeries en béton armé, les digues de soutènement en béton armé, ou encore les dépôts de ferraille recouverts et rendus à l'agriculture. Mais un site peut fort bien être homogène à l'échelle de quelques centaines de mètres et pourtant être perturbé par un affleurement géologique proche, très localisé. Un bel exemple d'une telle perturbation se trouve au Val Cleuson, où nous indiquons en figs. 6, 7 et 8, deux sites de mesure. Les cartes géomagnétiques ne tiennent compte que du point le plus au Sud, l'autre donnant par exemple une déclinaison plus forte de $10.5'$. Cette perturbation provient d'un petit affleurement de roches gabbroïques riches en magnétite à environ 2 km au N- 10° W de ce point. Un exemple différent est fourni par une perturbation faible mais plus étendue dans la région de Brigue. Ici nous voyons que les deux mesures voisines à l'Est de Brigue, de même que celles, un peu plus distantes, concourent à mettre en évidence une anomalie de plus grande dimension que nous ne voulons pas ignorer [9]. Dès que les dimensions d'une anomalie sont de l'ordre de 10 km ou plus nous cherchons à la représenter, tandis que nous préférons nous affranchir des perturbations à plus petite échelle. Mais les anomalies très localisées ont généralement un grand intérêt géologique et il vaut souvent la peine d'en faire une étude de détail. Dans les Grisons et au sud du Valais on se trouve dans des zones très perturbées; il sera

nécessaire d'y augmenter considérablement la densité des points de mesure.

La troisième source d'erreur se rapporte à notre instrument de mesure et à l'opérateur. La dispersion de mesures répétées en un même site, ainsi que la vérification en observatoire, nous permettent de conclure que cette erreur est de l'ordre de $\pm 0.5'$.

Si nous faisons abstraction de la deuxième source d'erreur, sur laquelle les sites voisins offrent d'ailleurs après coup une certaine information, nous voyons bien que la précision ultime de nos mesures est de l'ordre de ± 1 à 2 minutes. Il est illusoire, pour des raisons inhérentes aux phénomènes géomagnétiques, de chercher une amélioration substantielle sur les données se rapportant à tout le territoire du pays. En un même site, ou sur un petit territoire, des mesures relatives plus précises peuvent par contre fort bien se concevoir. A cet égard, notre nouvelle station de référence n'a pas pour D et I une précision absolue meilleure que celle de notre nouveau magnétomètre vectoriel transportable, mais des variations temporelles relatives de $0.1'$ pour D et I et de 0.25 nT pour F y sont significatives.

VII. Le point de vue de l'utilisateur de la carte isogonique

Le théodolite à boussole TO, allié à la carte isogonique, est un instrument admirablement approprié à une foule de problèmes d'orientation. Sa précision intrinsèque d'environ $1'$ est précisément du même ordre que celle de la carte de la fig. 6, par conséquent le TO est probablement l'instrument le moins coûteux permettant une mise en orientation absolue à la précision de ± 2 minutes d'arc, sans passer par la triangulation. Le gyroscope est dix fois plus précis, mais aussi dix fois plus cher. Mais l'emploi du TO, si une précision maximum est désirée, exige quelques précautions.

1. Il faut d'abord s'assurer que le site n'est pas perturbé. Une masse d'une tonne de fer (par exemple une voiture) devrait être à 20 m au moins, de même qu'une conduite de 30 cm de section (les structures étendues sont plus nuisibles que celles de même masse mais ramassées en un point). La façon la plus sûre de s'assurer que le site est bon est la vérification au magnétomètre à protons [2]. Lorsqu'on ne dispose pas d'un tel instrument on évitera si possible les accidents de terrain suspects qui peuvent cacher des conduites. S'il faut absolument faire une visée depuis un point manifestement perturbé, on visera d'abord ce point, ainsi que la mire choisie, depuis un autre point qui n'est pas perturbé. On se déplace ensuite au point perturbé. L'azimut de la mire se trouve alors sans avoir recours à la déclinaison, en prenant le point non perturbé comme référence.
2. Pour s'affranchir des variations temporelles il suffit de noter l'heure à laquelle une mesure a été faite et de demander la correction qu'il faut apporter à l'Observatoire Cantonal de Neuchâtel [10].
3. Le théodolite TO lui-même requiert une calibration initiale. Il faut savoir en effet que le zéro de son cercle horizontal ne correspond au Nord magnétique qu'à

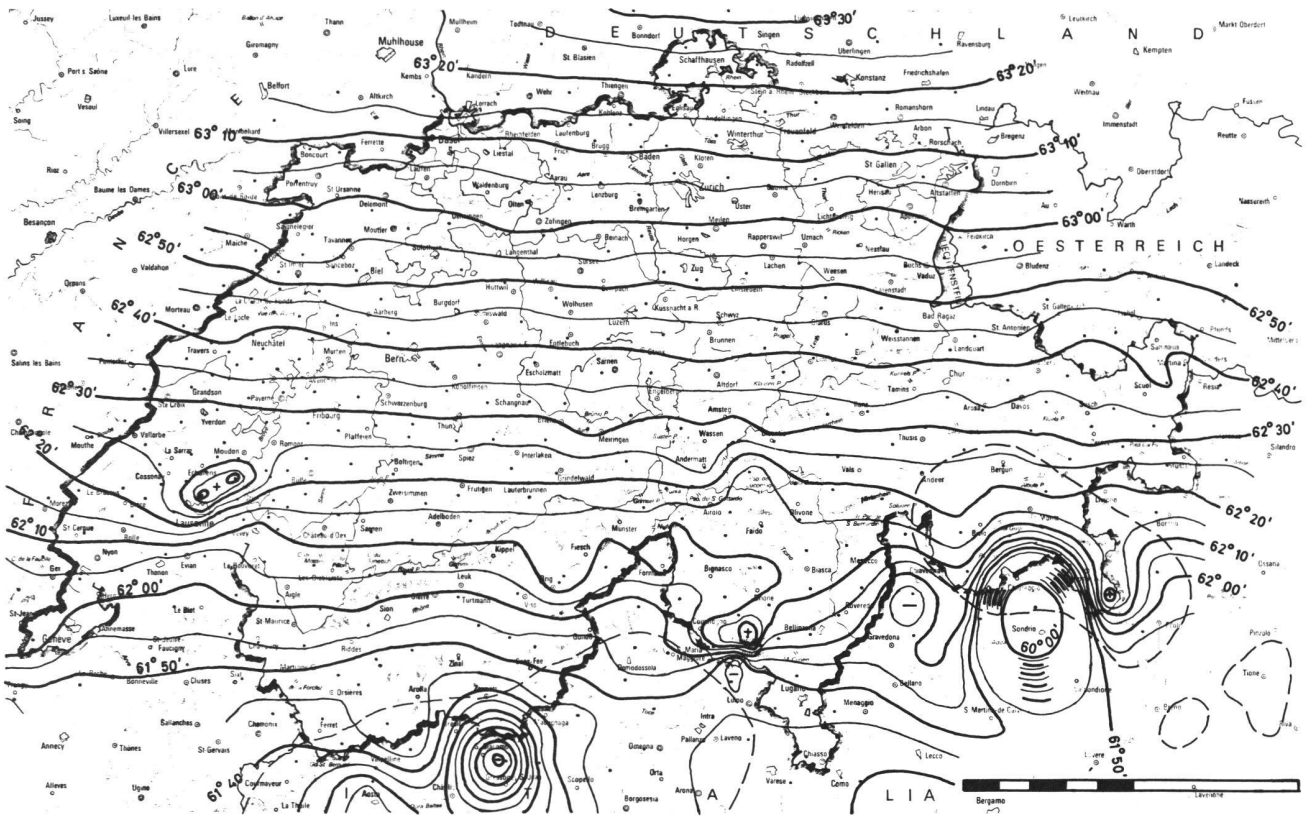


Figure 7
 Carte des isoclines [11] pour l'époque 1977.0 [10]. Dans les régions bordées d'un trait discontinu l'allure des courbes est peut sûre.

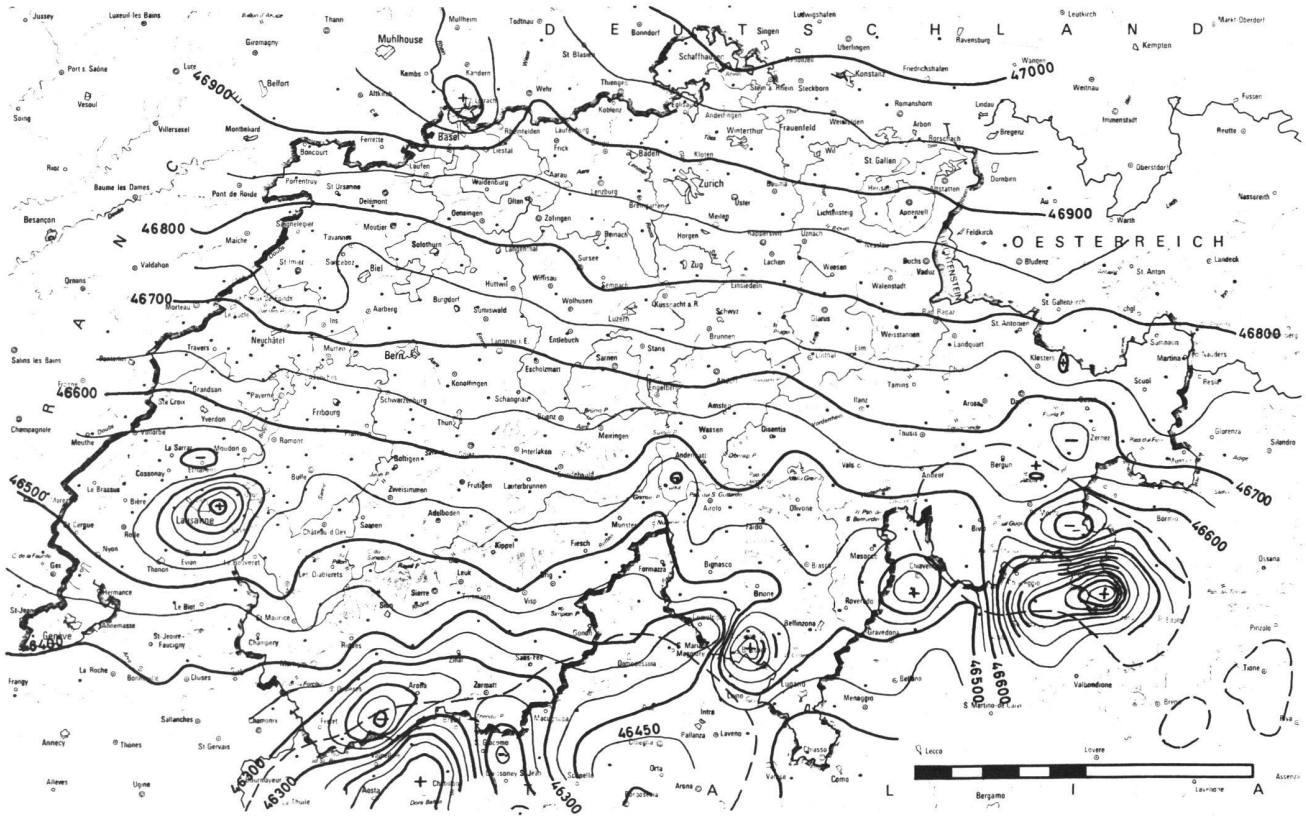


Figure 8
 Carte des isodynames [11] pour l'époque 1977.0 [10]. Dans les régions bordées d'un trait discontinu l'allure des courbes est peut sûre.

une valeur constante près. Cette constante additive peut prendre des valeurs comprises entre $\pm 20'$, voire davantage. Pour déterminer la constante de correction d'un instrument particulier, on fera une visée sur une mire d'azimut connu, ou une mesure de triangulation aussi soignée que possible, tout en obtenant la correction temporelle de l'Observatoire [10]. Il faut donc arrêter le cercle du TO à un instant t auquel on réduira les mesures.

Lorsqu'une précision de $\pm 10'$ est suffisante, on voit par la fig. 5 qu'il n'est en général pas nécessaire de réduire les mesures, pourvu qu'on ne tombe pas sur un jour d'intense activité magnétique. Fort heureusement les jours sont rares où D fluctue au-delà de $\pm 10'$, mais avec le TO comme seul instrument il est difficile de reconnaître la présence d'une forte activité perturbatrice. Ici encore, un magnétomètre à protons [2] serait utile. On tiendra cependant compte de la variation séculaire [10].

VIII. Remerciements

Il nous tient à cœur d'exprimer notre gratitude à tous ceux qui nous ont aidé à réaliser ce nouveau levé géomagnétique de la Suisse. Le Dr J. Sesiano a participé à nos campagnes de mesures en 1975. La maison Wild Heerbrugg S. A., par ses ingénieurs et techniciens MM. Piske, Schwendener et Loher, nous a prêté un concours inestimable lors de la construction du magnétomètre vectoriel. Le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique ainsi que l'Etat de Neuchâtel nous ont accordé d'importants crédits, sans lesquels la Suisse ne disposerait pas, aujourd'hui, d'une station de référence géomagnétique ultra-moderne et entièrement automatique. Le Service Topographique Fédéral a mis à notre disposition tout le matériel cartographique dont nous avions besoin.

Références

- [1] G. Fischer: La Revue Polytechnique de mai 1974, pp. 523-531.
- [2] Le magnétomètre à protons fait appel à une propriété physique des noyaux atomiques, ce qui en fait un instrument absolu, sur lequel la température n'a pratiquement pas d'influence. Plusieurs modèles portatifs (4 à 5 kg) existent dans le commerce, leur sensibilité et précision est de ± 1 nT (± 0.25 nT en option) et leur prix d'environ Fr. 10 000.-. La simplicité d'emploi alliée à l'énorme sensibilité ont fait du magnétomètre à protons un outil extrêmement utile dans une foule d'applications, telles que la détection d'objets ferreux enfouis, la localisation de conduites souterraines, la prospection minière et la détection et cartographie de sites archéologiques. - Dans le SI (nouveau Système International des unités) le nT est le nanotesla; il équivaut à l'ancien gamma (γ), lui-même égal à 10^{-5} Gauss.
- [3] Il y a de nombreux modèles de magnétomètres à fluxgate. Les instruments portatifs pour mesurer le champ magnétique terrestre pèsent de 2 à 5 kg, coûtent de 5 à 10 mille francs et leur bande passante peut s'étendre de dc à 30 Hz ou davantage.
- [4] Le zéro du clinomètre a été déterminé en laboratoire par autocollimation, au moyen d'un théodolite, sur un miroir fixé en bout de l'axe rotatif. On contrôle bien sûr périodiquement ce zéro.
- [5] A l'aide de miroirs, celui en bout de l'axe rotatoire et l'autre perpendiculaire au pivot de la lunette, on peut contrôler par autocollimation avec un petit laser au HeNe, que la lunette bascule bien dans un plan parallèle à celui dans lequel on varie l'inclinaison de l'axe rotatoire. Ici encore on fait de temps en temps des contrôles de cet alignement.
- [6] La station de Regensburg a été érigée par les soins de l'Institut Suisse de Météorologie (ISM). Ce faisant l'ISM suivait une vieille tradition qui associait les observations géomagnétiques et météorologiques. L'ISM s'est progressivement désintéressé du géomagnétisme et la station de Regensburg a définitivement cessé toute activité à la fin de 1975.
- [7] Notre méthode s'apparente à celle décrite par I. C. Briggs: Machine Contouring Using Minimum Curvature, Geophysics, vol. 39, no. 1 (février 1974), pp. 39-48.
- [8] W. Brückmann: Erdmagnetische Vermessung der Schweiz, Annales de l'Institut Suisse de Météorologie, 1930.
- [9] Cette anomalie doit très probablement être mise en relation avec une formation géologique ultrabasique étendue, qui s'approche de façon intermittente de la surface sur l'axe Simplon-Furka-Oberalp (cf. les figures 6 à 8) et dont certaines formations importantes en profondeur ont été mises en évidence lors du percement du tunnel ferroviaire du Saint-Gothard.
Nous remercions le prof. J.-P. Schaer de l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel pour ces renseignements géologiques.
- [10] *Présentement* la variation séculaire des éléments géomagnétiques est la suivante:
D décroît de 5.2' minutes par an.
I est presque stationnaire, décroissant seulement de 0.5' à 1.0' par an.
F croît de 35 nT par an.
Ces taux évoluent lentement et pourront à l'avenir être obtenus à l'Observatoire Cantonal de Neuchâtel, CH-2000 Neuchâtel.
A la même adresse on peut obtenir les corrections à apporter à des mesures faites en un temps t quelconque.
- [11] Les cartes des figures 6, 7 et 8 ont encore un caractère provisoire car elles ne sont basées que sur des sites que nous avons pu atteindre en voiture. Nous avons maintenant rassemblé une instrumentation transportable par deux hommes qui nous permettra de compléter le levé dans les régions montagneuses en 1977. Le Service Topographique Fédéral projette de mettre en vente des cartes plus définitives de D, I et F, à l'échelle 1:500 000, dans le courant de 1978.

Adresse des auteurs:
Gaston Fischer et P.-A. Schnegg,
Observatoire Cantonal, CH-2000 Neuchâtel