

Configuration structurale d'un granite et de son encaissant définie par la combinaison de données gravimétriques et géologiques *

Exemple du granite de Huelgoat (Massif armoricain)

Geostructural configuration of a granite and its surroundings using combined gravimetric and geological data

The Huelgoat granite, Armorican Massif, France

Christian CASTAING ⁽¹⁾ et Nicole DEBÉGLIA ⁽¹⁾

Mots-clés : Granite, Roche encaissante, Anomalie gravimétrique, Discontinuité gravimétrique, Pétrofabrique, Fracturation. Finistère (Granite Huelgoat).

Résumé

Cette étude décrit une nouvelle approche dans l'interprétation géologique de données gravimétriques acquises sur un granite et son encaissant (le granite de Huelgoat dans le Massif armoricain).

Cette approche est basée, premièrement, sur l'identification automatique de discontinuités gravimétriques élémentaires dérivées de l'anomalie de Bouguer, deuxièmement, sur un réarrangement de ces discontinuités au travers de lois et de contraintes définies d'après les données géologiques existantes.

Le premier point a été atteint par le développement d'un logiciel permettant la définition et la visualisation des discontinuités gravimétriques élémentaires, grâce à une analyse locale des gradients gravimétriques horizontaux et verticaux. Cette analyse automatique des données gravimétriques permet l'obtention d'une carte sur laquelle les discontinuités gravimétriques élémentaires séparent des zones relativement uniformes de densités différentes.

Le deuxième point correspond à l'interprétation géologique de la carte de discontinuités gravimétriques élémentaires au travers de lois et de contraintes dérivées d'une carte pétrostructurale du granite et de son encaissant et de données sur la fracturation. La carte pétrostructurale montre principalement la structure et la fabrique syntectonique de la région tandis que les données de fracturation illustrent la tectonique fragile tardive.

Dans une première étape, la carte pétrostructurale a été utilisée pour ajuster et réarranger les discontinuités gravimétriques élémentaires de manière à obtenir une image gravimétrique déduite de la fabrique du batholite et de son encaissant (image gravimétrique de la fabrique).

Dans une deuxième étape, les discontinuités gravimétriques élémentaires ont été initialement filtrées en fonction de directions prioritaires déduites des études statistique et cinématique de la fracturation. Ensuite, elles furent spatialement regroupées en segments de tailles plus importantes, de manière à obtenir une image gravimétrique déduite de la fracturation du batholite et de son encaissant (image gravimétrique de la fracturation).

La superposition de l'image gravimétrique de la fabrique et de celle de la fracturation a permis l'obtention d'un schéma structural de la région du granite de Huelgoat qui donne une vision plus intégrante vers la profondeur des déformations syntectoniques et tarditectoniques connues à l'affleurement.

* Manuscrit reçu le 16 septembre 1990, accepté le 20 novembre 1990.
(1) Service géologique national, BRGM, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2.

Abstract

This paper puts forward a new approach to the geological interpretation of gravity data related to a granite massif and its country rocks — the Huelgoat granite in the Armorican Massif, France.

This approach is based, firstly, on the automatic identification of elementary gravity discontinuities derived from the Bouguer anomaly, secondly, on a rearrangement of these discontinuities through rules and constraints defined from existing geological data.

The first point was achieved as the result of the development of a software program enabling definition and visualisation of the elementary gravity discontinuities thanks to a local analysis of the horizontal and vertical gravity gradient functions. This automatic analysis of the gravity data provides a map on which the elementary gravity discontinuities separate relatively uniform zones of different densities.

The second point corresponded to the geological interpretation of the elementary gravity discontinuities map through rules and constraints derived from a petrostructural map and fracturing data of the granite and its surroundings. The petrostructural map shows mainly the structure and the syntectonic internal fabric of the area whereas the fracturing data illustrate the later brittle deformation.

In a first way, the petrostructural map was utilised to adjust and rearrange the elementary gravity discontinuities in such a way as to obtain a gravity image deduced from the fabric of the batholith and its country rocks (fabric - gravity - image).

In a second way, the elementary gravity discontinuities were initially filtered as a function of priority directions according to the statistic and kinematic studies of faulting. Then, they were grouped spatially into larger segments in such a way as to obtain a gravity image deduced from the fracturing of the batholith and its country rocks (fracture - gravity - image).

The superimposition of the fabric - gravity - image and the fracturing - gravity - image enabled to obtain a structural sketch map of the Huelgoat granite area which provided a more integrated insight into the depth of the syntectonic and late tectonic deformations.

1. Introduction

L'interprétation géologique des données gravimétriques est habituellement effectuée à la main. Cette interprétation permet la construction de schémas structuraux dérivés de l'anomalie de Bouguer et de ses transformations telles que les gradients verticaux et leurs prolongements. Ces schémas structuraux montrent des zones homogènes, de plus ou moins fortes ou faibles densités, qui sont séparées par des discontinuités gravimétriques.

Nous décrivons ci-après une nouvelle approche dans l'interprétation des données gravimétriques provenant du massif granitique de Huelgoat et de son encaissant (Massif armoricain).

Cette approche est basée, premièrement, sur l'identification automatique des discontinuités gravimétriques élémentaires dérivées de l'anomalie de Bouguer, deuxièmement, sur un réarrangement de ces discontinuités au travers de lois et de contraintes définies d'après les données géologiques existantes.

2. Identification automatique d'éléments gravimétriques : discontinuités et pics gravimétriques

L'application de la méthode gravimétrique en géologie structurale repose sur la mise en évidence de variations locales du champ gravitationnel causées par

les irrégularités de densité liées à la composition et à la structure de la croûte. Une carte d'anomalie du champ gravimétrique comporte d'une part, des zones de maxima et minima et, d'autre part, des zones de resserrement des isanomales. Les zones de maxima et de minima correspondent aux axes médians des objets géologiques qui présentent un contraste de densité vis-à-vis de leur environnement. Les zones de resserrement des isanomales sont situées à l'aplomb des frontières de densité et peuvent avoir signification de contacts ou d'accidents géologiques. L'interprétation géologique des cartes gravimétriques a pour but l'identification et la localisation de ces deux types d'éléments, c'est-à-dire les objets géologiques et leurs frontières. Afin d'améliorer leur définition, des fonctions transformées du champ initial, gradient verticaux, horizontaux et prolongements peuvent être utilisés.

Le champ gravitationnel et les anomalies gravimétriques dérivent d'un potentiel scalaire. D'après la loi de Gauss, il en résulte que, si le champ $g(x, y, z)$ est connu sur une surface fermée, en l'occurrence sur la surface terrestre, il est complètement déterminé dans tout l'espace extérieur aux masses. Son prolongement $g(x, y, z)$ hors de la surface de mesure est donc calculable. En tout point de l'espace extérieur aux masses, on pourra en déduire ses dérivées horizontales et verticales et plus particulièrement :

— le gradient vertical :

$$T(x, y, z) = \partial g(x, y, z) / \partial z$$

— le module du gradient horizontal :

$$H(x, y, z) = \sqrt{[\partial g(x, y, z) / \partial x]^2 + [\partial g(x, y, z) / \partial y]^2}$$

L'intérêt de l'utilisation du gradient vertical gravimétrique, T , est connu depuis longtemps (Gérard et

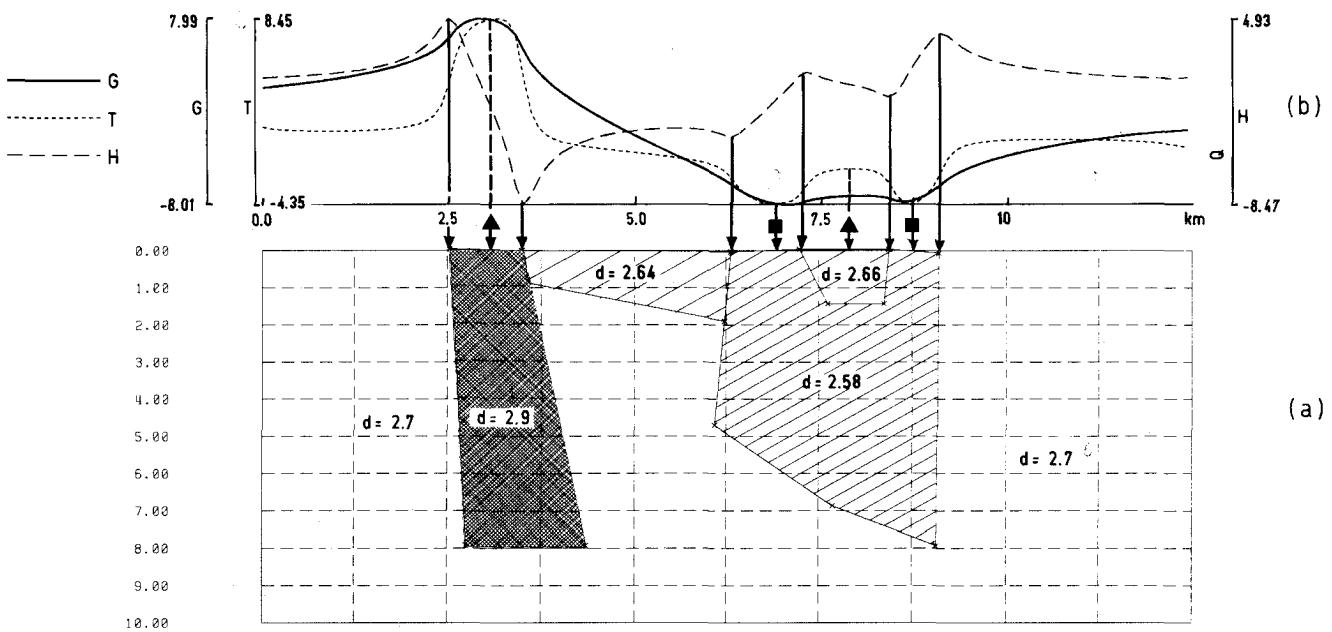


Fig. 1. - Localisation des objets géologiques par la méthode des gradients gravimétriques verticaux et horizontaux. Exemple théorique.

a) Coupe verticale du modèle ; les densités sont exprimées en unités cgs ; b) Anomalies gravimétriques correspondantes au modèle : G : champ gravimétrique en mGal, T : gradient vertical en mGal/km, H : module du gradient horizontal en mGal/km. Les maxima de la fonction T correspondent aux axes médians des objets les plus denses mentionnés par des triangles et les minima aux axes médians des objets les moins denses mentionnés par des carrés. Les extrema de la fonction H soulignent les contacts entre les objets géologiques de densités différentes.

Fig. 1. - Location of geological units by the method of vertical and horizontal gravity gradients. Theoretical example.

a) Vertical section of the model. b) Gravity anomalies according to the model : G : gravity field in mGal, T : vertical gradient in mGal/km, H : modulus of the horizontal gradient in mGal/km. The maxima of the function T correspond to the median axes of the heavy units, represented by triangles, and the minima to the median axes of the light units, represented by squares. The extrema of the function H mark the contacts between geological units of different densities.

Griveau, 1972 ; Goguel, 1972) par les propriétés de focalisation des extrêmes de ce gradient à l'aplomb des axes médians des corps perturbateurs (fig. 1). Les maxima de la fonction T correspondent aux objets géologiques présentant une densité supérieure à celle de leur environnement, les minima à ceux ayant une densité inférieure à celle de leur environnement.

L'analyse du gradient horizontal gravimétrique est utilisée depuis quelques années pour localiser les frontières de densités (Cordell et Grauch, 1985 ; Blakely et Simpson, 1986). Cette méthode est basée sur le fait qu'une frontière de densité verticale se marque par un extrême du gradient horizontal, H, localisé à l'aplomb du contact (fig. 1). Si le contact est penté, les extrêmes du gradient horizontal peuvent être légèrement décalés dans le sens du pendage (Grauch et Cordell, 1987). Le décalage est également fonction de la profondeur du bord supérieur du contact et de son épaisseur. Mais quel que soit le pendage, le décalage est toujours nul si le contact est affleurant.

des opérateurs multiplicatifs adéquats à la transformée de Fourier du champ gravimétrique (Gérard et Griveau, 1972). La transformée de Fourier inverse permet d'obtenir le gradient vertical, T, et les composantes du gradient horizontal à partir desquelles on déduit le module, H. Ce calcul des gradients doit être effectué avec discernement, en particulier en ce qui concerne le choix des paramètres de traitement (maille de la grille de calcul, filtrage, périodisation) de manière à éviter la formation d'artéfacts.

On procède ensuite à l'analyse locale des fonctions H et T par une méthode adaptée des travaux de Blakely et Simpson (1986). La recherche des extrêmes est effectuée au voisinage de chaque point de grille selon quatre directions d'analyse. Si un extrême est détecté sur deux directions voisines, sa position exacte est calculée par interpolation.

Ce calcul met en évidence des éléments gravimétriques de deux types :

- des discontinuités gravimétriques élémentaires de longueur indéterminée, déduites de l'analyse du gradient horizontal. Elles sont caractérisées par leurs coordonnées, par leur direction et par un paramètre proportionnel au gradient horizontal au point considéré ;
- des pics gravimétriques correspondant aux maxima et minima du gradient vertical. Ils sont caractérisés par leurs coordonnées et par un paramètre propor-

2.1. Méthode utilisée

La méthode utilisée est basée sur une analyse locale automatique des fonctions H (module du gradient horizontal) et T (gradient vertical) effectué par un logiciel mis au point à cet effet. Le gradient vertical et les composantes du gradient horizontal sont préalablement calculées dans le domaine fréquentiel par application

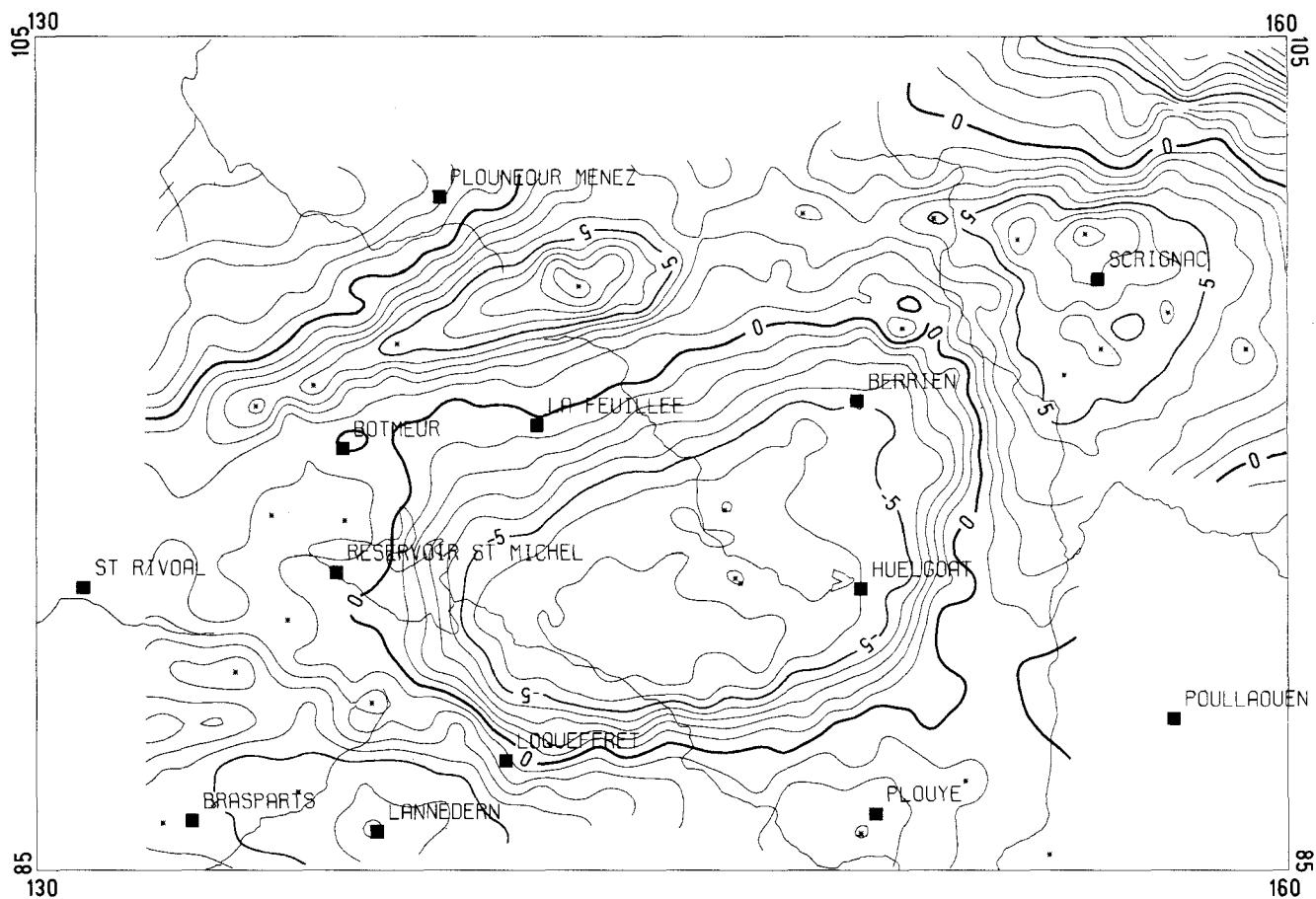


Fig. 2. - Cartes de l'anomalie gravimétrique de Bourguer du granite de Huelgoat. L'intervalle des contours est de 1 mGal.

Fig. 2. - Bouguer anomaly map of the Huelgoat Granite. Contour interval 1 mGal.

0 2 4 6 km

tionnel à la valeur du gradient vertical au point considéré.

2.2. Application au massif granitique de Huelgoat et à son encaissant

La carte d'anomalie de Bouguer résulte de l'interpolation des mesures gravimétriques disponibles dans la région sur une grille de pas $0,5 \times 0,5$ km. La densité moyenne des stations est de 3 points au km^2 . La précision de l'anomalie est meilleure que 0,6 mGal.

La carte d'anomalie de Bouguer (fig. 2) fait apparaître des anomalies négatives à l'aplomb des granites et des anomalies positives au niveau de l'encaissant métasédimentaire. Ce résultat peut être expliqué par les mesures de densités d'échantillons de ces deux formations pour lesquelles des densités moyennes respectives de 2,63 pour les granites et 2,7 pour les métasédiments ont été obtenues. Le contact entre les deux unités lithologiques est marqué par de forts gradients horizontaux de l'anomalie de Bouguer. La carte du gradient vertical de l'anomalie de Bouguer (fig. 3) met préférentiellement en évidence les effets des structures géologiques les plus superficielles, diminue les coalescences entre anomalies proches et focalise les anomalies à l'aplomb des structures qui les créent. Cette carte fait apparaître,

à l'intérieur de l'unité granitique, des sous-ensembles qui correspondent à des variations de densités des différents faciès pétrographiques du granite (de 2,58 à 2,67 d'après les mesures sur échantillons).

Le logiciel d'analyse automatique des gradients décrits ci-dessus permet d'obtenir et de visualiser les deux types d'éléments gravimétriques : discontinuités élémentaires et pics (fig. 4). Les discontinuités élémentaires gravimétriques sont représentées par des segments de longueur constante et proportionnelle à la maille de la grille de calcul. L'épaisseur de ces segments est proportionnelle à la valeur du gradient horizontal au point considéré. Les pics sont reportés sous forme de triangles pour les maxima et de carrés pour les minima, la dimension de ces symboles étant proportionnelle à la valeur du gradient vertical. Cette carte illustre, de manière plus précise, la structure géologique de la région que ne le permettait l'anomalie de Bouguer initiale ou son gradient vertical.

Les éléments gravimétriques ainsi obtenus n'ont qu'une signification ponctuelle. Ceci résulte de leur mode de définition par une recherche locale des extrêmes des fonctions gradient. Cette méthode met en évidence tous les extrêmes, même isolés, qui sont d'une amplitude supérieure à un seuil de précision fourni par l'utilisateur. Cette détection est indépendante de l'organisation géométrique des extrêmes et la cohérence de la carte ainsi produite (fig. 4) n'est pas obligatoire.

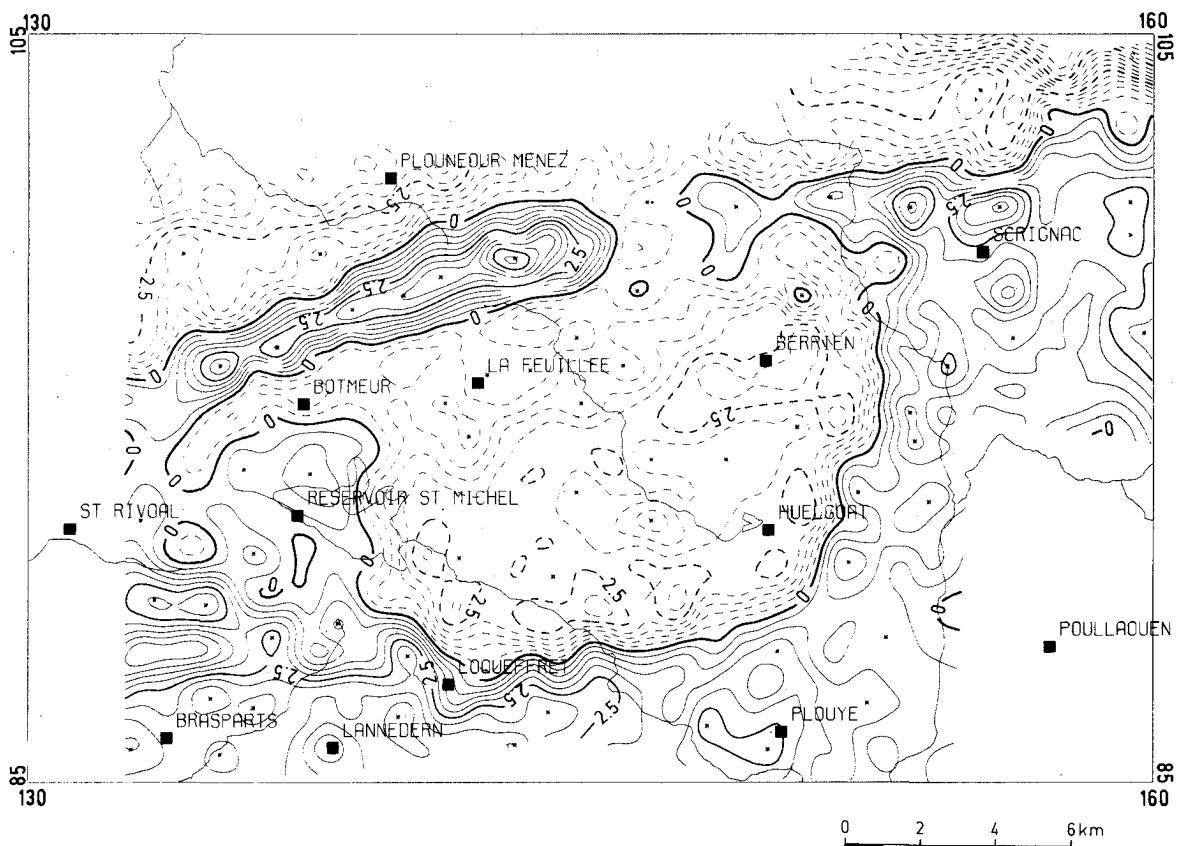


Fig. 3. - Carte du gradient vertical gravimétrique du granite de Huelgoat. L'intervalle des contours est de 0,5 mGal/km.

Fig. 3. - Vertical gravity gradient map of the Huelgoat Granite. Contour interval 0.5 mGal/km.

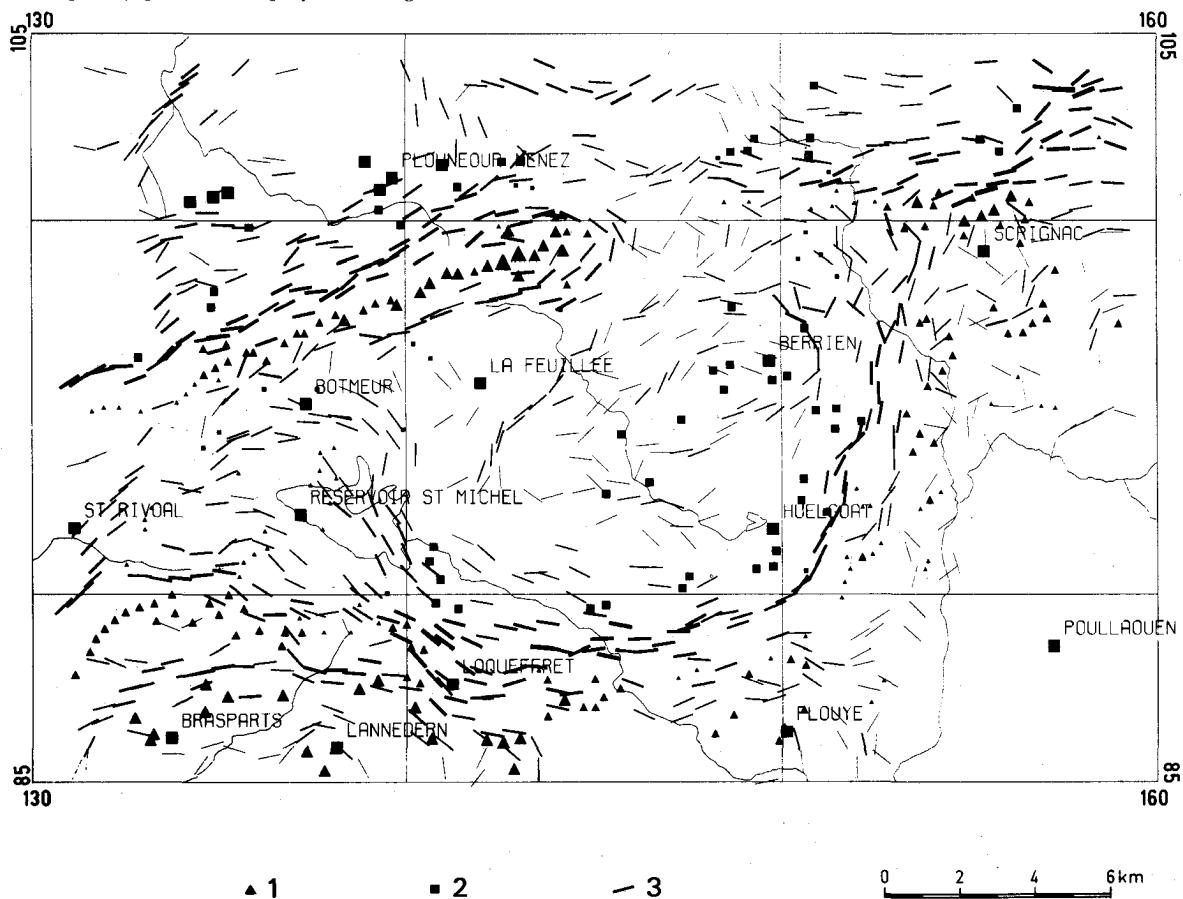


Fig. 4. - Carte des éléments gravimétriques du granite de Huelgoat.

1 : Maxima du gradient vertical (pics positifs) ; 2 : Minima du gradient vertical (pics négatifs) ; 3 : Discontinuités gravimétriques élémentaires.

Fig. 4. - Map showing gravimetric features of the Huelgoat Granite.

1 : Vertical gradient maxima (positive peaks) ; 2 : Vertical gradient minima (negative peaks) ; 3 : Elementary gravity discontinuities.

ment assurée : elle est fonction de celle de la donnée de base et dépend de la qualité du traitement effectué. Cette carte objective va être ensuite interprétée en fonction de connaissances géologiques existant sur la région considérée.

qu'elles séparent (pics gravimétriques), correspond à une première étape dans l'interprétation géologique des données gravimétriques de la région de Huelgoat.

3. Élaboration d'images gravimétriques de la géologie définies par la combinaison de données gravimétriques et géologiques

3.1. Données existantes

- **Carte des éléments gravimétriques (fig. 4)**

L'identification automatique des discontinuités gravimétriques élémentaires et simultanément des maxima

- **Carte pétrostructurale (fig. 5)**

La carte pétrostructurale montre les enveloppes des différents faciès du granite de Huelgoat, les principales zones de cisaillement dont celle passant par les Monts d'Arrée, et les éléments de fabrique matérialisés par les traces des fluidalités magmatiques, des foliations et des schistosités dans le granite et son encaissant (Georget, 1986).

L'intrusion diapirique syntectonique du granite est caractérisée par le métamorphisme de contact syncinétique affectant les roches métasédimentaires et par la mylonitisation de la marge nord du pluton, en contact avec le cisaillement des Monts d'Arrée (Darboux, 1981 ; Castaing *et al.*, 1987). L'intrusion syntectonique est également argumentée par les relations géométriques existant entre la pétrofabrique du pluton et celle des roches encaissantes. Au contact, les plans de schistosité des

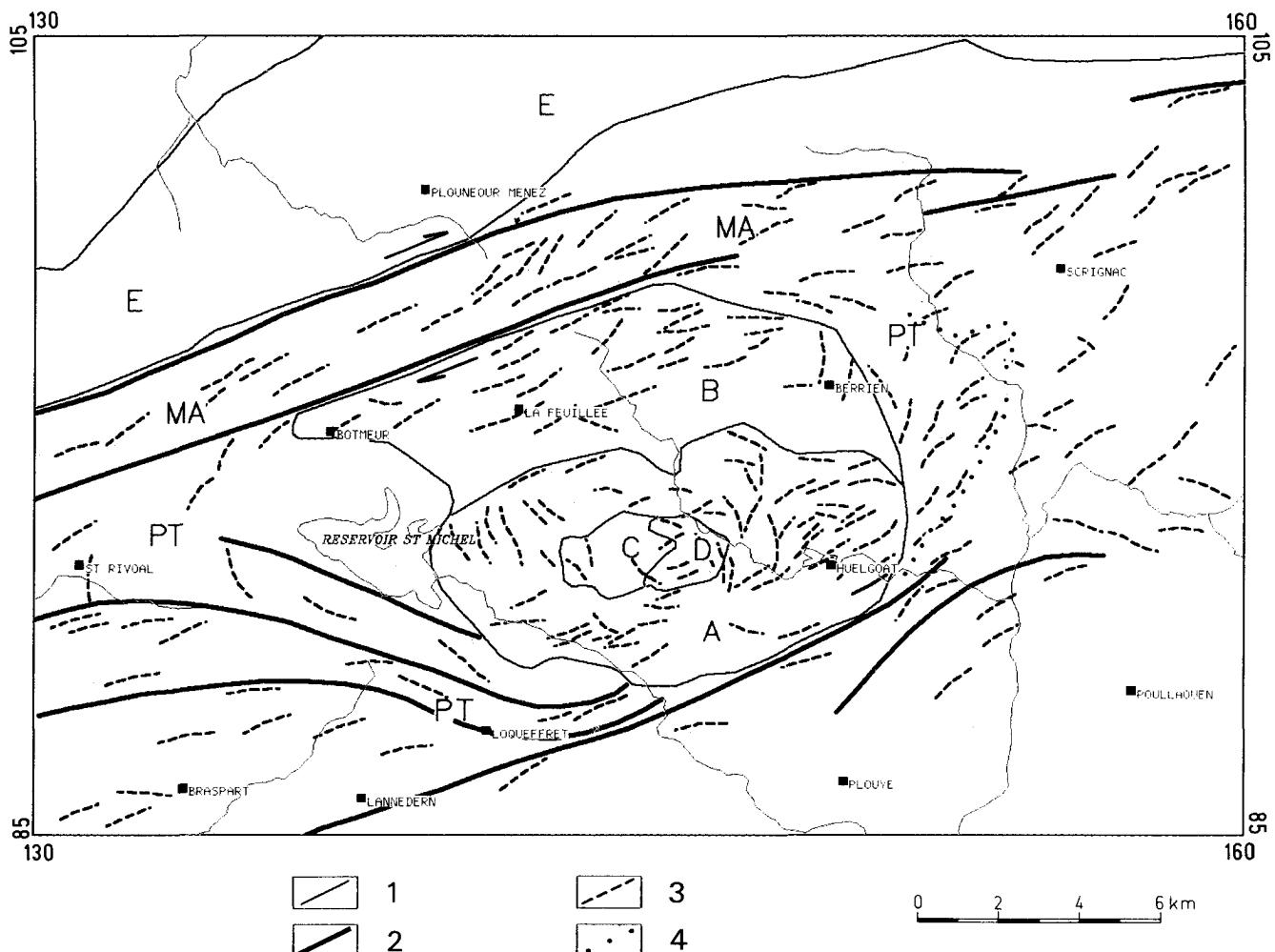


Fig. 5. - Carte pétrostructurale du granite de Huelgoat.

1 : Enveloppe des différents faciès pétrographiques ; 2 : Zones de cisaillement ; 3 : Trace des plans de fabrique : fluidalité, foliation, schistosité ; 4 : Auréole de métamorphisme de contact ; A, B, C, D : Différents faciès du granite de Huelgoat ; E : Granite de Plounéour ; MA : Monts d'Arrée ; PT : Zones de « point triple » formées par les traces de la schistosité.

Fig. 5. - Petrostructural map of the Huelgoat Granite.

Fig. 5. Petrographical map of the Huelgoat Granite.
 1 : Boundaries of the different petrographic facies ; 2 : Shear zones ; 3 : Traces of fabric planes (flow foliation, metamorphic foliation, schistosity) ;
 4 : Contact metamorphism aureole ; A, B, C, D : Various facies of the Huelgoat Granite ; E : Plounéour Granite ; MA : Monts d'Arrée ; PT : « Triple point » zones formed by traces of schistosity.

roches métasédimentaires sont moulés sur les plans de fluidalité et foliation du granite qui montrent, vers le centre, une structuration hélicoïdale (Ledru et Brun, 1977). De plus, les plans de schistosité forment des zones de « point triple » de chaque côté du pluton (Brun et Pons, 1981).

• Données de la fracturation (fig. 6)

L'évolution tardi-tectonique de la région correspond à la fracturation du granite et de son encaissant. Les données de la fracturation sont présentées sous la forme d'histogrammes directionnels des fractures mesurés au sol (fig. 6a) ou interprétées d'après l'imagerie spatiale SPOT (fig. 6b). Trois épisodes distincts de déformation cassante ont été identifiés (Castaing *et al.*, 1989) :

- une compression NW-SE à l'origine de la formation de fractures N 100-130° E fonctionnant en décrochements dextres ;
- une compression N-S induisant la formation de décrochements conjugués N 0-30° E sénestres et N 150-170° E dextres ;
- une distension NE-SW faisant rejouer les accidents N 100-130° E et N 150-170° E en failles normales.

3.2. Élaboration d'une image gravimétrique représentative de la fabrique du massif

Nous considérons que les discontinuités gravimétriques élémentaires peuvent, soit correspondre à des contacts lithologiques, soit souligner certains alignements de fabrique ou des zones de cisaillement, c'est-à-dire des structures qui se développent toujours selon une certaine longueur, comme le montre la carte pétrostructurale (fig. 5).

Ainsi, il est possible de prolonger ces discontinuités gravimétriques d'une longueur variable qui va être fonction du « poids géologique » qu'on leur attribue. La prolongation pondérée des discontinuités dépend d'un critère directionnel obtenu d'après la direction des structures géologiques considérées comme prépondérantes dans un secteur donné de la carte pétrostructurale.

Dans le cas présent (fig. 5), la direction des zones principales de cisaillement est prioritaire partout où elles existent : N 70-85° E dans les Monts d'Arrée, approximativement N 100° E entre Saint-Rivoal et Loqueffret, etc... Dans les zones de contact entre le granite et l'encaissant, l'orientation du contact est considérée comme prioritaire s'il n'y a pas de zone de cisaillement. En dehors des zones de cisaillement et de contact, la priorité directionnelle est donnée par la direction de la fabrique planaire, c'est-à-dire celle des plans de fluidalité, foliation ou schistosité.

Pour chaque secteur considéré, nous donnons priorité, par une procédure en cascade, aux discontinuités gravimétriques élémentaires se rapprochant le plus de la direction des structures géologiques considérées

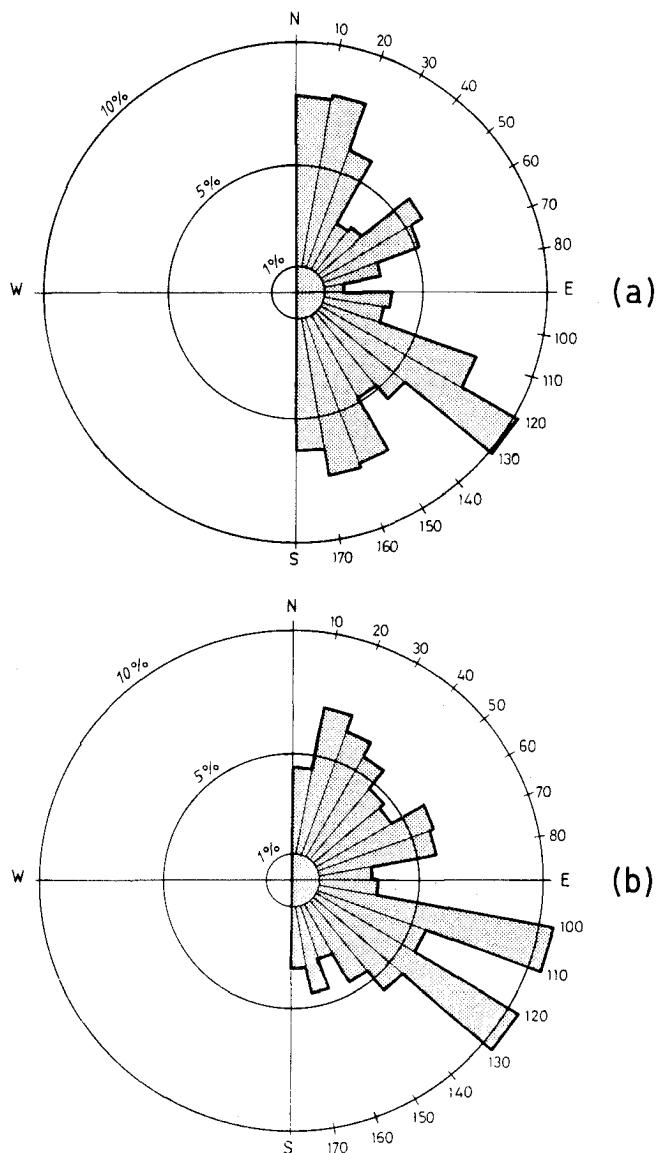


Fig. 6. - Histogrammes directionnels de la fracturation du granite de Huelgoat.

a) Mesurés au sol ; b) Interprétés d'après l'imagerie satellitaire SPOT.

Fig. 6. - Rose diagrams of fracturing in the Huelgoat Granite. a) Measured on the ground ; b) Interpreted from SPOT satellite imagery.

comme prépondérantes. Chaque discontinuité gravimétrique prolongée de cette manière sera stoppée contre la discontinuité d'ordre supérieur qui sera la plus proche de la direction prépondérante définie, de manière à éviter les croisements. De cette manière, une image gravimétrique de la structure et de la fabrique de la région est à la fois dérivée des données gravimétriques et pétrostructurales. Nous la nommons : image gravimétrique de la fabrique (fig. 7).

Jusqu'à maintenant, cette opération a été menée à la main, depuis les discontinuités gravimétriques élémentaires identifiées automatiquement (fig. 4), via la carte pétrostructurale (fig. 5), jusqu'à l'image gravimétrique de la fabrique (fig. 7). La carte pétrostructurale peut être considérée comme une « image guide » au travers de laquelle les discontinuités gravimétriques ont été hiérarchisées et extrapolées. En fait, l'image gravimétrique de la fabrique permet d'optimiser les données géologiques de la carte pétrostructurale.

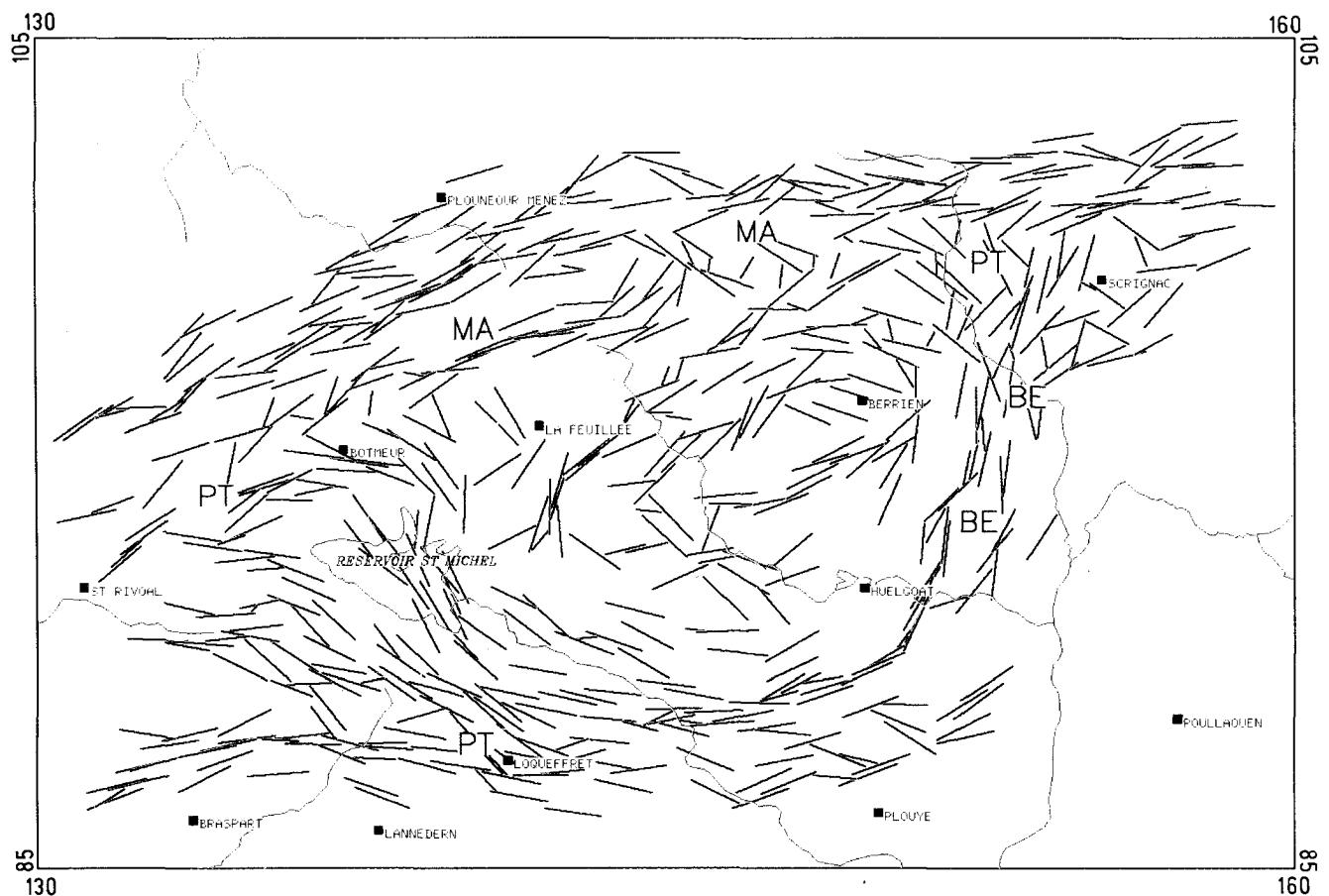


Fig. 7. - Image gravimétrique de la fabrique du granite de Huelgoat montrant le réseau des « discontinuités gravimétriques de fabrique ».

MA : Monts d'Arrée ; BE : Bordure est du pluton ; PT : Zones de « point triple » formés par les traces des « discontinuités gravimétriques de fabrique ».

Fig. 7. - *Gravimetry image of the fabric of the Huelgoat Granite, showing the network of « fabric gravity discontinuities ».*
MA : Monts d'Arrée ; BE : East margin of the pluton ; PT : « Triple point » zones formed by the traces of the « fabric gravity discontinuities ».

D'une part, cette image souligne l'architecture interne du pluton et, d'autre part, démontre sa mise en place syntectonique par l'existence de « points triples » formés par les discontinuités gravimétriques extrapolées. Ces « points triples » sont similaires à ceux formés par les plans de schistosité, visibles sur la carte pétrostructurale (fig. 5), (§ 3.1). De plus, les zones de cisaillement principales sont bien visibles sur l'image gravimétrique de la fabrique ainsi que le caractère dextre de celle des Monts d'Arrée.

3.3. Élaboration d'une image gravimétrique représentative de la fracturation du massif

Nous avons considéré que les discontinuités gravimétriques élémentaires (fig. 4) pouvaient correspondre à des contacts lithologiques, des plans de fabrique ou des zones de cisaillement (§ 3.2). Elles peuvent aussi correspondre à des failles et des fractures qui se développent toujours selon une certaine longueur.

Comme dans le chapitre précédent, l'image de départ correspond à la carte des éléments gravimé-

triques (fig. 4). Mais ici, ce n'est pas la déformation syntectonique pénétrative que nous allons essayer de reconstituer d'après les données gravimétriques, mais la déformation fragile tardive.

L'« image guide » qui correspondait à la carte pétrostructurale est remplacée par le système de fracturation résumé par les histogrammes directionnels (fig. 6). Ces données vont servir à filtrer les discontinuités gravimétriques élémentaires, en fonction d'une classification directionnelle basée sur les études statistique, cinématique et chronologique de la fracturation (§ 3.1.).

Cette classification permet de définir quatre ordres de priorité :

- le premier ordre, couvrant l'éventail de directions N 100°-N 130° E, correspondant aux fractures du premier épisode de fracturation ;
- le deuxième ordre, couvrant l'éventail de directions N 0°-N 30° E, correspondant aux décrochements sénestres du deuxième épisode de fracturation ;
- le troisième ordre, couvrant l'éventail de directions N 150°-N 170° E, correspondant aux décrochements dextres du deuxième épisode de fracturation ;

— le quatrième ordre, couvrant l'éventail de directions N 50-N 80° E, correspond aux fractures les moins exprimées mais qui sont dans l'alignement de la structuration régionale majeure (fig. 5).

La méthode de tri utilisée correspond à un balayage général de la carte des discontinuités gravimétriques élémentaires (fig. 4) qui sont filtrées en fonction des directions définies ci-dessus. Ce balayage permet l'identification de groupes de discontinuités qui sont constituées par des discontinuités voisines correspondant à un même éventail de direction et distantes d'une valeur inférieure à un seuil donné. A chaque groupe est alloué un segment, centré sur le centre de gravité du groupe et ayant la dimension de l'enveloppe du groupe selon sa direction principale.

Le réseau de segments est complété par la mise en évidence de décalages existant entre ces segments, ainsi que des décalages existant entre les axes gravimétriques positifs ou négatifs. Les zones de décalage sont ensuite soulignées par des segments de directions compatibles avec celles de la fracturation. De cette manière, une image gravimétrique de la fracturation de la zone est dérivée à la fois des données gravimétriques et de celles de la fracturation. Nous la

nommons : image gravimétrique de la fracturation (fig. 8).

Cette image gravimétrique de la fracturation est caractérisée par la prépondérance des directions N 100-130° E et N 50-80° E. Les premières, situées principalement de chaque côté du pluton (NE et SW), correspondent aux grandes discontinuités cassantes (fig. 6). Les deuxièmes, présentes sur toute la zone, sont particulièrement bien exprimées au niveau des Monts d'Arrée (fig. 8). Elles soulignent plutôt les anomalies gravimétriques induites par la structuration régionale syntectonique (fig. 1, 2 et 5) que celles indiquant la fracturation N 50-80° E.

D'ailleurs, il est évident que les discontinuités gravimétriques N 50-80° E sont plus récentes que les autres, parce qu'elles sont clairement décalées par les familles N 100-130° E et N 150-170° E fonctionnant en décrochements dextres (fig. 8). Ces décrochements dextres sont en parfait accord avec l'étude cinématique de la fracturation (§ 3.1).

L'image gravimétrique de la fracturation confirme donc la logique de la fracturation-terrain et illustre le réseau de discontinuités fragiles fondamentales qui peuvent créer des hétérogénéités de densité.



Fig. 8. - Image gravimétrique de la fracturation du granite de Huelgoat montrant le réseau des « discontinuités gravimétriques de fracturation ».

1 : Directions N 100-130° E ; 2 : Directions N 0-30° E et N 150-170° E ; 3 : Directions N 50-80° E.

Fig. 8. - Gravity image of fracturing in the Huelgoat Granite, showing the network of « fracture gravity discontinuities ». 1 : N 100-130° trends ; 2 : N 0°-030° and 150-170° trends ; 3 : N 050-080° trends.

4. Discussion et conclusions

L'interprétation classique des données gravimétriques contient souvent un élément subjectif qu'il est difficile d'identifier. L'approche proposée dans cette publication permet de séparer clairement la partie objective et aisément quantifiable de l'analyse (§ 2) de la partie la plus subjective qui correspond à la combinaison des données gravimétriques et géologiques (§ 3).

Premièrement, l'analyse automatique des données gravimétriques fournit une carte de discontinuités gravimétriques élémentaires séparant des zones uniformes de densités différentes. Deuxièmement, cette carte est interprétée par référence à des données géologiques sélectionnées telles qu'une carte pétrostructurale indiquant la structuration et la fabrique syntectonique, ou telles que des données de la tectonique fragile illustrant la fracturation plus tardive.

Dans la première démarche (§ 3.2), la carte pétrostructurale est considérée comme une « image guide » au travers de laquelle les discontinuités gravimétriques

sont hiérarchisées et extrapolées, de manière à visualiser la déformation pénétrative par le dessin d'un réseau de « discontinuités gravimétriques de fabrique » (fig. 7).

Dans ce cas, la carte est divisée en zones polygonales gravimétriquement homogènes. La longueur et l'arrangement des côtés des polygones varient en fonction des données de l'« image guide », mais pas leurs directions définies par l'anomalie de Bouguer.

Dans la deuxième démarche (§ 3.3), les discontinuités gravimétriques élémentaires sont initialement filtrées en fonction de priorités directionnelles issues des données des études statistique et cinématique de la fracturation. Ensuite, elles sont regroupées spatialement en segments plus importants. Le réseau est ensuite complété par le dessin des décalages de ces segments. Il est donc possible de visualiser la déformation fragile par le dessin d'un réseau de « discontinuités gravimétriques de fracturation » (fig. 8).

Dans la première démarche, toutes les discontinuités gravimétriques sont présentes, plus ou moins prolongées, dans l'image gravimétrique de la fabrique. Cette image, relativement complexe, est représentative

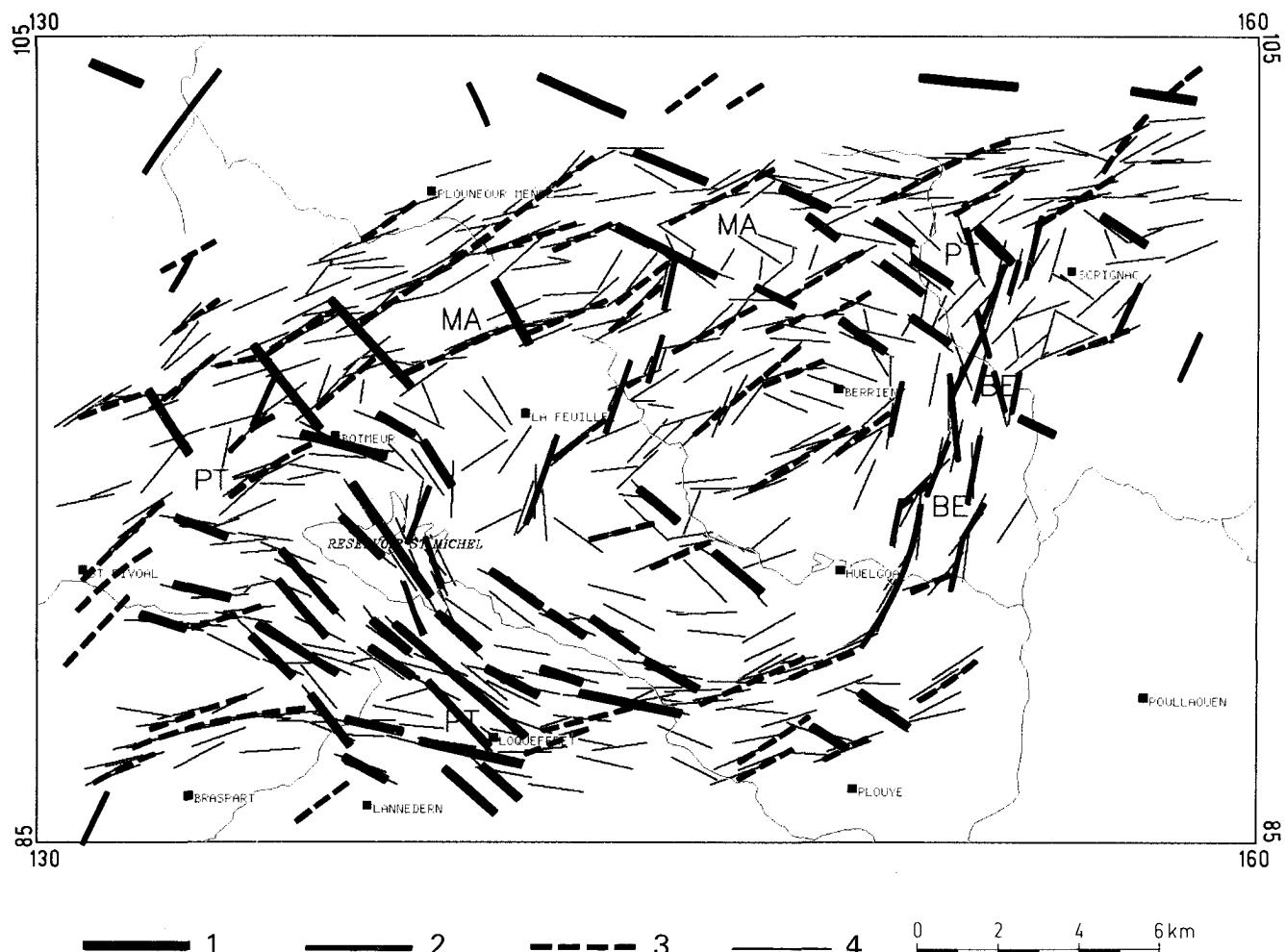


Fig. 9. - Schéma structural du granite de Huelgoat.
1, 2, 3 : « Discontinuités gravimétriques de fracturation » ; 4 : « Discontinuités gravimétriques de fabrique ».

Fig. 9. - Structural sketch map of the Huelgoat Granite.
1, 2, 3 : « Fracture gravity discontinuities » ; 4 : « Fabric gravity discontinuities ».

de la déformation syntectonique pénétrative de la région. Dans la deuxième démarche, le filtrage et le regroupement des discontinuités gravimétriques élémentaires permet d'obtenir un nombre réduit de « discontinuités gravimétriques de fracturation », donnant une image plus simple mais représentative de la tectonique fragile tardive. Les deux approches sont donc complémentaires et la superposition de l'image gravimétrique de la fracturation sur l'image gravimétrique de la fabrique permet de proposer un schéma structural de la région de Huelgoat (fig. 9).

Pour obtenir de tels schémas structuraux, l'automatisation de la méthode est maintenant considérée comme l'étape prioritaire. Elle permettrait de varier rapidement les « images guides » et les « filtres géologiques » de manière à examiner la représentativité gravimétrique de chacun d'eux et à mieux expliquer la signification géologique des discontinuités gravimétriques. Il serait aussi possible d'introduire des

contraintes de différente nature telles que des données magnétiques ou de télédétection.

Ces images gravimétriques finales conservent leur spécificité initiale, mais peuvent mettre en évidence de nouvelles informations de subsurface non révélées par les données gravimétriques et géologiques initiales. Dans le cas présent, les images gravimétriques interprétées permettent une vision plus intégrée vers la profondeur de la déformation syntectonique régionale et de la déformation fragile tardive connues en affleurement.

Remerciements

Nous remercions J.-L. Blès, S. Lallier et J. Corpel pour leur lecture critique du manuscrit.

Les logiciels utilisés pour cette étude ont été développés dans le cadre d'un projet de recherche commun avec TOTAL Compagnie française des pétroles.

Références bibliographiques

- BLAKELY R.J., SIMPSON R.W. (1986). - Locating edges of sources bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, **51**, pp. 1494-1498.
- BRUN J.-P., PONS J. (1981). - Strain patterns of pluton emplacement in a crust undergoing non co-axial deformation, Sierre Morena, Southern Spain. *J. structural geology*, **3**, n° 3, pp. 219-229.
- CASTAING C., ROLET J., CHEVREMONT P., CALVEZ J.-Y., THONON P. (1987). - La région de Huelgoat (Finistère central) dans le contexte géodynamique armoricain. B.R.G.M., *Géologie de la France*, n° 1, pp. 23-26.
- CASTAING C., DUTARTRE P., GOUYET J.-F., LOISEAU P., MARTIN P. (1989). - Étude pluridisciplinaire d'un réseau de linéaments SPOT en milieu granitique couvert. Implications en hydrogéologie des milieux fissurés. *Bull. Soc. fr. photogrammétrie et télédétection*, pp. 13-23.
- CORDELL L., GRAUCH V.J.S. (1985). - Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, in Hinze, W.J. ed., *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*. Soc. Explor. Geophys., pp. 181-197.

DARBOUX J.-R. (1981). - Caractérisation du régime cisaillant de la déformation hercynienne dans les Monts d'Arrée (Massif armoricain, France). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **292**, pp. 1497-1500.

GEORGET Y. (1986). - Nature et origine des granites peraluminieux à cordiérite et des roches associées. Exemples des granitoïdes du Massif armoricain (France), pétrologie et géochimie. Mémoires et Documents du Centre armoricain d'étude structurale des socles, n° 9, Rennes.

GÉRARD A., GRIVEAU P. (1972). - Interprétation quantitative en gravimétrie et magnétisme à partir de cartes transformées de gradient vertical. *Geophysical Prospecting*, **20**, n° 2, pp. 459-481.

GOGUEL J. (1972). - Tendances modernes dans l'interprétation géologique des données gravimétriques. *Bulletin du BRGM*, n° 5, section II, pp. 43-50.

GRAUCH J.S., CORDELL L. (1987). - Limitation of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, **52**, n° 1, pp. 118-121.

LEDRU P., BRUN J.-P. (1977). - Utilisation des fronts et des trajectoires de schistosité dans l'étude des relations entre tectonique et intrusion granitique : exemple du granite de Flamanville, Manche. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **285**, (D), pp. 1199-1202.