



*Apports des levés géophysiques aéroportés à la  
recherche et la protection des ressources en eau :  
Application à la région du Léon (Finistère)*

Etude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2002-PIR-222

Thomas E., Mougin B., Debégliat N., Perrin J.

Juin 2002  
BRGM/RP-51740-FR



Mots clés : Géophysique aéroportée, ressources en eau

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Thomas E., Mougin B., Debeglia N., Perrin J. (2002) – Apport des levés géophysiques aéroportés à la recherche et la protection des ressources en eau : Application à la région du Léon (Finistère). BRGM/RP-51740-FR, 63 p., 31 fig., 1 tabl.

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Cette opération a été réalisée par le BRGM Bretagne. Elle s'inscrit dans le cadr du programme de Service Public du BRGM (Fiche 2002PIR222), pour le compte du Conseil Régional de Bretagne.

Ce rapport présente le second volet des travaux de démonstration des valorisations possibles de la couverture géophysique aéroportée réalisée en 1998 dans le Massif armoricain. Cette étude a pour but essentiel de présenter les résultats obtenus dans le Léon, domaine granito-gneissique, tandis que le travail mené sur Ploërmel (Morbihan) (1<sup>er</sup> volet) concernait essentiellement des domaines métasédimentaires.

Le plan de ce travail suit celui adopté dans le premier volet qui définissait un protocole de traitement des données géophysiques et montrait que les données géophysiques étaient susceptibles de fournir un schéma structural « géophysique » cohérent susceptible de servir de guide à la prospection hydrogéologique (BRGM/RP-50583-FR).

Comme pour la région de Ploërmel, des traitements particuliers ont été appliqués afin d'extraire l'information la plus fine possible. En effet, les données magnétiques étant principalement influencées par les structures géologiques profondes et régionales, des traitements spécifiques sont indispensables pour isoler les structures locales et peu profondes pouvant présenter un intérêt hydrogéologique. Ces traitements (transformation en gradient vertical magnétique réduit au pôle et représentation en échelle logarithmique) conduisent à une nouvelle image qui révèle les structures magnétiques (failles ou dykes) les plus superficielles et permet d'établir un schéma structural magnétique.

Les cartes spectrométriques reflètent également la superposition d'effets locaux susceptibles de jaloner des accidents et des anomalies régionales de grande longueur d'onde. Ces dernières sont extraites par une opération de lissage et c'est à partir de cartes résiduelles que le schéma des discontinuités spectrométriques est dessiné.

Les discontinuités magnétiques et radiométriques ainsi obtenues sont reportées sur un document unique. Le schéma structural géophysique fait apparaître trois orientations structurales principales dans le Léon :

- (1) une famille, orientée N120-140, bien connue dans la région. C'est la direction des champs filoniens basiques dont le plus spectaculaire jalonne la faille « Kerforne » ;
- (2) une famille d'orientation N70-80. Elle correspond aux grands accidents crustaux tels que le cisaillement nord-armoricain et le linéament Porspoder-Guissény ;
- (3) une faille orientée N150-160, quasiment absente des cartes géologiques mais particulièrement bien mise en évidence par l'étude des linéaments naturels.

En ce qui concerne l'utilisation des données de géophysique aéroportée dans la localisation de discontinuités susceptibles de constituer des drains privilégiés, les résultats obtenus en considérant les données de magnétismes montrent que les forages à fort débit sont localisés à l'aplomb ou à proximité immédiate de discontinuités.

Les données du magnétisme aéroportée peuvent donc très largement concourir à l'établissement d'un schéma qui pourra guider les recherches en eaux souterraines.

Les données de la spectrométrie apportent une contribution moindre dans ce domaine. En revanche, elles pourront largement, à terme, être utilisées dans la détermination des domaines altérés susceptibles de constituer des réservoirs capacitifs et transitionnels vers le milieu fissuré plus profond.

## Sommaire

<b>Synthèse</b> .....	<b>3</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>5</b>
<b>Liste des illustrations</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Application des méthodes géophysiques aéroportées en hydrogéologie</b> .....	<b>9</b>
2.1. Magnétisme .....	9
2.2. Radiométrie .....	10
<b>3. Présentation de la région du Léon : données disponibles</b> .....	<b>12</b>
3.1. Localisation .....	12
3.2. Données géophysiques .....	12
3.3. MNT .....	14
3.4. Données géologiques.....	17
3.4.1. Contours géologiques au 1 / 50 000 et 1/80 000 numérisés .....	17
3.4.2. Failles .....	19
3.4.3. Discontinuités linéamentaires .....	20
3.4.4. Données sur l'altération .....	22
3.4.5. Données de forages .....	26
<b>4. Apport des traitements géophysiques combinés</b> .....	<b>27</b>
4.1. Analyse structurale des données géophysique .....	27
4.1.1. Analyse structurale manuelle .....	27
4.1.2. Analyse structurale automatique .....	27
4.2. Traitements du magnétisme .....	32
4.2.1. Anomalie du champ total .....	32
4.2.2. Gradient vertical réduit au pôle .....	33
4.3. Traitement de la spectrométrie .....	39
4.4 Utilisation de la spectrométrie dans l'individualisation des domaines altérés.....	49
4.4.1. Méthodologie .....	50
4.4.2. Résultats .....	51
4.5. Schéma structural combiné .....	52
<b>5. Validation : recherche de corrélations entre schéma structural géophysique et position de forages à fort débit</b> .....	<b>55</b>
<b>6. Conclusion</b> .....	<b>60</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>61</b>

## Liste des illustrations

### FIGURES

Figure 1 : Exemple d'un spectre typique de rayonnement gamma.....	13
Figure 2 : MNT au pas de 25m. ....	14
Figure 3 : Carte des pentes .....	16
Figure 4 : Les grands systèmes de failles de Bretagne occidentale .....	16
Figure 5 : Carte géologique du Finistère Nord.....	17
Figure 6 : Carte géologique simplifiée du Finistère Nord.....	18
Figure 7 : Carte des failles principales .....	20
Figure 8 : Linéaments naturels superposés à l'ombrage du MNT .....	21
Figure 9 : Modèle conceptuel des propriétés hydromécaniques en domaine de socle altéré (d'après BRGM R40519). ....	23
Figure 10 : Carte de l'épaisseur des altérites.....	25
Figure 11 : Répartition et profondeurs des forages .....	26
Figure 12 : Discontinuités élémentaires sur fond de gradient vertical réduit au pôle....	30
Figure 13 : Discontinuités "fractures" sur fond de gradient vertical réduit au pôle. ....	31
Figure 14 : Discontinuités "lignes" sur fond de gradient vertical réduit au pôle. ....	32
Figure 15 : Anomalie du champ magnétique total (nT).....	33
Figure 16 : Anomalie d'une sphère magnétique à 45 ° de latitude nord (à gauche) et au pôle magnétique nord (à droite) .....	34
Figure 17a : Gradient vertical réduit au pôle (nT / km) .....	35
Figure 17b : Gradient vertical réduit au pôle filtré des directions nord-sud et représenté avec une échelle de couleur logarithmique. En noir, superposition des principales discontinuités.....	37
Figure 17c : Discontinuités magnétiques et géologie.....	38
Figure 18a : Carte du comptage total (nano Gray / heure).....	39
Figure 18b : Carte « automatique » des discontinuités spectrométriques à partir de la carte du comptage total .....	40
Figure 18c : Carte du comptage total régional (nano Gray / heure).....	41
Figure 18d : Carte du comptage total résiduel (nano Gray / heure).....	42
Figure 18e : Discontinuités spectrométriques et géologie.....	43
Figure 19 : Carte des teneurs équivalentes (ppm) en uranium.....	44
Figure 20 : Carte régionale des teneurs équivalentes (ppm) en thorium.....	45
Figure 21 : Carte régionale des concentrations (%) en potassium .....	46
Figure 22 : Carte du rapport potassium sur thorium .....	47
Figure 23 : Carte des rapports uranium sur thorium .....	48
Figure 24 : Carte des rapports potassium sur uranium.....	49
Figure 25 : Proposition d'une carte du « potentiel » de présence d'altérites à l'aide de la radiométrie aéroportée.....	52
Figure 26 : Schéma structural géophysique combiné sur fond de MNT.....	53
Figure 27 : Répartition des forages et débits horaires.....	55
Figure 28 : Implantation des forages et géologie .....	56
Figure 29 : Forages (débits) par regroupements géologiques .....	57

Figure 30 : Répartition des forages par rapport aux discontinuités magnétiques .....58  
Figure 31 : Répartition des forages par rapport aux discontinuités spectrométriques ....59

## TABLEAUX

Tableau 1 : Susceptibilités magnétiques de quelques minéraux et roches (en SI, pour convertir en CGS, diviser par  $4\pi$ ) .....9

## 1. Introduction

De mi-juillet à fin octobre 1998, le BRGM a conduit une campagne de géophysique aéroportée dans le Massif armoricain (Bretagne, Pays de Loire et une partie de la Basse Normandie). Réalisée à la demande du Ministère de l'Industrie, cette opération avait pour but de doter la région de données géophysiques, compléments indispensables aux données géologiques.

Le choix d'une couverture géophysique aéroportée s'est porté sur le Massif armoricain car cette région connaît une expansion économique rapide, ce qui permettait de proposer aux décideurs et aménageurs de disposer de données fiables pour gérer durablement :

- l'exploitation maîtrisée de leurs ressources naturelles (eau, minerais et matériaux),
- l'occupation rationnelle du sol et du sous-sol (aménagements, lignes ferroviaires),
- les risques sanitaires (protection de la santé des populations vis à vis du risque radon).

Le présent rapport constitue le second volet des travaux de démonstration des valorisations possibles de données. Le premier volet concernait la mise au point de la méthode d'investigation et présentait les premiers résultats obtenus sur un secteur constitué principalement de métasédiments en Bretagne centrale (Ploërmel, Morbihan). Ce second volet présente les résultats obtenus en contexte principalement cristallin, sur une région couvrant le cinquième du département du Finistère (Léon). Outre un contexte lithologique différent de celui de la première étude, ce secteur présente lui aussi l'avantage d'avoir été plus largement couvert (lignes de vols espacées de 250m) lors des levés géophysiques.

## 2. Application des méthodes géophysiques aéroportées en hydrogéologie

### 2.1. MAGNETISME

Les données aéromagnétiques sont depuis longtemps utilisées en appui à la cartographie des structures géologiques et des accidents qui les affectent ou pour détecter des concentrations de minéraux magnétiques.

<b>Material</b>	<b>Susceptibility x 10<sup>3</sup> (SI)*</b>	<b>Limestones</b>	<b>0 - 3</b>
<b>Air</b>	<b>-0</b>	<b>Sandstones</b>	<b>0 - 20</b>
<b>Quartz</b>	<b>-0.01</b>	<b>Shales</b>	<b>0.01 - 15</b>
<b>Rock Salt</b>	<b>-0.01</b>	<b>Schist</b>	<b>0.3 - 3</b>
<b>Calcite</b>	<b>-0.001 - 0.01</b>	<b>Gneiss</b>	<b>0.1 - 25</b>
<b>Sphalerite</b>	<b>0.4</b>	<b>Slate</b>	<b>0 - 35</b>
<b>Pyrite</b>	<b>0.05 - 5</b>	<b>Granite</b>	<b>0 - 50</b>
<b>Hematite</b>	<b>0.5 - 35</b>	<b>Gabbro</b>	<b>1 - 90</b>
<b>Illmenite</b>	<b>300 - 3500</b>	<b>Basalt</b>	<b>0.2 - 175</b>
<b>Magnetite</b>	<b>1200 - 19,200</b>	<b>Peridotite</b>	<b>90 - 200</b>

**Tableau 1. Susceptibilités magnétiques de quelques minéraux et roches (en SI, pour convertir en CGS, diviser par  $4\pi$ )**

La prospection aéromagnétique a pour objet la mesure des variations du champ magnétique terrestre (exprimées en nanoTesla ou en Gamma) causées par des modifications des propriétés magnétiques des structures et formations géologiques de sub-surface. Le magnétisme d'une roche peut avoir été acquis lors de sa création ou des évolutions qu'elle a subi sous l'influence d'un champ magnétique ancien (aimantation rémanente) ou être induit par le champ actuel. Dans ce dernier cas, l'aimantation est dirigée selon le champ magnétique terrestre et lui est proportionnelle, le facteur de proportionnalité étant la susceptibilité magnétique. Susceptibilité (tableau 1) et aimantation sont fonction de la teneur des roches en minéraux magnétiques (principalement magnétite, ilménite et pyrrhotite). Les formations sédimentaires ont donc des susceptibilités très faibles comparées à celles des roches ignées ou métamorphiques.

Les applications hydrogéologiques des méthodes géophysiques aéroportées sont, à l'heure actuelle, encore peu nombreuses et concernent généralement l'exploration de réservoirs sédimentaires par méthode aéromagnétique.

## 2.2. RADIOMETRIE

La radiométrie spectrale permet d'évaluer, les contrastes de concentration des radioéléments (uranium, thorium, potassium) les plus fréquents dans les sols et les formations géologiques affleurantes. Ces contrastes sont ensuite interprétés en terme de lithologie du socle et de caractérisation des formations superficielles et de l'altération. La spectrométrie aéroportée de haute sensibilité est couramment utilisée en recherche minière et en appui à la cartographie géologique. En utilisation aéroportée la méthode est peu pénétrante : selon la densité des sols la contribution au signal mesuré du premier mètre dépasse souvent 90%.

Un levé de radiométrie aéroporté permet d'obtenir rapidement, par moyen aérien, une cartographie géochimique du sol. Comme les autres techniques de géochimie du sol, cette méthode donne accès à la composition des matériaux de surface. L'établissement de relations entre le chimisme de ces matériaux et la composition des formations sous-jacentes, fait appel à des données complémentaires que peuvent fournir, par exemple, des cartes géologiques ou des photos aériennes. Lorsque les différences lithologiques de surface conservent les variations pétrographiques des formations qu'elles recouvrent, la méthode apporte une aide directe à la cartographie géologique. Si, par contre les matériaux de surface sont des alluvions transportées, l'information radiométrique ne traduit plus que la nature de ces formations et les contours des unités géologiques sous-jacentes sont masqués.

### ***Radioactivité naturelle des roches (d'après le site de la société High-Sense : <http://www.high-sense.com/services/radiomet.htm>)***

Dans les roches ignées, l'uranium et le thorium sont majoritairement concentrés dans quelques minéraux accessoires comme le zircon, le sphène et l'apatite. Les autres minéraux fortement radioactifs, comme la monazite, l'allanite, l'uranite, la thorite et le pyrochlore sont exceptionnels et répartis de manière erratique. Les minéraux contenant de l'uranium et du thorium sont généralement associés à des intrusions acides, principalement les intrusions jeunes, beaucoup plus rarement à des roches basiques ou volcaniques. Les plus fortes concentrations se trouvent dans les pegmatites. Dans les roches sédimentaires, les plus fortes concentrations se rencontrent dans les argiles. La teneur en potassium augmente également avec l'acidité, le potassium étant concentré dans les micas et les feldspaths. Dans les roches sédimentaires, les concentrations sont variables, généralement plus fortes dans les argiles que dans les calcaires et les grès.

### ***Effets de l'altération et du métamorphisme***

Ils modifient fortement la teneur en radioéléments :

- Oxydation et lessivage de l'uranium des granites qui se déposent ensuite dans des formations sédimentaires éloignées, tandis que le thorium, qui n'a pas de forme soluble, se déplace peu, d'où une diminution du rapport U/Th.
- Transport du potassium par l'eau sous forme colloïdale et dépôt dans des sédiments argileux.
- Enrichissement en potassium des formations acides sous l'effet du métamorphisme et de l'altération.

- Concentration en éléments radioactifs dans certaines formations détritiques (concentration en minéraux lourds –enrichissement en thorium- , en micas ou en feldspaths –enrichissement en potassium-) et à certains stades d'arénisation.

En hydrogéologie, la radiométrie pourra donc être utilisée pour aider à compléter la cartographie géologique et à localiser les accidents.

## 3. Présentation de la région du Léon : Données disponibles

### 3.1. LOCALISATION

Le domaine couvert par cette étude est localisé en Bretagne occidentale, dans les limites de coordonnées suivantes :

X (Lambert 2 généralisé) : 72000 à 120000 mètres

Y (Lambert 2 généralisé) : 2390000 à 2430000 mètres

### 3.2. DONNEES GEOPHYSIQUES

Des données magnétiques et radiométriques aéroportées de haute sensibilité ont été acquises sur ce secteur lors du levé « Massif Armoricaïn » réalisé en 1998 pour le compte du Ministère de l'Economie, des Finances et de L'Industrie. L'acquisition et la compilation des mesures ont été réalisées par la compagnie Sander, sous la supervision du BRGM. Sur le secteur de Plabennec, les lignes de vol, orientées nord – sud ont été resserrées à 250 m d'espacement. Des traverses espacées de 10 km les recoupent perpendiculairement. Les mesures ont été effectuées avec une garde au sol moyenne de 120 m. Le positionnement a été réalisé par GPS différentiel complété par les enregistrements d'un baro-altimètre et d'un altimètre radar.

Le champ magnétique a été mesuré par un magnétomètre à pompage optique à vapeur de césium placé dans un rostre fixé à la queue de l'avion. L'effet magnétique de l'avion a été compensé dynamiquement. Les mesures aéroportées ont été ensuite corrigées de la variation diurne du champ magnétique grâce aux enregistrements des trois stations au sol de Carhaix, Rennes et Nantes. Les écarts aux points de croisement lignes – traverses ont été analysés et compensés. Enfin, un champ régional a été estimé par approximation de la composante de grande longueur d'onde (supérieures à 60 - 75 km) et soustrait du champ total afin d'obtenir une carte d'anomalie magnétique représentative des structures géologiques locales.

La radioactivité naturelle a été enregistrée avec un spectromètre gamma à 256 canaux, corrigée du bruit atmosphérique « radon », du bruit de fond, de l'effet Compton et de l'atténuation altimétrique. Le spectre du rayonnement gamma est enregistré, chaque seconde, sous la forme d'un histogramme à 256 canaux caractérisant le comptage relatif de chaque niveau d'énergie, de 0 à 3 MeV (figure 1). Pour la cartographie géologique, sont considérés les pics K40 (potassium), Bi214 (uranium) et Tl208 (thorium). Le potassium, l'uranium et le thorium sont, en effet, les trois radioéléments naturels les plus fréquents : K est un constituant majeur de nombreuses roches et un marqueur important des phénomènes d'altération. U et Th sont présents en traces dans de nombreuses formations. Le spectre est intégré sur les fenêtres spectrales caractéristiques correspondant à ces trois éléments et au comptage total. Les comptages intégrés sont ensuite convertis en concentration élémentaire (%), pour le potassium, et, en teneur équivalente (ppm) pour l'uranium et le thorium, en respectant les règles d'équilibre radioactif avec leurs isotopes fils. Le comptage total est exprimé en unité de débit de dose absorbé (nano Gray / heure).

Les teneurs équivalentes en uranium et thorium ne peuvent être obtenues que par l'intermédiaire des concentrations en Bi214 et Th232 et moyennant l'hypothèse que cette concentration est représentative de la totalité de l'uranium et du thorium, présents initialement. Or la chaîne de désintégration de l'uranium et du thorium produit des isotopes intermédiaires dont la dispersion peut fausser le calcul des teneurs équivalentes. Ainsi, dans la chaîne de l'U238 et immédiatement avant le Bi214, du gaz radon est émis et peut se diffuser dans l'atmosphère, ce qui conduit à sous estimer la teneur en uranium. L'importance de la diffusion du radon est fonction des variations de pression barométrique, de l'humidité ou des précipitations. Les variations de ces facteurs peuvent être à l'origine d'artefacts, qui ont cependant été pris en compte et corrigés lors de la phase de compensation du levé. Les teneurs équivalentes en uranium peuvent être à l'inverse localement surestimées si du radon est piégé dans des fonds de vallée ou du fait d'une inversion de température.

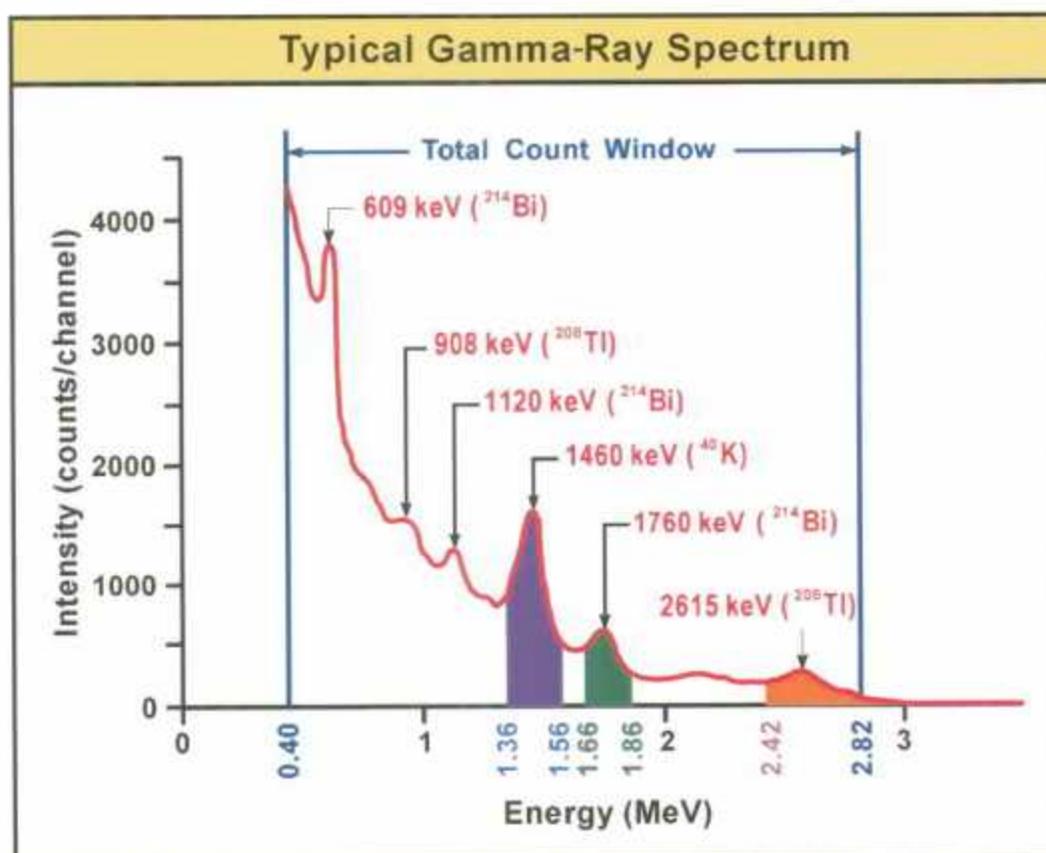


Figure 1 : Exemple d'un spectre typique de rayonnement gamma

Image extraite du site internet « Ressources Naturelles Canada » :

[http://gamma.gsc.nrcan.gc.ca/theory\\_e.htm](http://gamma.gsc.nrcan.gc.ca/theory_e.htm)

Les données magnétiques et radiométriques ont été interpolées aux nœuds d'une même grille de 125 \* 125 m de côté par la méthode du minimum de courbure, l'espacement de 250 m entre lignes de vol n'autorisant pas un échantillonnage plus fin. A noter que cette valeur du pas d'échantillonnage de la grille détermine l'incertitude maximale de la localisation des accidents et limites géophysiques interprétées.

### 3.3. MNT

Le **Modèle Numérique de Terrain** provient de la base de donnée de l'Institut Géographique National. Dans le jeu de données original, la taille du pixel est de 50m x 50m. Pour les besoins graphiques, les données peuvent être retravaillées (rééchantillonnage et krigeage) afin d'obtenir une taille de pixel de 25m x 25m (figure 2). Pour les besoins de cohérence avec les données issues de la géophysique aéroportée, le pas pourra être étendu et le pixel représenter 125m x 125m.

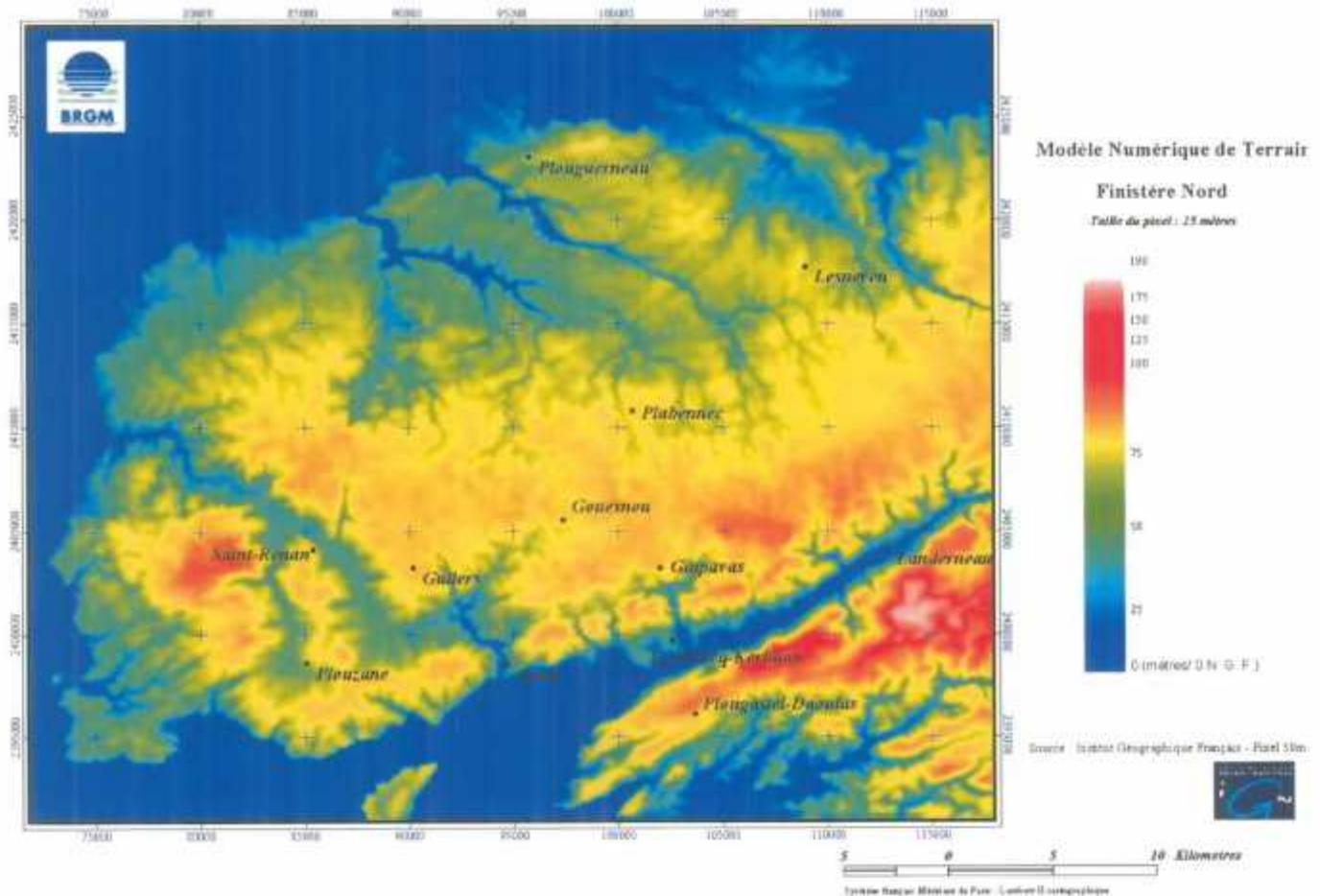


Figure 2 : MNT au pas de 25m

#### 1) Morphologie : Le Léon

Le Léon est défini comme une région s'étendant depuis la façade maritime atlantique à l'Ouest jusqu'aux alentours de Morlaix à l'Est. Au Nord, il est limité par la Manche où le littoral, souvent très découpé, ne montre que rarement de véritables falaises. Au sud, il est limité par la rade de Brest puis par la vallée de l'Elorn, très encaissée, localisée sur le système de failles de l'Elorn. Ces failles se poursuivent à l'est et viennent se greffer sur le cisaillement Nord-armoricain. Le Léon correspond principalement à un vaste plateau d'une altitude moyenne de 80-90m avec des domaines un peu plus élevés au Sud aux alentours des 100-120m correspondant à des pointements de roches résistantes. L'altitude moyenne de ce plateau s'abaisse très sensiblement du Sud vers le Nord ; les différents paliers correspondant majoritairement à des ruptures lithologiques. Cette

« surface » remarquable se poursuit vers l'Est après la baie de Morlaix et se raccorde parfaitement à la surface du Trégor d'une altitude moyenne de 80-90m. Au sud de l'Elorn, les altitudes sont un peu plus importantes puisqu'elles peuvent atteindre 175 – 180m. La morphologie, caractéristique de ce domaine, est liée vraisemblablement à la nature des roches présentes (Formation du Grès armoricain notamment), beaucoup plus résistantes à l'érosion et qui forment de véritables barres dans le paysage.

La forte dispersion des valeurs de la carte des pentes (figure 3) reflète ce schéma morphologique. Sur « le plateau léonard », les valeurs sont généralement faibles (d'où le nom de « plateau »), souvent inférieures à 2-3%. Il n'y a logiquement qu'aux abords des vallées incisées (Aber Benoit, Aber Wrac'h et Aber Ildut) que s'observent les pentes les plus fortes. Au Nord, le contact terre-mer se marque par une augmentation de la valeur moyenne des pentes mais ne présente pas de véritables falaises.

En revanche, le plateau est limité au Sud (ligne Guilers - Guipavas) par un brusque changement morphologique, avec une rupture très marquée et des pentes beaucoup plus fortes. Cette morphologie particulière est rattachée à l'histoire récente de ce domaine occidental du massif armoricain (Bonnet, 1998) avec des surrection différentielles sur des grands systèmes de failles tels que le cisaillement nord-armoricain et le système de l'Elorn au Sud ainsi que l'Escarpe nord-armoricain (système de failles sous-marines) au Nord (figure 4). Les hauts topographiques, dans un secteur Landerneau-Plougastel Daoulas – Sizun, sont représentés par des petits replats de faible superficie, généralement localisés sur des grès et quartzites paléozoïques. Les ruptures de pentes et les dénivelés les plus importants sont observés de part et d'autre de ces replats, qui pourraient constituer les reliques d'une ancienne surface continentale.

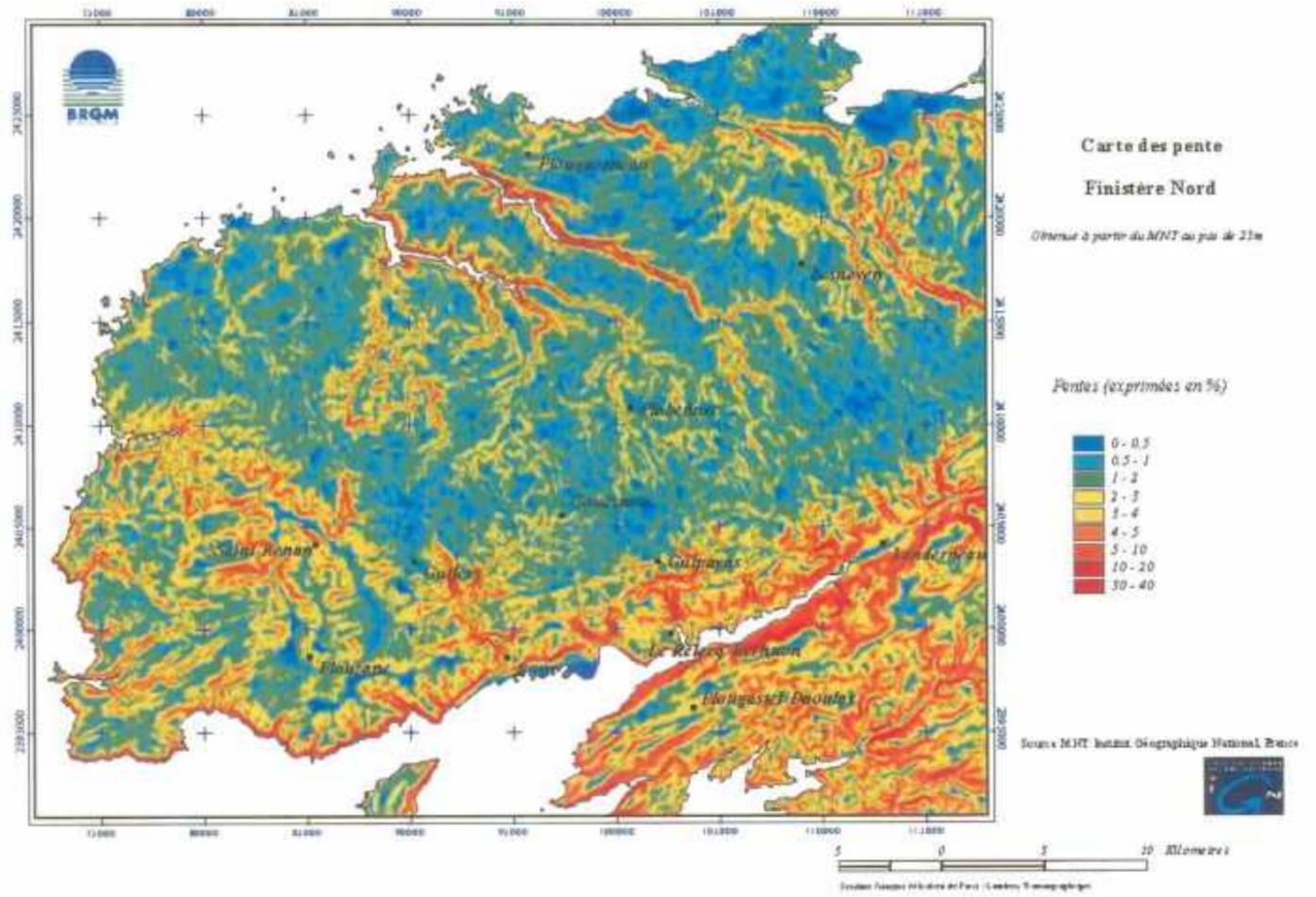


Figure 3 : Carte des pentes

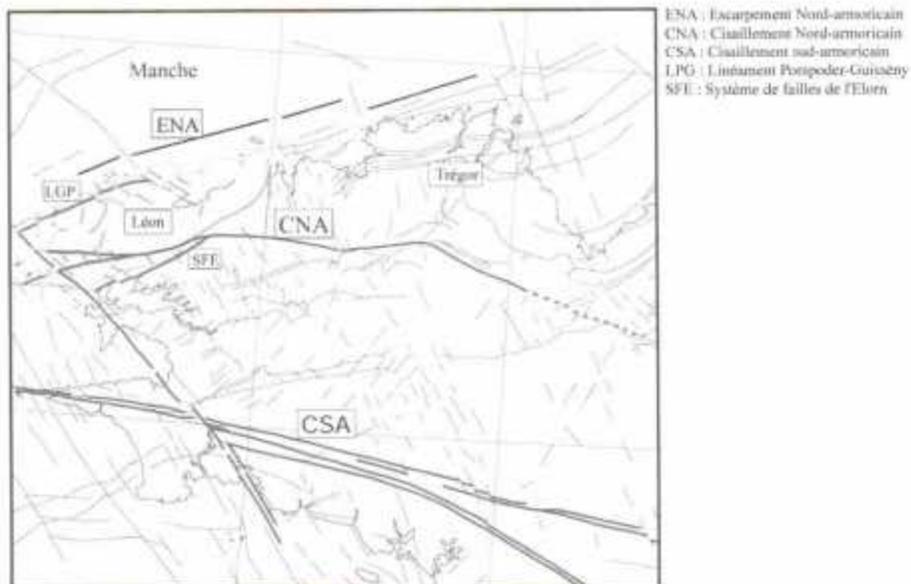


Figure 4 : Les grands systèmes de failles de Bretagne occidentale



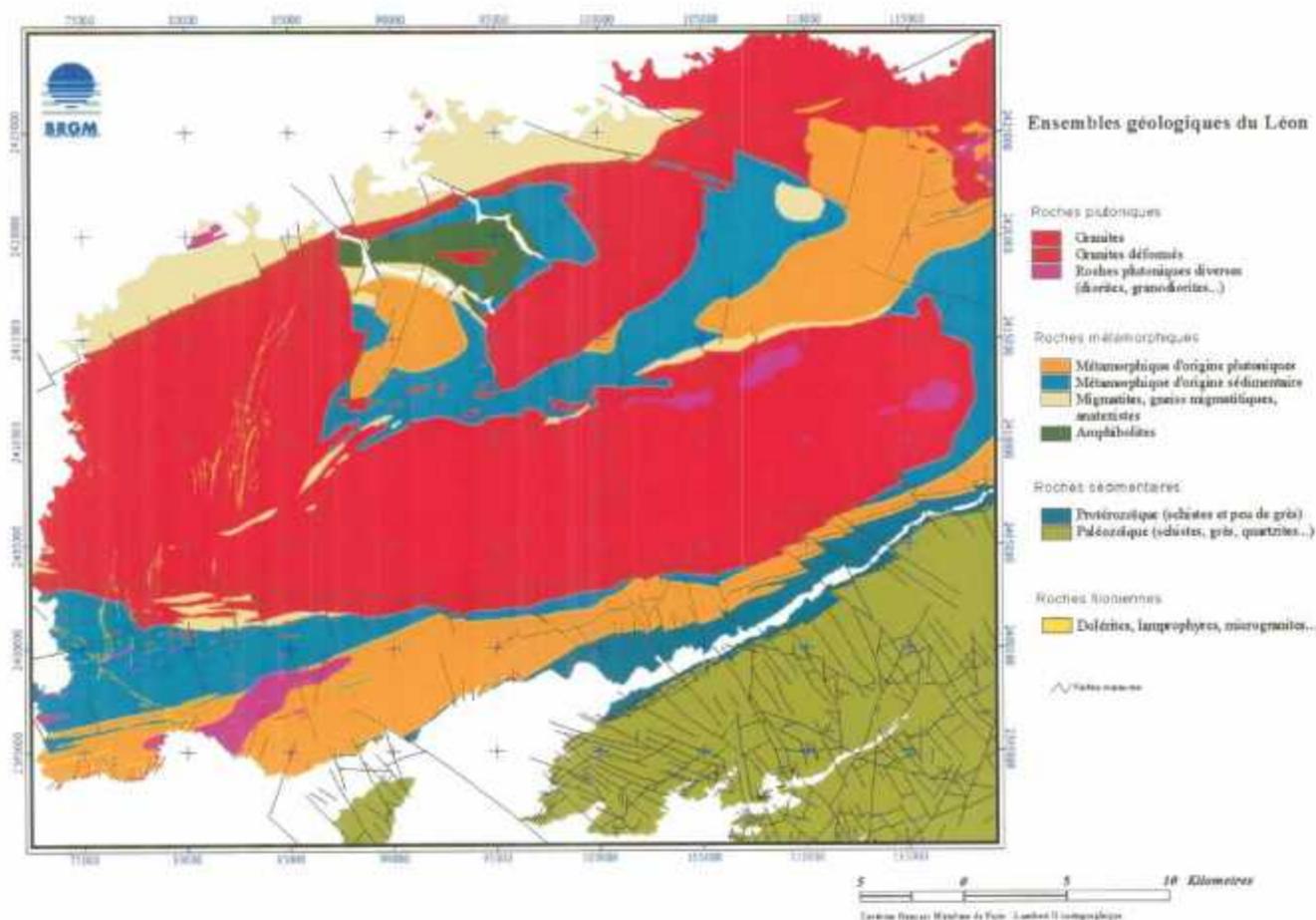


Figure 6 : Carte géologique simplifiée du Finistère Nord

- Les roches plutoniques :

Les complexes granitiques peuvent se subdiviser en deux ensembles, sur des critères d'âges et de compositions :

1- les complexes granitiques (monzogranites à feldspath alcalin (dominante potassique) à granodiorites) datés aux alentours de 330-340 Ma comme ceux de Saint-Renan--Kersaint, de Plounéour-Ménez ou de Plouaret.

2 - les complexes granitiques (monzogranites porphyroïdes) datés aux alentours de 290-300 Ma comme ceux du complexe de l'Aber-Ildut et de Brignogan-Plouescat.

La majorité de ces venues magmatiques sont à associer au fonctionnement de cisaillements hercyniens (Cisaillement Nord Armoricaïn et linéament Porspoder-Guissény). Par contre, la mise en place du granite de Brignogan, daté à  $292 \pm 15$  Ma, est postérieure au fonctionnement du cisaillement Porspoder-Guissény.

- les roches métamorphiques :

Le domaine du Léon est caractérisé par un nombre important de formations métamorphiques dérivant pour la plupart de formations sédimentaires protérozoïques. On signalera les plus importantes telles que les gneiss de Lesneven, les gneiss de Brest (bien qu'une partie d'entre-eux soient d'origine plutonique), les gneiss de Ploumoguer, les gneiss du Conquet, les paragneiss de l'Aber Wrac'h et les gneiss de la Penzée. Enfin, on signalera dans le centre-nord de la région étudiée, les amphibolites de Lannilis qui ont un comportement particulier vis à vis des levés aéroportés.

- les migmatites, les gneiss migmatitiques et les anatexites :

Les différentes roches ont été soumises au cours de leur histoire à des contraintes plus ou moins fortes de pression et de température. Pour certaines d'entre-elles, ces conditions ont conduit à la fusion partielle et à des transformations minéralogiques importantes. On peut citer comme exemple les deux ensembles les plus développés qui sont d'une part les migmatites de Landunvez au Nord, qui bordent la façade maritime et les migmatites de Plouarzel, d'autre part, qui jalonnent le flanc sud du Granite de St-Renan.

- les roches sédimentaires :

Les formations sédimentaires sont rares sur le plateau du Léon. Au Sud-Est du Léon, se localisent les schistes briovérien (*Protérozoïque à Cambrien*) de l'Elorn. Au Sud-Est de l'Elorn, les terrains géologiques sont constitués par les séries paléozoïques (schistes, grès, quartzites) dont l'âge va de l'Ordovicien inférieur au Dévonien sur le domaine étudié.

- les roches filoniennes :

Deux grands champs filoniens sont reconnus sur le plateau du Léon. Il s'agit des dolérites localisées sur la prolongation septentrionale du système Kerforne et du champ microgranitiques du Bas-Léon. Ces filons se mettent en place tardivement dans l'histoire du Léon, postérieurement à la grande phase tectonique (phase hercynienne) qui a donné naissance aux principaux granites présents dans la région. Des mesures géochronologiques par la méthode Rb/Sr sur roche totale, effectuées sur les microgranites, ont données un âge proche de 292 Ma. Des mesures effectuées sur les dolérites ont donné un âge proche de 200 Ma.

### 3.4.2. Failles

La carte des failles (figure 7) a été obtenue par digitalisation des failles reportées sur les coupures au 1/50 000 ainsi que sur les maquettes concernant des coupures encore non-publiées (Plouguerneau, Landerneau). La rosace calculée montre une certaine dispersion des valeurs mais deux familles sont beaucoup plus représentées que les autres :

- une famille N120°-140° très développée sur tout le Massif armoricain. Les filons doléritiques tardifs sont associés à cette direction. Cette phase de fracturation et d'injection filonienne est généralement rapportée aux prémices de l'ouverture de l'Atlantique, aux alentours de 200Ma,
- une famille N60° – 70° correspond principalement aux tronçons de deux accidents majeurs : le cisaillement Nord-armoricain au Sud et le « linéament » Porspoder-Guissény au voisinage du littoral, au Nord. Le fonctionnement de ces deux grands accidents crustaux est à l'origine de la mise en place des grands batholites observés dans cette région. Le cisaillement Nord-armoricain a fonctionné de façon dextre et a permis la mise en place des granites de St-Renan et de Kersaint. L'accident linéamentaire de Porspoder-Guissény présente un mouvement senestre. Il est à l'origine de la mise en place des granites de l'Aber Ildut, de Ploudalmézeau et de Kernilis. Au vu de la morphologie actuelle, et selon des études récentes (Chauris *et al.*, 1994 ; Bonnet, 1998 ; Thomas *et al.*, in prep), il semble que ces accidents aient été réutilisés par une tectonique récente (depuis le Pléistocène) vraisemblablement liée à la compression alpine.

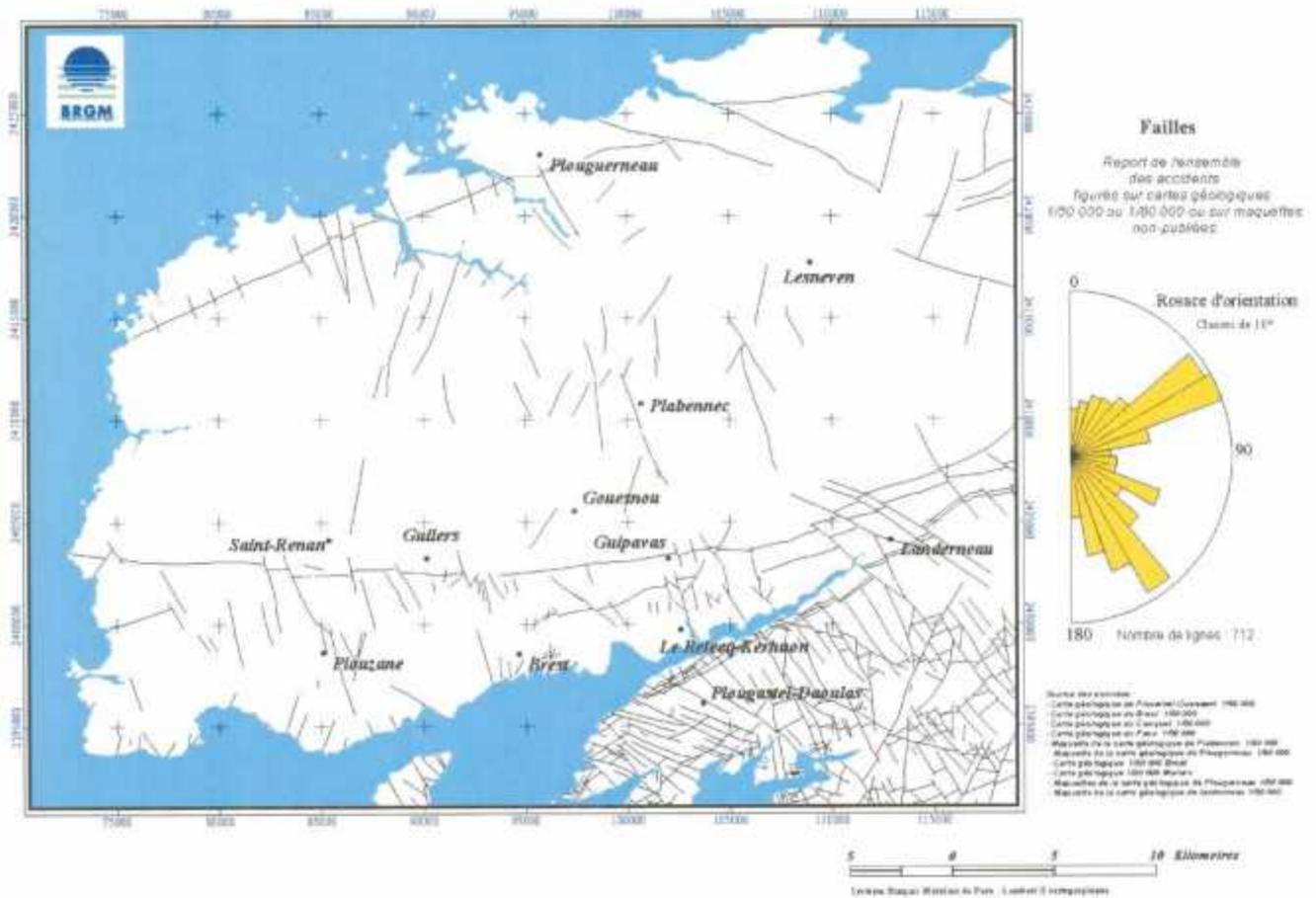
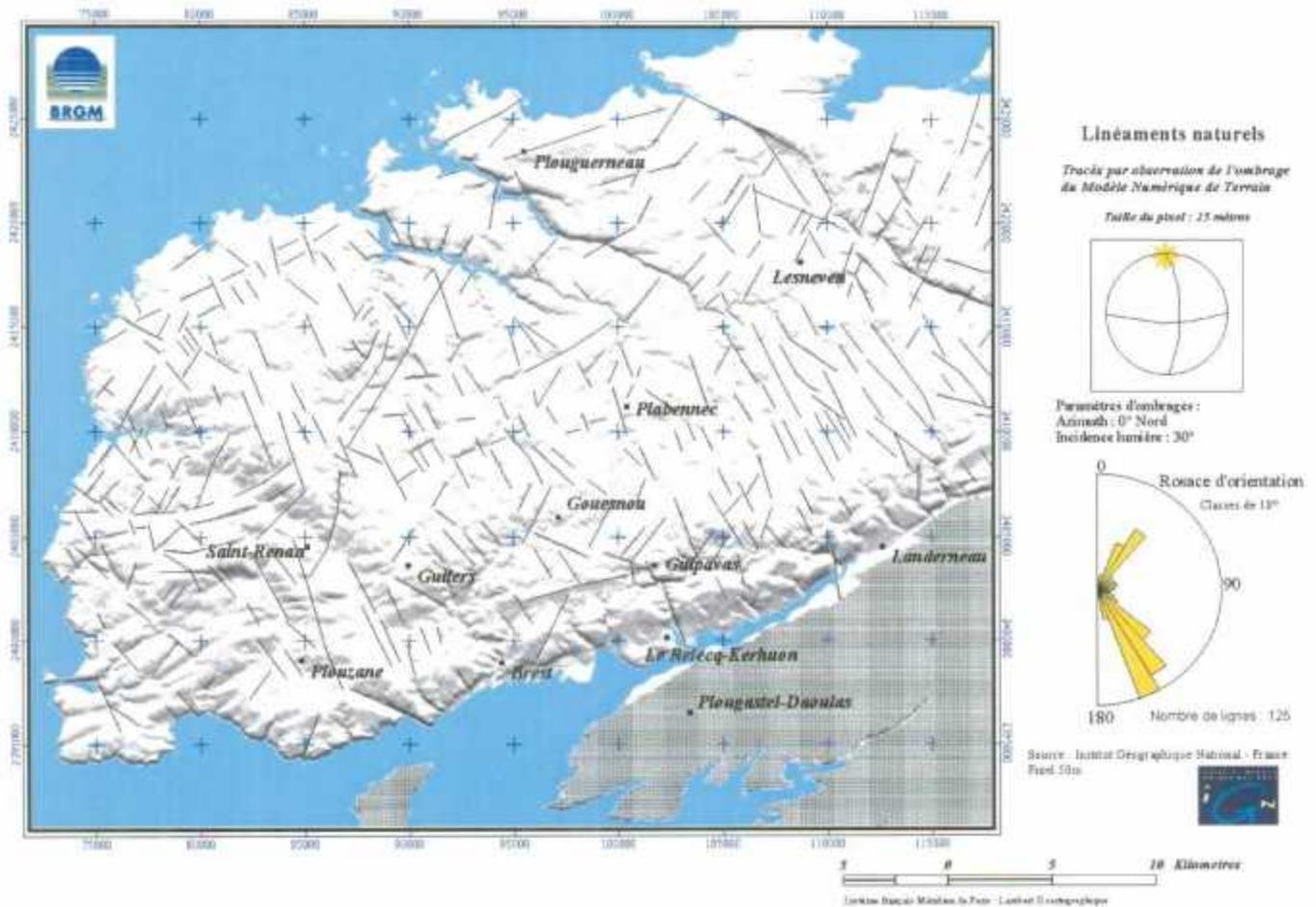


Figure 7 : Carte des failles principales

### 3.4.3. Discontinuités linéamentaires

Les linéaments naturels ont été tracés « manuellement » à partir de l'observation de l'ombrage du modèle numérique de terrain au pas de 25m. On a considéré une source d'éclairage au Nord et une incidence de lumière de 30°. Pour une meilleure qualité graphique, l'image obtenue a été artificiellement surexposée en luminosité afin de faire ressortir correctement les linéaments tracés (figure 8)



**Figure 8 : Linéaments naturels superposés à l'ombrage du MNT**

Pour cette étude, l'investigation s'est limitée au plateau du Léon. Deux familles de linéaments se distinguent clairement. La rosace de fréquence montre une famille orientée N150°-N160° et une famille orientée N30°-N40°. Ce sont des directions structurales bien connues dans l'ensemble du Massif armoricain mais les directions structurales du Léon, comme l'indique la rosace de direction des failles, fluctuent plutôt aux alentours de N120°-140°. Il existe donc une famille de discontinuités subméridiennes dont la représentation géologique est largement méconnue et vraisemblablement sous-estimée.

On note également que certaines limites lithologiques sont particulièrement bien marquées. Elle correspondent principalement aux limites du complexe granitique de l'Aber-Ildut avec son encaissant gneissique et dans une moindre mesure, aux limites du complexe granitique St-Renan – Kersaint avec son encaissant métasédimentaire et métamorphique.

#### 3.4.4. Données sur l'altération

Les formations d'altération dérivent, par modifications *in situ* des propriétés physiques et chimiques, de roches mères (méta)sédimentaires ou plutoniques sous l'action principale des eaux météoriques. Localement, on peut être amené à différencier géochimiquement des altérations issues de l'action et de la circulation de fluides ayant une température moyenne ou haute d'origine endogène (i.e. profonde).

Si dans les processus supergènes (qui se déroulent en surface) les climats chauds et humides du Tertiaire<sup>1</sup> ont pu être d'excellents catalyseurs des transformations physico-chimiques, engendrant, sur tout le Massif armoricain, de véritables profils latéritiques à kaolinite, parfois épais (40m en moyenne dans la région de Scaër dans le Finistère sud, 20 à 30m dans les zones effondrées à l'ouest de Rennes) que la position altimétrique de la surface continentale par rapport au niveau marin relatif<sup>2</sup> et, à une échelle régionale, l'absence de pentes fortes<sup>3</sup> ont pu conditionner très largement le développement ou la destruction des profils d'altération, peut-être même sous des climats dits "hydrolysants". Des lambeaux de surface continentale subsistent peut-être très localement sur la feuille Plouarzel-Ouessant et peuvent être repérés par des formations silicifiées, d'origine pédologique, en dalles ou le plus souvent en blocs épars sur des points hauts. L'apparition de ces formations marque le très net ralentissement, voire l'arrêt du fonctionnement du profil d'altération, consécutivement à des changements climatiques et une variation de l'altitude moyenne de la surface continentale. Elles sont donc les témoins d'une histoire postérieure à la latérisation et peuvent constituer un repère stratigraphique dans les séries azoïques.

A côté de ces transformations supergènes, vraisemblablement tertiaires (Anté Eocène supérieur, âge communément admis pour les silcrètes armoricaine), il est probable que d'autres périodes d'altération aient pu intervenir, postérieurement au Tertiaire, éventuellement sous les climats tempérés du Plio-Quaternaire<sup>4</sup>. Ces altérations dites "ménagées"<sup>5</sup> ont conduit à la formation de roches meubles caractérisées principalement (car récentes) par la très faible représentativité de la kaolinite. Il n'est pas nécessaire ici de distinguer altérations "ménagées" de celles marquant la base d'un profil d'altération "classique" (ce qui ne peut se faire au demeurant que sur la minéralogie des argiles); il s'agit en réalité du même phénomène, la cinétique de l'altération récente étant sans doute réduite par rapport à celle de l'altération tertiaire

Schématiquement, sur le Massif armoricain, un profil d'altération complet se décrit comme la superposition de trois ensembles à limites verticales graduelles. De la base au sommet, on distingue ainsi (1) le domaine fissuré, (2) les isaltérites et (3) les allotérites. Faisant partie de ce profil mais très rarement conservées, on peut associer les formations cuirassées sommitales. Un schéma conceptuel de cette organisation est présenté en figure 9.

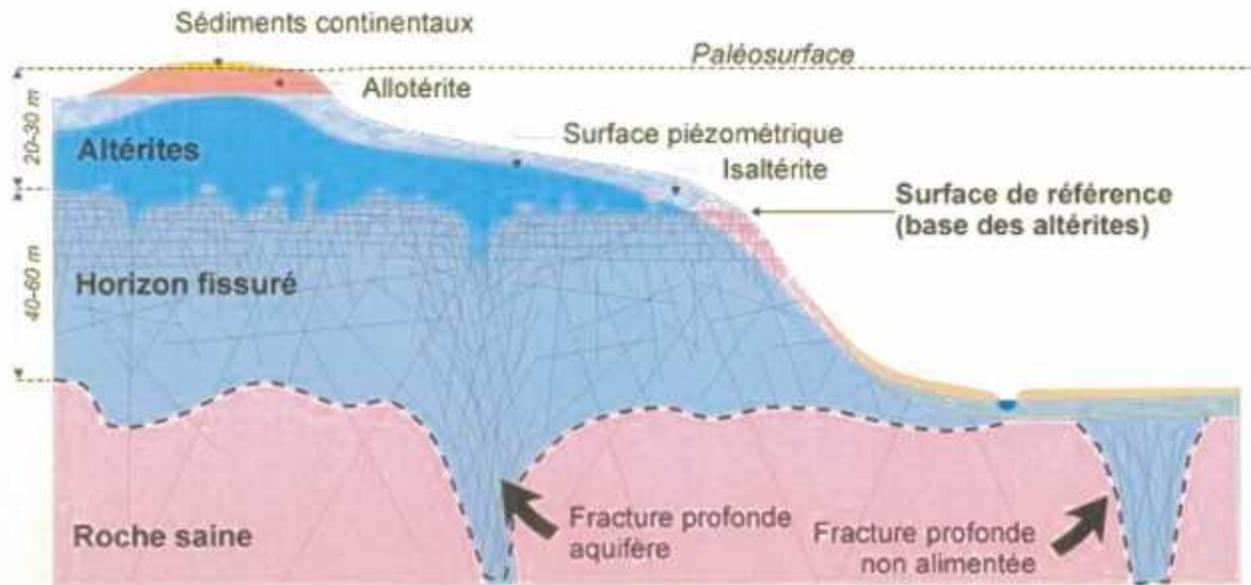
<sup>1</sup> Durand, 1960; Estéoule-Choux, 1967; Ollivier-Pierre, 1980)

<sup>2</sup> Wyns, 1991a, 1996b ; Quesnel, 1996, Thomas, 1999

<sup>3</sup> Wyns et Guillocheau, 1999

<sup>4</sup> Estéoule-Choux, 1967, Estéoule-Choux, 1968b

<sup>5</sup> Estéoule-Choux, 1967



**Figure 9 : Modèle conceptuel des propriétés hydromécaniques en domaine de socle altéré (d'après BRGM R40519)**

**1 - Zone fissurée.** Au-dessus de la roche-mère, s'individualise le domaine fissuré. A l'échelle locale, son épaisseur est variable : moins d'une dizaine de mètres localement à plus de 40m sur une même lithologie. Le domaine fissuré est caractérisé par une fracturation importante qui décroît en profondeur et qui provient de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes produites par les changements de phases des minéraux (hydratation des ferro-magnésiens avec augmentation de volume, oxydation des sulfures...). Cette zone fissurée est particulièrement bien mise en évidence dans les domaines à roches plutoniques grenues (cette fissuration est horizontale et donc facile à voir dans les roches isotropes ou semi-isotropes) telles que les granites de Kernilis, Ploudalmézeau, St-Renan. Elle est en revanche assez difficile à caractériser dans les domaines granitiques anisotropes (granite de Kersaint, Complexe de l'Aber Ildut) ainsi que dans les rares domaines métasédimentaires (Briovérien), notamment en raison de la fragmentation importante de la zone généralement observable (moins de 10m le plus souvent, absence de carrières...).

**2 - Isaltérites.** Les isaltérites sont des roches meubles où la texture originelle de la roche et les relations spatiales entre les minéraux sont préservées. En théorie, lors de l'altération, les minéraux sont remplacés par des minéraux secondaires ou par des pores qui possèdent la forme du minéral primaire remplacé. Les relations spatiales entre minéraux préexistants et le volume de la roche sont maintenues. Il s'avère cependant que dans le détail, la conservation du volume d'origine n'est pas toujours respectée. L'apparition de néosilicates tels que ceux du groupe des montmorillonites ou de celui des vermiculites introduit des perturbations dans l'assemblage minéralogique puisque ces minéraux "gonflent" ou se "contractent" en fonction du degré d'hydratation du profil. En contexte schisteux ou assimilé, les isaltérites sont représentées par des formations argilo-silteuses poreuses mais faiblement perméables. En contexte granitique (ou assimilé), il s'agit généralement d'arènes sableuses beaucoup plus perméables.

**3 - Allotérites.** Le terme d'allotérites est employé pour désigner les horizons altérés où les structures de la roche mère (stratification, litages schistosité ou foliation...) ne sont plus visibles. Certains minéraux, stables dans les parties profondes du profil d'altération ne le sont pas dans les parties les plus superficielles. Ces minéraux argileux sont alors remplacés par des minéraux argileux plus stables, des oxydes et hydroxydes. Ceci s'accompagne généralement d'une disparition progressive de la structure de la roche originelle (i.e des isaltérites sous-jacentes) et d'une modification (perte) de volume. En contexte schisteux ou micaschisteux, ces allotérites sont représentées par des argiles imperméables ; en contexte granitique, il s'agit d'une arène argileuse à faible perméabilité et faible porosité efficace.

Sur le secteur étudié, les profils sont tronqués. On n'observe jamais les parties sommitales du profil d'altération. Les cuirasses et les allotérites ont ainsi été complètement décapées par l'érosion. A des degrés variables, et en fonction de la lithologie, seules sont encore préservées les isaltérites. Depuis 1998, plusieurs campagnes de recherche sur le Léon, et plus précisément dans la région de Plabennec, ont permis l'acquisition d'un nombre important de points de contact entre les altérites et le domaine fissuré sous-jacent. Ces données ont été complétées par l'analyse des données de sondages regroupées en BSS (Banque de données du Sous-Sol). Ainsi, par interpolation des points, on obtient une carte du mur des altérites. Si l'on soustrait la carte obtenue au MNT, on acquiert une carte de l'épaisseur et de la répartition des altérites.

Sur le secteur étudié (figure 10), on montre que toutes les formations sont concernées. L'épaisseur des altérites est relativement uniforme sur le plateau du Léon, souvent inférieure à une quinzaine de mètres. Trois zones apparaissent plus « anormales ». Elles sont localisées à l'Ouest de Brest, sur les métasédiments paléozoïques au Sud de l'Elorn et au Nord-Ouest de Lesneven. Cette disposition, encore mal documentée, pourrait provenir soit de la nature des terrains, soit d'une préservation différentielle dans de petits grabens. Elle pourrait encore être liée à la présence de fractures, drains privilégiés pour les eaux météoriques, qui ont pu favoriser une altération beaucoup plus profonde mais généralement limitée spatialement.

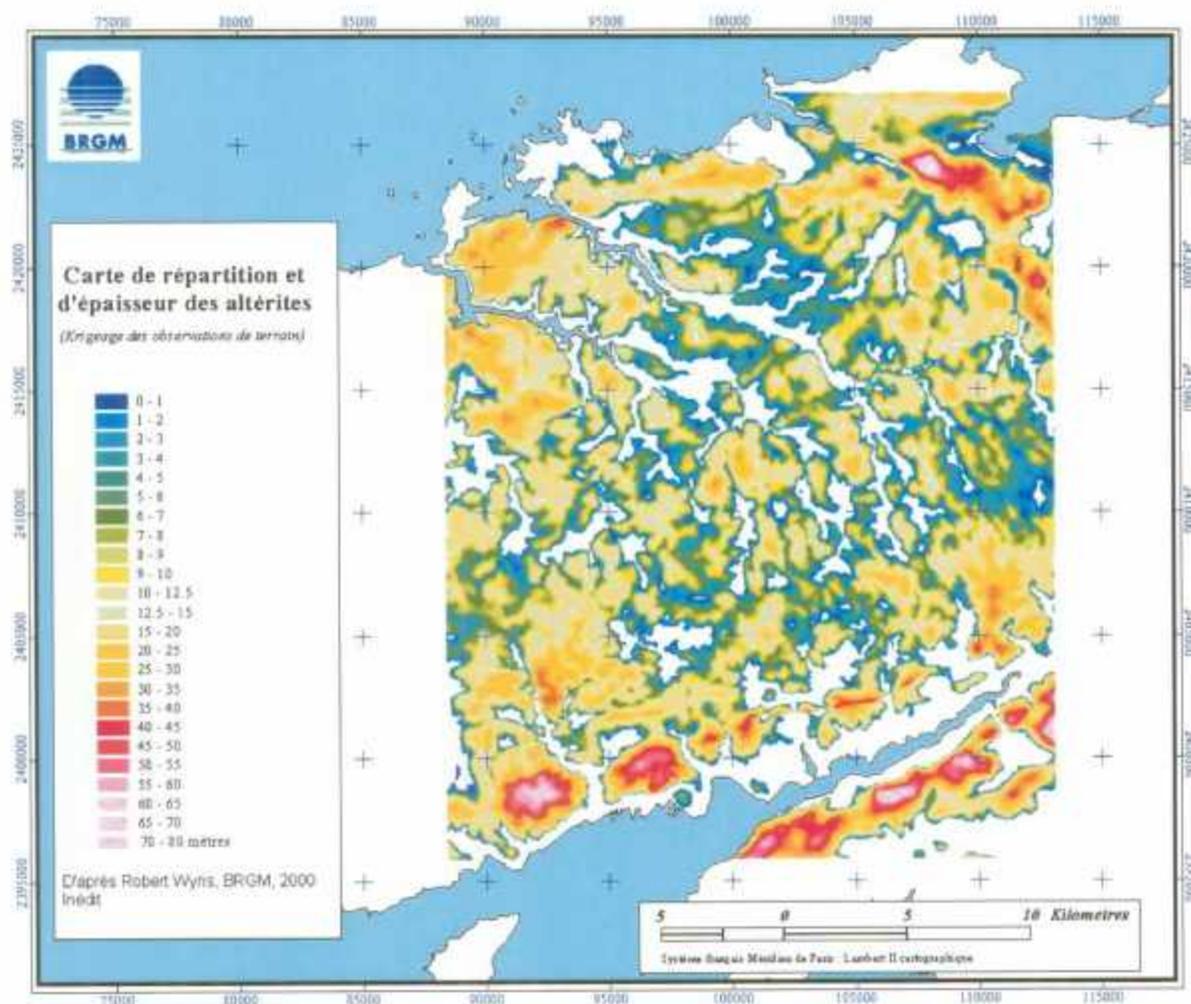
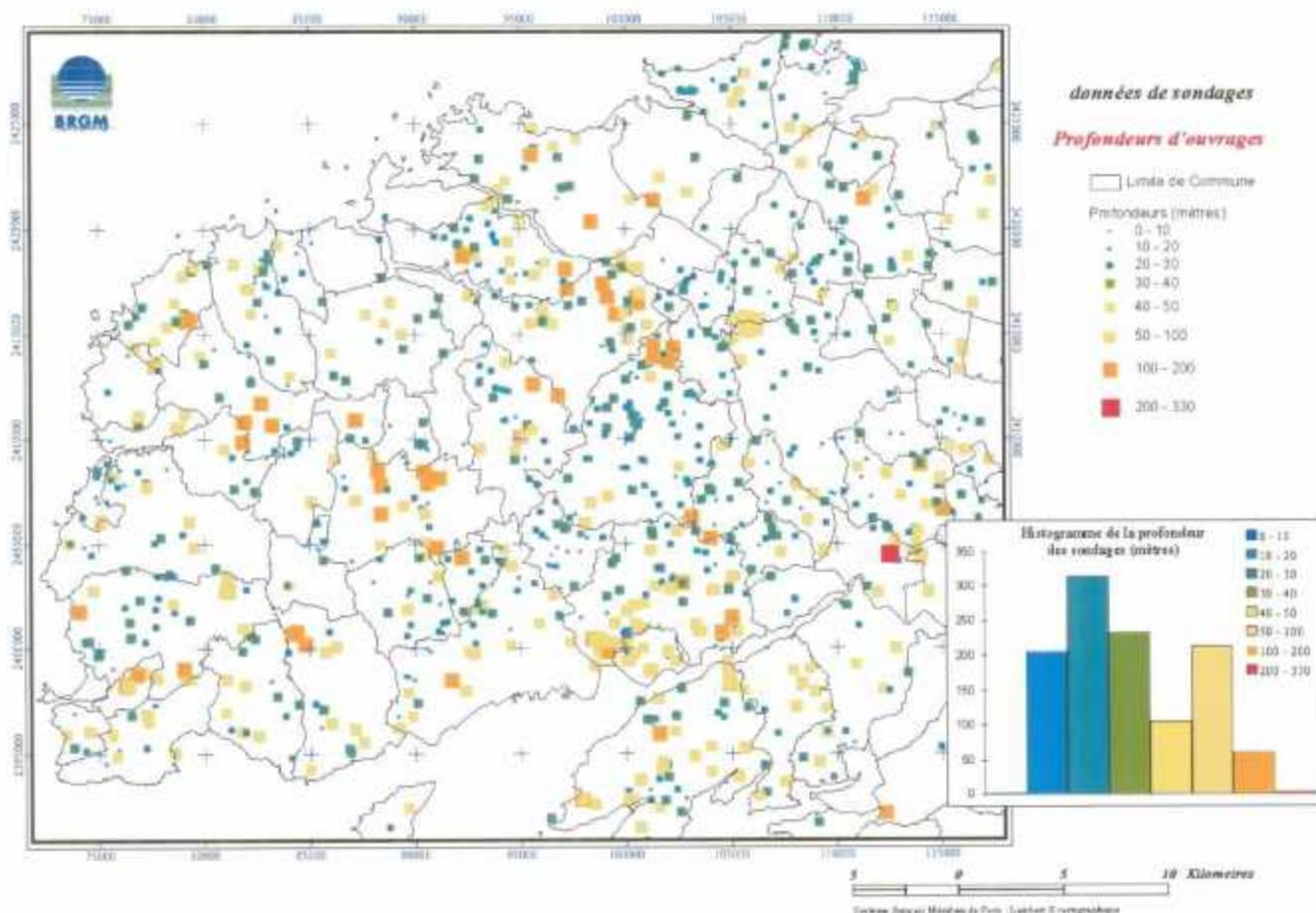


Figure 10 : Carte de l'épaisseur des altérites

### 3.4.5. Données de forages



**Figure 11 : Répartition et profondeurs des forages**

Les données de forages proviennent de la banque du Sous-Sol (BSS), sans cesse actualisée. A l'heure de l'étude, sur la zone renseignée, 1172 sondages sont renseignés. Dans la base de données, pour chaque forage sont répertoriés entre autres, la profondeur de l'ouvrage ainsi que les débits horaires.

Sur la zone concernée, les forages sont bien répartis spatialement. Ce sont généralement des forages peu profonds puisque 60% d'entre-eux ont une profondeur inférieure à une cinquantaine de mètres et seul un forage dépasse une profondeur de 300m. Ceci pose un problème puisque les levés aéromagnétiques sont susceptibles de mettre en évidence des discontinuités très profondes (plusieurs centaines de mètres) et non affleurantes qu'il sera difficile de croiser avec des données hydrogéologiques issues de la base de données. En revanche, les données issues de la spectrométrie, concernant un horizon superficiel par définition, devraient être plus favorables.

## **4. Apport des traitements géophysiques combinés**

### **4.1. ANALYSE STRUCTURALE DES DONNEES GEOPHYSIQUE**

#### **4.1.1. Analyse structurale manuelle**

L'analyse structurale des données géophysiques peut être réalisée manuellement, comme cela a été fait lors du test réalisé sur le secteur de Ploërmel (rapport BRGM/RP-50583). Les discontinuités sont alors digitalisées à partir d'une ou de plusieurs images géophysiques adaptées, cartes de gradients, de résiduelles ou représentation ombrée. Une interprétation manuelle similaire a été réalisée sur le secteur de Plabennec, à partir des données magnétiques et spectrométriques, à la maille de 125\*125 m. En magnétisme, cette analyse est basée sur des grilles du gradient vertical réduit au pôle, filtré des directions des lignes de vol N-S et représenté avec une échelle de couleur logarithmique. Ce mode de traitement a, en effet, l'avantage de faire ressortir les anomalies de faible amplitude et d'origine superficielle. En spectrométrie, l'analyse a principalement porté sur les anomalies de comptage total, mais les autres données, teneurs équivalentes en uranium et en thorium et concentrations en potassium ont été également utilisées.

L'interprétation manuelle présente l'inconvénient d'être subjective et fastidieuse dès que les surfaces à traiter sont importantes. C'est pourquoi une méthode d'interprétation automatique est actuellement en cours d'élaboration dans le cadre du projet de recherche et développement du BRGM, (fiche programme 02GEOR08 : "Méthodes Géophysiques au service de la cartographie numérique et 3D"). Quoique les algorithmes en cours de développement ne soient pas encore totalement finalisés, l'avancement du projet de recherche a permis de réaliser des tests sur les données d'anomalies magnétiques et de comptage total du secteur de Plabennec.

Ces méthodes, exposées dans les paragraphes suivants, en sont encore au stade du développement. Nous montrerons quelques résultats concernant les données spectrométriques mais nous utiliserons la méthode manuelle, comme cela avait été fait dans le secteur de Ploërmel. En revanche, elles seront largement développées et utilisées dans le cadre du programme SILURES.

#### **4.1.2. Analyse structurale automatique**

Le module d'analyse structurale automatique des données géophysiques est destiné à l'extraction de discontinuités de type "lignes" brisées constituées de segments rectilignes jointifs. Cette analyse est basée sur l'interprétation automatique des gradients horizontaux des données à interpréter, magnétisme, spectrométrie, MNT (Castaing, Debeglia, 1992). Ces gradients peuvent être calculés par convolution fréquentielle en utilisant différents logiciels disponibles au BRGM.

#### 4.1.2.1 Etapes du traitement

##### **Etape 1. Algorithmes d'extraction des discontinuités élémentaires**

Des deux gradients horizontaux, selon x, et selon y, on déduit le module du gradient horizontal et sa direction. L'analyse du module du gradient horizontal, par une méthode adaptée de Blakely et Simpson (1986), permet de localiser des discontinuités élémentaires locales, correspondant *aux maxima* de ce gradient. L'importance de ces discontinuités est fonction de l'amplitude locale du gradient.

Cette méthode d'analyse des gradients présente plusieurs particularités intéressantes :

- Elle repose sur la signification physique des gradients horizontaux gravimétriques et magnétiques. Ces derniers présentent des *maxima* au niveau des zones de contacts entre structures de densité ou d'aimantation différente, contacts lithologiques, failles. Cette localisation est d'autant plus précise que ces contacts sont verticaux et superficiels.
- Les maxima, centres des segments représentant les discontinuités, sont localisés avec précision dans la maille de calcul et non pas affectés au centre de la maille, comme on le fait en traitement d'image, ce qui offre l'avantage d'une meilleure précision et d'une plus grande continuité entre les discontinuités élémentaires.
- L'orientation du segment est déduite de la direction du gradient horizontal local et généralement interpolées en fonction de la position exacte dans la maille, sauf lorsqu'il y a une grande variabilité de direction (bruit, extrémité de discontinuité, interférence entre plusieurs structures ou discontinuités)

##### **Etape 2a. Algorithmes de regroupements des discontinuités élémentaires en discontinuités "fractures"**

Les discontinuités élémentaires sont regroupées en segments moyens rectilignes, supposés être représentatifs de fractures. Cette opération est réalisée grâce à un algorithme de suivi obéissant aux règles suivantes :

- On part d'une discontinuité quelconque, d1 ;
- On cherche une discontinuité d2 proche de d1 selon un critère défini par un seuil angulaire et 2 seuils de distance (selon la direction moyenne du groupe de discontinuité et perpendiculairement) ;
- d1 et d2 sont regroupées en un seul segment moyen rectiligne qui remplace d1, d2 est éliminée. La méthode de regroupement fait intervenir chaque segment avec un poids proportionnel à la longueur du segment ;
- La procédure reprend avec une discontinuité élémentaire de moins ;
- Lorsqu'il n'y a plus de regroupement possible, la procédure s'arrête.

Les paramètres, critères d'angle et de distance pour les regroupements, sont réglables.

### ***Etape 2b. Algorithmes de traitements des discontinuités "fractures"***

Les fractures de longueur inférieure à un seuil donné sont éliminées. En cas d'intersection, la discontinuité la plus courte est arrêtée sur la plus longue, la portion de cette discontinuité conservée étant la plus étendue.

Les deux précédentes étapes de créations des discontinuités de fractures sont optionnelles et il est possible de constituer directement des lignes de discontinuités à partir des discontinuités élémentaires. Cependant, le regroupement en fractures, en permettant une première concentration de la discontinuité, facilite généralement les traitements ultérieurs.

### ***Etape 3a. Algorithmes de regroupements des discontinuités "fractures" en "lignes"***

Les discontinuités "fractures" sont regroupées en "lignes" brisées constituées de segments rectilignes. Cette opération est réalisée grâce à un algorithme de suivi obéissant aux règles suivantes :

- On part d'une "fracture" quelconque, fl,
- On cherche les "fractures", les plus proches des extrémités de fl. Si des "fractures" proches, selon un nouveau critère défini par un seuil angulaire et un seuil de distance, sont trouvées, on initialise une nouvelle ligne,
- On construit ensuite la ligne, de proche en proche, de part et d'autre du segment initial, fl. Les segments utilisés sont extraits de la procédure,
- La procédure reprend par la création d'une nouvelle ligne à partir des segments restant,
- Lorsqu'il n'y a plus de regroupement possible, la procédure s'arrête.

### ***Etape 3b. Algorithmes de traitements des "lignes"***

Les lignes de longueur inférieure à un seuil donné sont éliminées. En cas d'intersection, la ligne la plus courte est interrompue au niveau de l'intersection.

### ***Sortie finale des résultats***

En sortie, les données concernant les "lignes" de discontinuités sont stockées dans deux fichiers, d'extension .mif et .mid, au format d'import de MAPINFO. Le fichier .mid contient pour chaque ligne les attributs suivants :

- indice de la ligne,
- nombre de points de la ligne,
- longueur de la ligne,
- orientation globale calculée entre les deux points extrêmes de la ligne,
- orientation moyenne pondérée par la longueur de chaque segment constituant la ligne,
- écart-type des directions des segments,
- gradient moyen le long de la ligne.

Il est donc possible de faire ensuite des sélections sur ces attributs ce qui permettra d'extraire les discontinuités présentant des caractéristiques particulières :

- sélection sur les orientations ou les longueurs,
- discontinuités rectilignes, caractérisées par un faible écart-type des directions,
- discontinuités majeures, les plus longues et correspondant à un fort gradient horizontal, par exemple,
- etc.

#### 4.1.2.2. Test d'analyse structurale automatique

Ce test a été réalisé sur des données aéromagnétiques interpolées à la maille de 125 \* 125 \* localisées dans le secteur de Ploërmel.

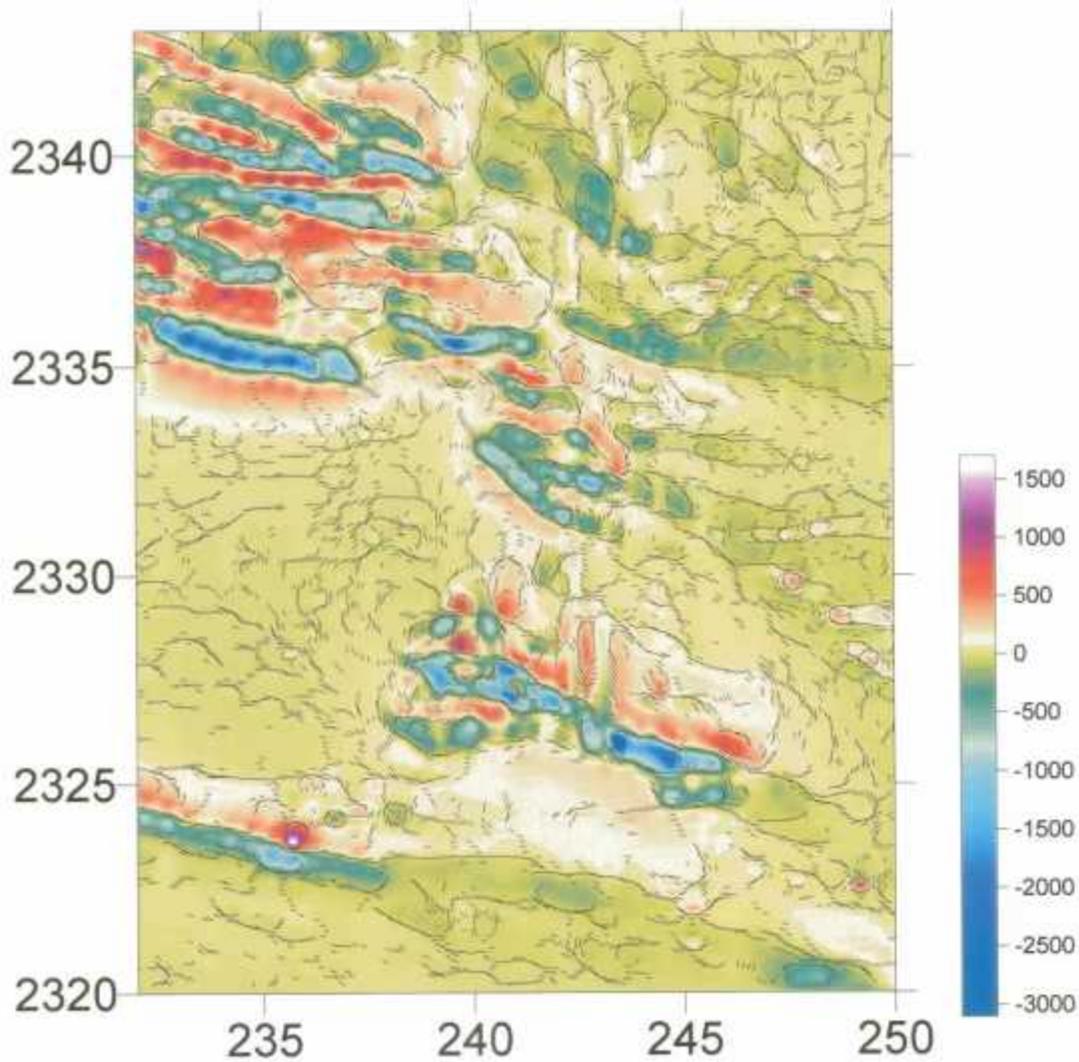
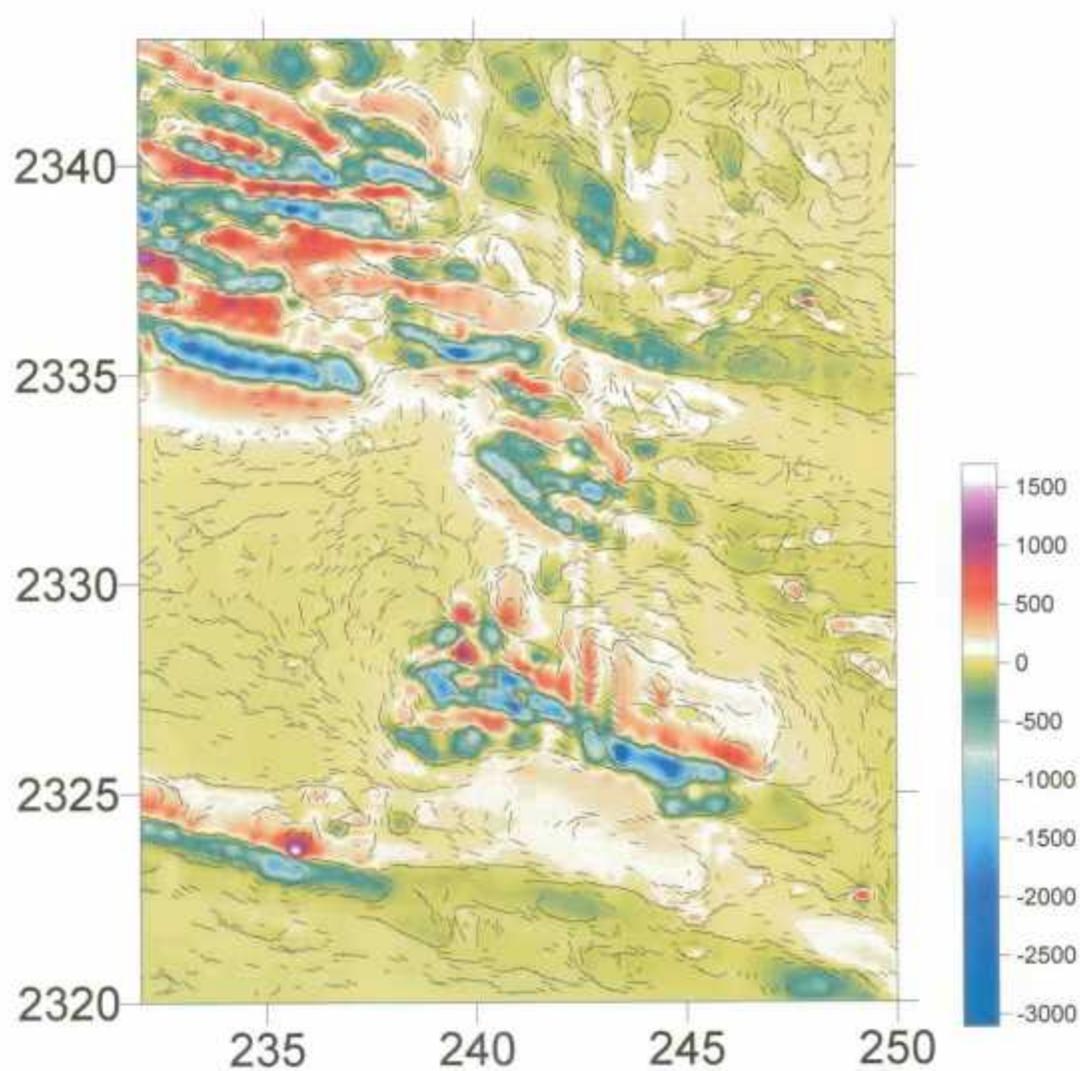


Figure 12 : Discontinuités élémentaires sur fond de gradient vertical réduit au pôle



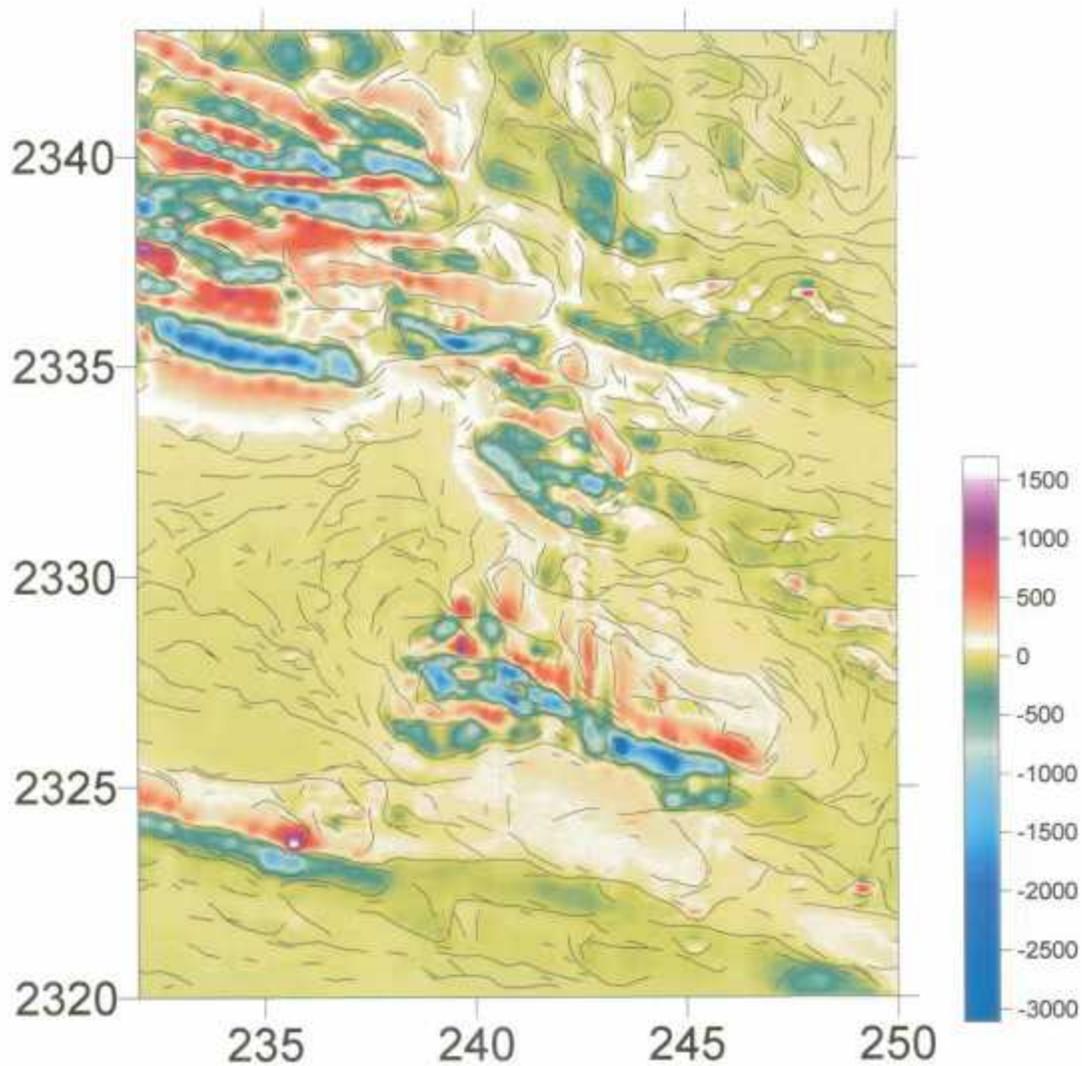
**Figure 13 : Discontinuités "fractures" sur fond de gradient vertical réduit au pôle**

Paramètres pour le regroupement des fractures :

Seuil angulaire :  $20^\circ$

Distance perpendiculaire à l'allongement : 0.125 km

Distance selon l'allongement : 0.25 km



**Figure 14 : Discontinuités "lignes" sur fond de gradient vertical réduit au pôle**  
Paramètres pour le regroupement des lignes :  
Seuil angulaire : 40°  
Distance: 0.25 km

## 4.2. TRAITEMENTS DU MAGNETISME

### 4.2.1. Anomalie du champ total

La carte de l'anomalie du champ total (figure 15) montre qu'il y a généralement peu de corrélation entre les anomalies magnétiques et les contours géologiques. Les seules corrélations sont la présence d'anomalies magnétiques dipolaire de forte amplitude en relation avec le massif des amphibolites de Lannilis. Sur ce document, les effets plus superficiels sont en grande partie masqués par ces anomalies régionales de forte amplitude et des traitements adaptés sont indispensables pour tenter de les mettre en évidence.

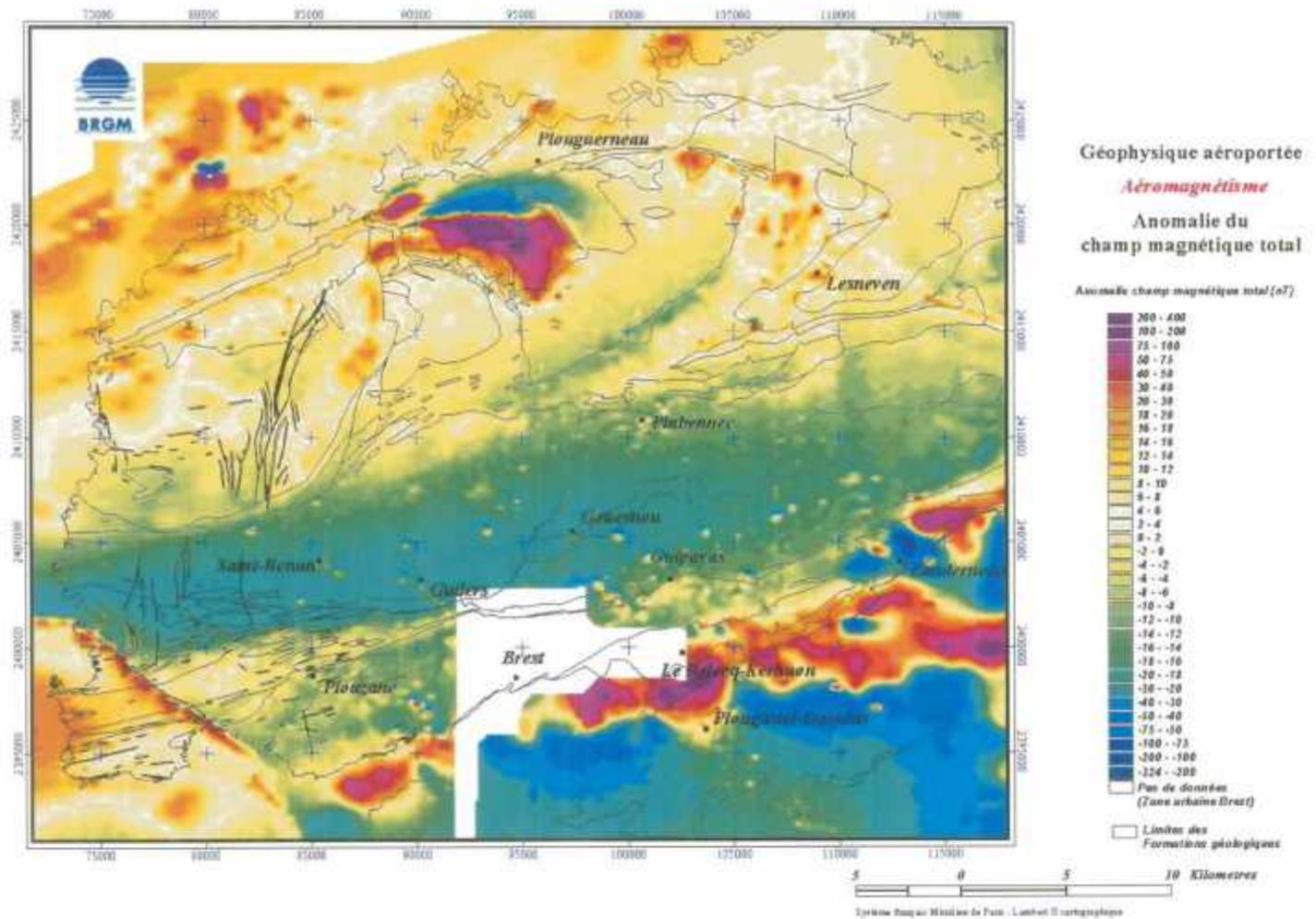


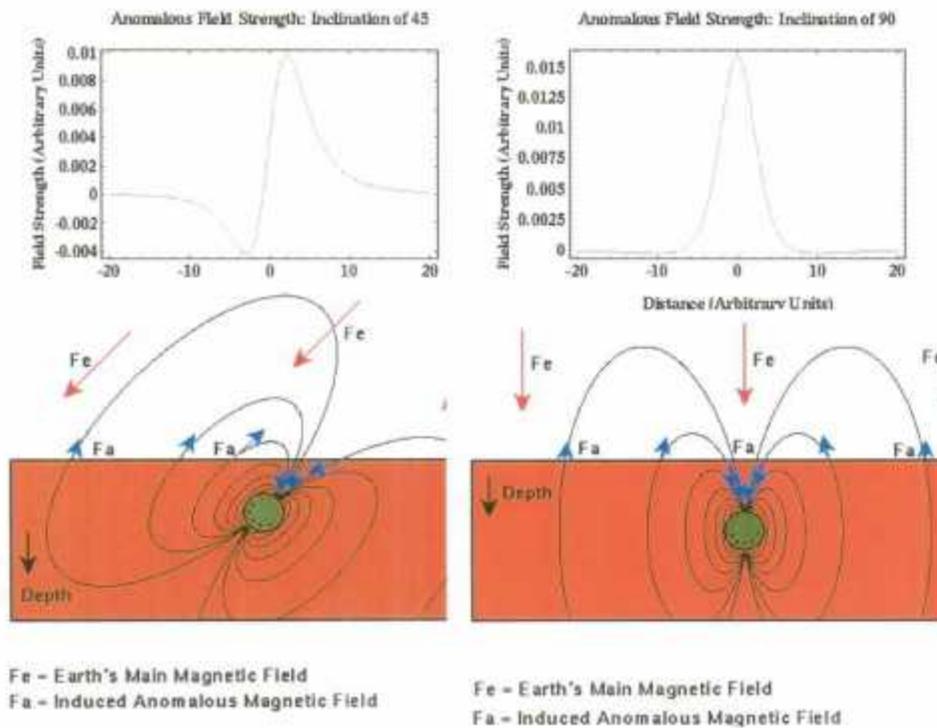
Figure 15 : Anomalie du champ magnétique total (nT)

#### 4.2.2. Gradient vertical réduit au pôle

La dérivée première du champ magnétique selon la verticale (gradient vertical) est une transformation dite « focalisante » qui favorise les hautes fréquences contenues dans la donnée initiale. De ce fait, elle présente les avantages suivants :

- elle augmente le pouvoir séparateur, c'est à dire permet de séparer des anomalies proches et coalescentes ;
- elle favorise l'effet des sources peu profondes au détriment de celui des sources profondes et des effets régionaux.

La transformation en gradient vertical est généralement accompagnée d'une opération dite de « réduction au pôle » dont l'intérêt est de recentrer une partie des anomalies (celles qui sont d'origine induite) à l'aplomb des structures qui les créent.



**Figure 16 : Anomalie d'une sphère magnétique à 45 ° de latitude nord (à gauche) et au pôle magnétique nord (à droite)**

D'après Colorado School of Mine : [http://www.mines.EDU/fs\\_home/tboyd/GP311/](http://www.mines.EDU/fs_home/tboyd/GP311/)

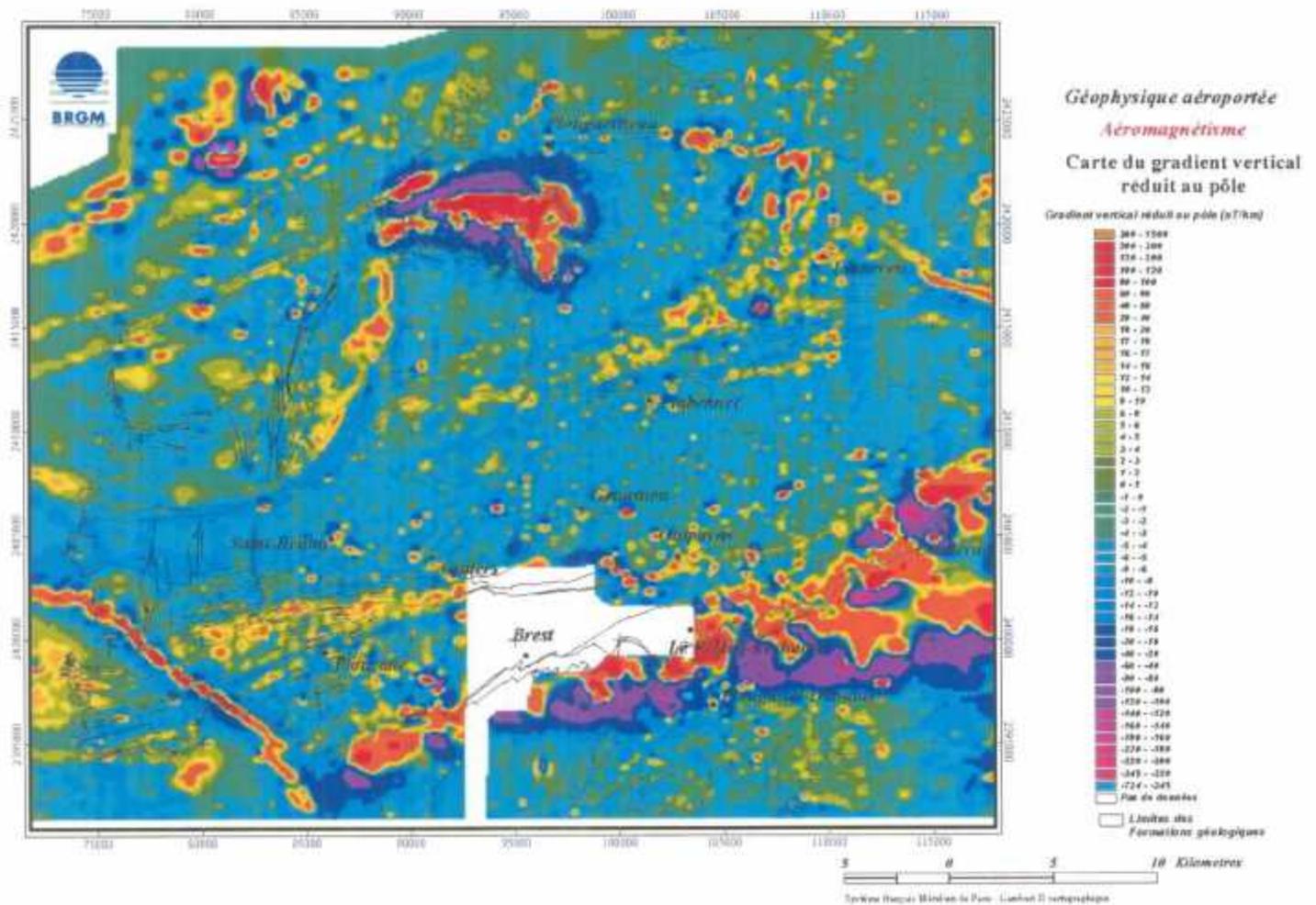
La forme et l'amplitude de l'anomalie magnétique créée par un corps aimanté donné varient selon :

- la géométrie du corps (forme, orientation, pendage),
- la latitude magnétique du lieu de mesure (figure 16).

Au pôle magnétique nord, le champ inducteur est vertical, maximal et orienté vers le bas. Les anomalies d'origine induite sont symétriques, centrées sur les structures qui les créent et ont une amplitude positive maximale. La réduction au pôle est le calcul du champ qui aurait été mesuré, au pôle magnétique nord sur les mêmes structures, aimantées verticalement (induites). Elle permet donc de localiser plus facilement les corps magnétiques responsables des anomalies et de renforcer les structures dont l'effet est atténué sur le champ d'origine du fait de leur orientation (nord-sud, en particulier).

L'emploi de la réduction au pôle présente cependant des limitations.

- L'existence de magnétisme rémanent ayant une direction et un sens différent de ceux du champ actuel n'est généralement pas pris en compte par la réduction au pôle. Il peut en résulter des anomalies réduites au pôle décentrées par rapport à la source et non symétriques. Si le champ rémanent est colinéaire, de sens opposé et plus fort que le champ actuel (aimantation inverse), l'anomalie sera bien localisée mais de signe inversé. Certains programmes permettent de prendre en compte le magnétisme rémanent lors du calcul de la réduction au pôle, mais encore faut-il connaître son orientation et son amplitude, ce qui est très rare, afin de calculer l'aimantation totale, somme vectorielle des aimantations induite et rémanente.
- Aux basses latitudes magnétiques (<30°), les directions nord-sud étant très amplifiées par la réduction au pôle, il y a un risque d'un renforcement exagéré par amplification d'un bruit préexistant.



**Figure 17a : Gradient vertical réduit au pôle (nT / km)**  
(calculé pour une déclinaison de 356.6°E et une inclinaison de 63.3°)

Le gradient vertical fait clairement apparaître le contraste entre les régions fortement magnétiques et les régions amagnétiques. Les limites entre les différentes unités géologiques sont généralement bien perceptibles.

Les régions les plus fortement magnétiques sont associées :

- (1) aux amphibolites de Lannilis où les valeurs les plus fortes dépassent 300 nT/km ;
- (2) aux roches métasédimentaires briovériennes et paléozoïques et se prolongent en mer au niveau du goulet de la rade de Brest ;
- (3) aux filons basiques qui jalonnent la prolongation de la faille Kerforne.

Ces régions fortement magnétiques sont bordées de zones présentant les gradients verticaux réduits au pôle négatif. Ceci se marque particulièrement bien au niveau des amphibolites de Lannilis et des séries protérozoïques et paléozoïques. Cette organisation des anomalies magnétiques est une signature normale du gradient vertical magnétique et ne doit pas être interprétée en terme de variations de lithologie. Plus les zones périphériques négatives sont fortes, plus la structure qu'elles cernent est limitée vers le bas. Cette structuration magnétique particulière apporte donc des informations sur l'épaisseur des structures aimantées. Par ailleurs, si, après réduction au pôle, les anomalies restent dissymétriques et présentent des bordures négatives d'intensité inégale, ce peut être le signe d'un pendage des structures ou de la présence d'une

aimantation rémanente. Cette situation est particulièrement flagrante au niveau des roches métasédimentaires briovériennes et paléozoïques prolongeant le goulet de Brest.

Un autre ensemble se localise au nord, en mer, au large de Plouguerneau. Cette zone correspond à une anomalie au sein des granites migmatiques de Landunvez, moyennement magnétiques. Cette signature « positive » pourrait provenir d'une différenciation pétrographique au sein des migmatites mais plus vraisemblablement d'une intrusion par un matériel basique (par exemple des gabbro-diorites équivalentes à celles de Portsall qui provoquent aussi une légère augmentation des valeurs au sein des migmatites de Landunvez).

Enfin, on peut noter que le complexe granitique de l'Aber Ildut paraît présenter deux zones distinctes : une large zone occidentale où les valeurs sont relativement faibles et une bordure orientale où les valeurs montent à plus de 150 nT/Km. On met ainsi en évidence le caractère zoné de ce granite qui se différencie pétrographiquement avant de passer à ses deux faciès de bordure connus régionalement comme le « granite à deux micas de Porz paul » et le « leucogranite à tourmaline de Plouarzel ».

Dans les zones moyennement à peu magnétiques, des structurations correspondant à des anomalies de très faible amplitude (quelques nT), se distinguent. On peut renforcer le contraste magnétique dans ces régions en utilisant une représentation du gradient vertical selon une échelle logarithmique<sup>6</sup>. Dans les secteurs fortement magnétiques, la structuration des anomalies est parfois perturbée par des linéations nord-sud qui risquent d'être exagérées par l'échelle logarithmique. La direction des lignes de vol étant également nord-sud, on peut supposer qu'il s'agit d'artefacts liés à des défauts de compensation ou d'interpolation. Afin de rendre plus cohérente cette nouvelle image, nous devons donc lissés ces effets par un filtrage des directions comprises entre 5° Ouest et 5° Est. Nous avons ensuite analysé qualitativement ce document (figure 17b et 17c) de manière à en extraire les principales discontinuités magnétiques, failles ou dykes, qu'il met en évidence, ainsi que les principales limites de zones magnétiques. Ces dernières qui sont généralement en bonne coïncidence avec des contours géologiques connus n'ont pas été représentés. Les résultats obtenus (voir aussi la rosace d'orientation figure 17c) montrent globalement deux familles de discontinuités :

- Une famille orientée globalement N60°-80° se distingue clairement dans le Sud du secteur concerné.

La superposition avec les données géologiques montre qu'elle correspond :

(1) à la famille de failles bien connues dans la région comme "système de faille de l'Elorn". Ici plus précisément, elle semble correspondre à la discontinuité structurale majeure entre le Briovérien et le Paléozoïque au Sud de Brest,

(2) aux grands accidents hercyniens tels que le cisaillement nord-armoricain et le linéament Porspoder-Guissény. La famille la plus septentrionale pourrait correspondre à la trace, complexe, de l'escarpement nord-armoricain,

(3) à une structure inconnue au sein du complexe granitique de l'Aber-Ildut. Les cartes géologiques ne font en effet référence à aucune structure affleurante dans ce secteur, bien que certains filons de granites fins, au sein du granite porphyroïde, possèdent cette orientation N70 à N80,

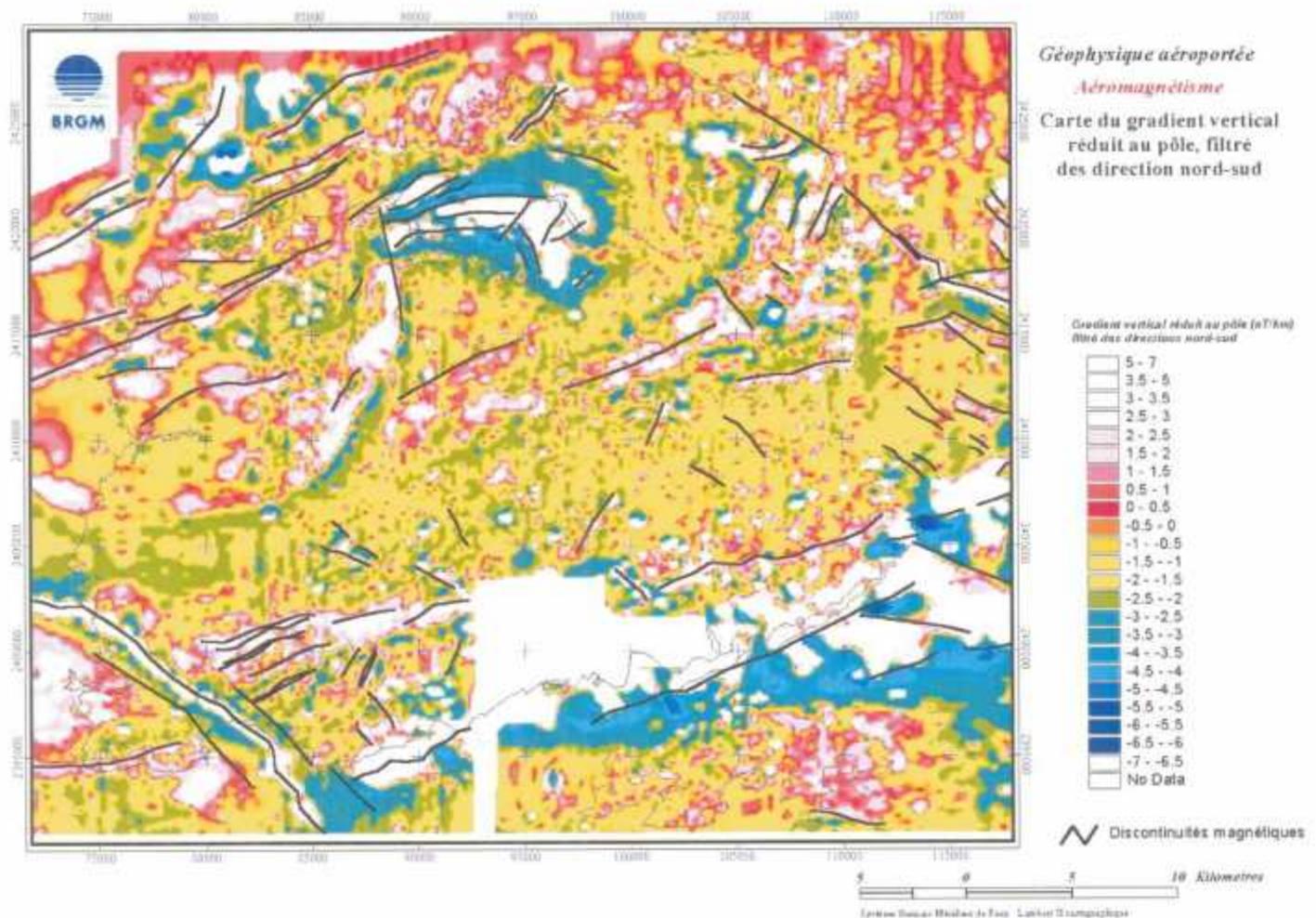
(4) aux limites entre différentes formations. Ainsi, la limite sud des orthogneiss de Tréglonou avec les paragneiss de Lesneven et la limite nord du granite de Kersaint ces mêmes paragneiss semble être mise en évidence par aéromagnétisme.

<sup>6</sup> Transformation appliquée au gradient,  $gv : gv \Rightarrow \text{sign}(gv) * \log[1 + \text{abs}(gv)]$ .

- Une famille orientée NW-SE se dessine distinctement, notamment dans l'Est du domaine, au niveau de la terminaison du batholite hercynien de Kersaint. Il s'agit là aussi d'une famille bien connue dans tout le Massif armoricain. Elle est un équivalent occidental de la famille majeure observée dans la région de Ploërmel (faille Quessoy-Nort Sur Erdre).

Le champ filonien qui jalonne ces fracture a pu localement être daté aux alentours de 200Ma. Il apparaît cependant que certaines de ces discontinuités ne se superposent pas au champ de fracture et failles connues. Il pourrait ainsi s'agir, dans ce cas, d'éléments non recensés lors du levés des cartes géologiques ou d'éléments dont la signature en surface est faible ou nulle (accidents profonds).

Dans le Nord du secteur étudié, la Formation des amphibolites de Lannilis montre des discontinuités un peu plus complexes. Les levés de la carte géologique de Plabennec ont montré, dans cette unité, la présence de filons basiques dont les contours cartographiques s'accordent parfaitement avec la trace de ces discontinuités.



**Figure 17b : Gradient vertical réduit au pôle filtré des directions nord-sud et représenté avec une échelle de couleur logarithmique. En noir, superposition des principales discontinuités**

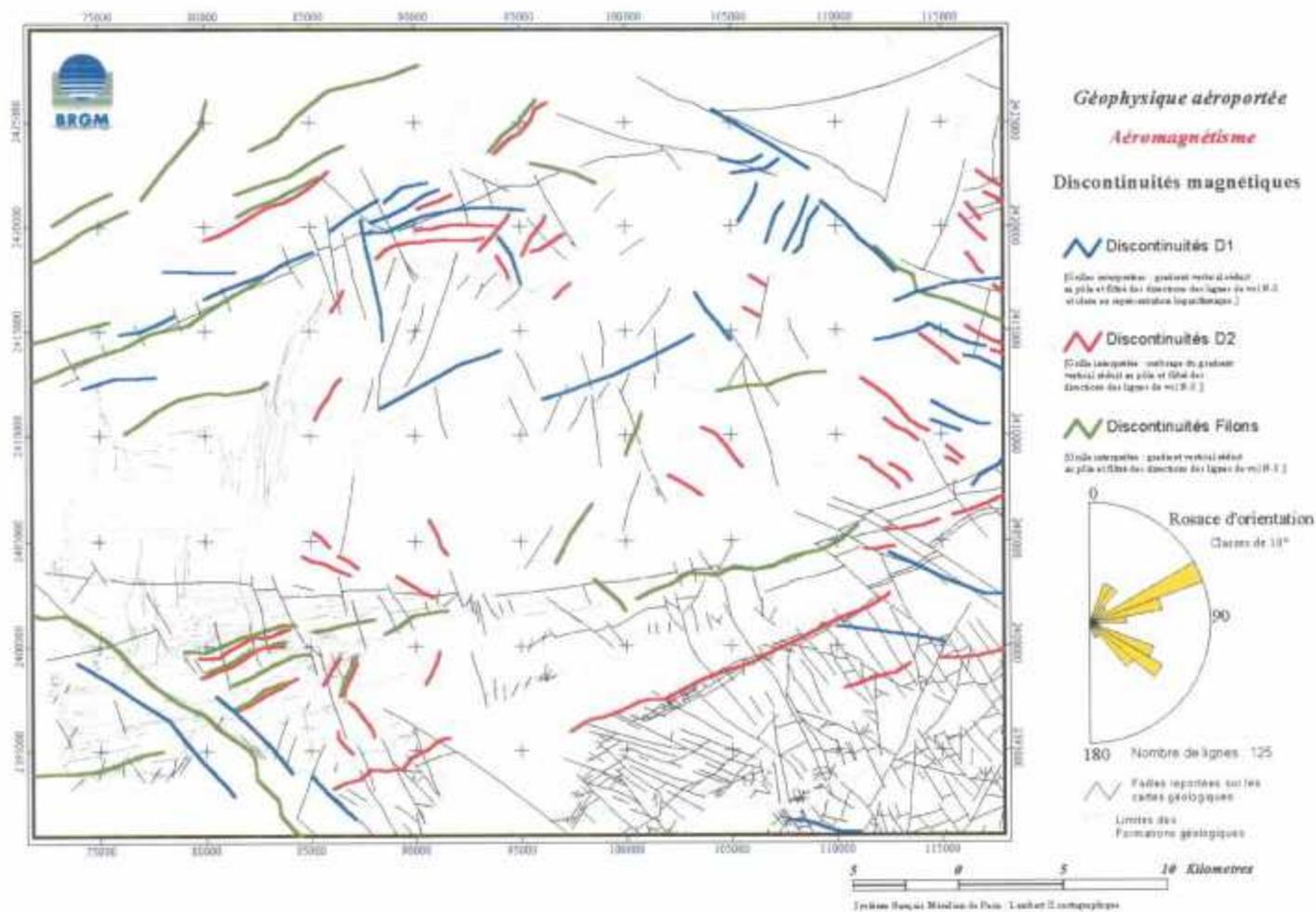


Figure 17c : Discontinuités magnétiques et géologie

### 4.3. TRAITEMENT DE LA SPECTROMETRIE

La carte du comptage total (figure 18a) est la combinaison d'anomalies régionales de grande longueur d'onde et d'effets plus locaux susceptibles de jalonner des accidents. A titre d'exemple, la carte des discontinuités spectrométriques obtenue, par méthode automatique, à partir de la carte du comptage total est présentée en figure 18b.

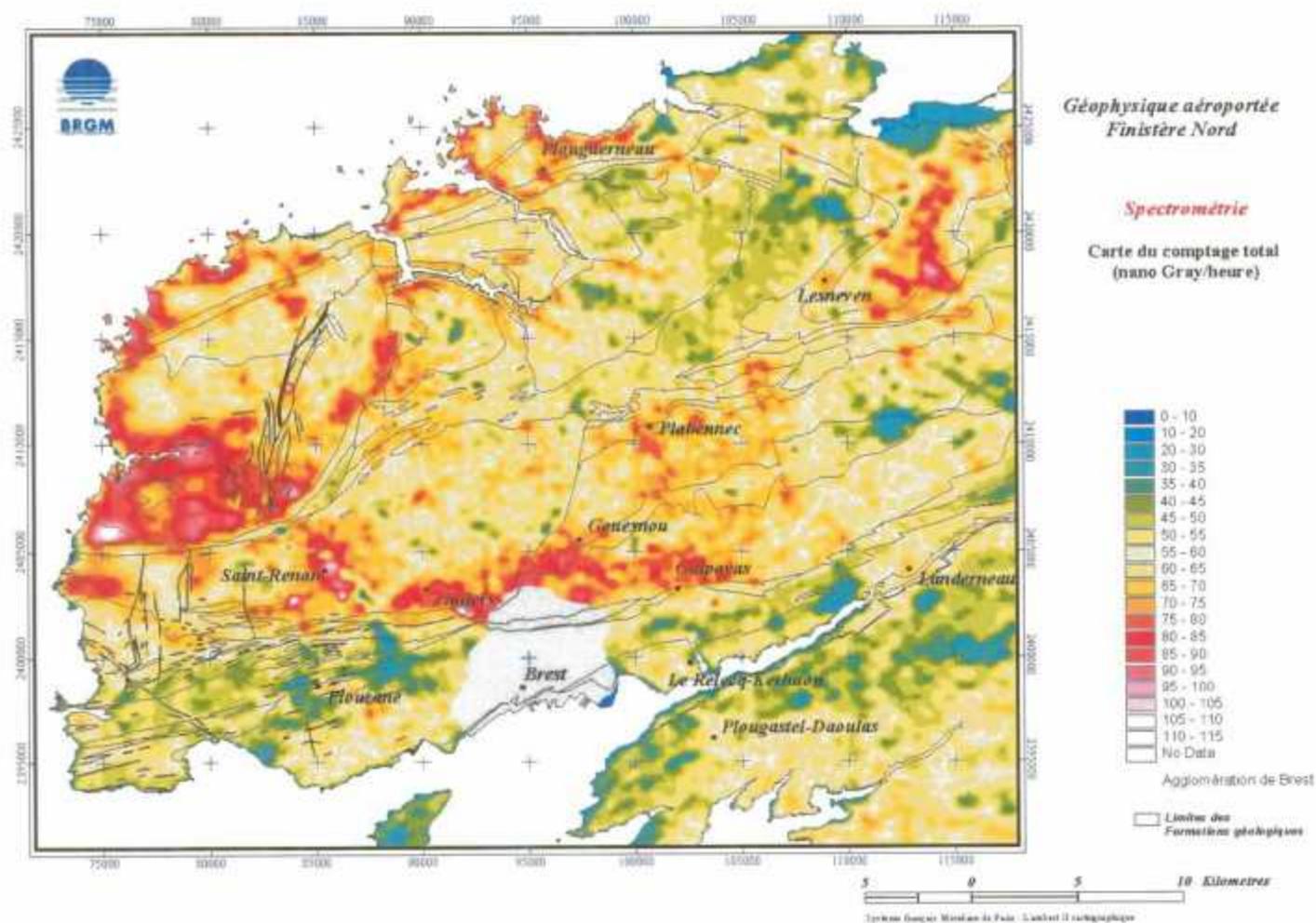
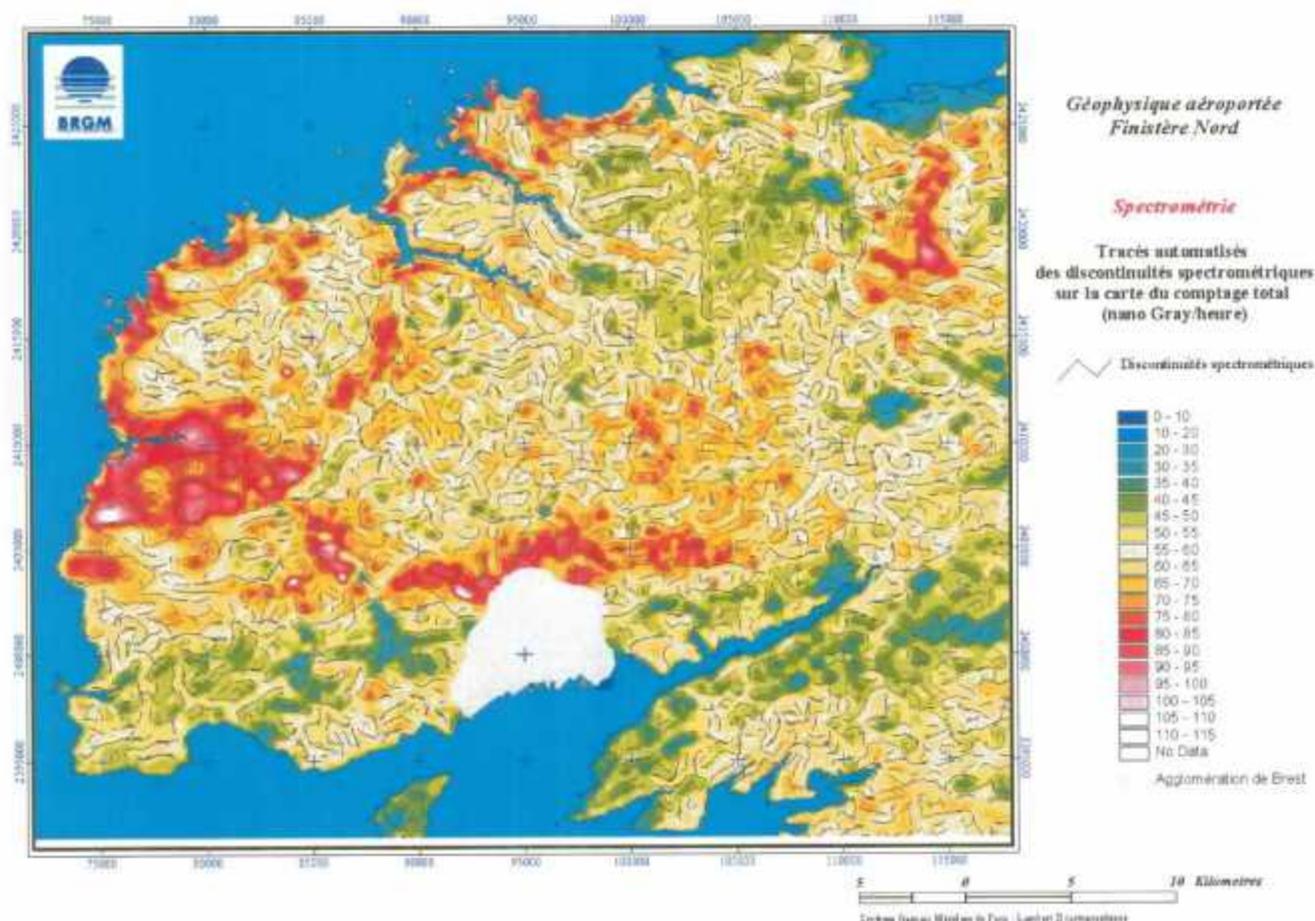


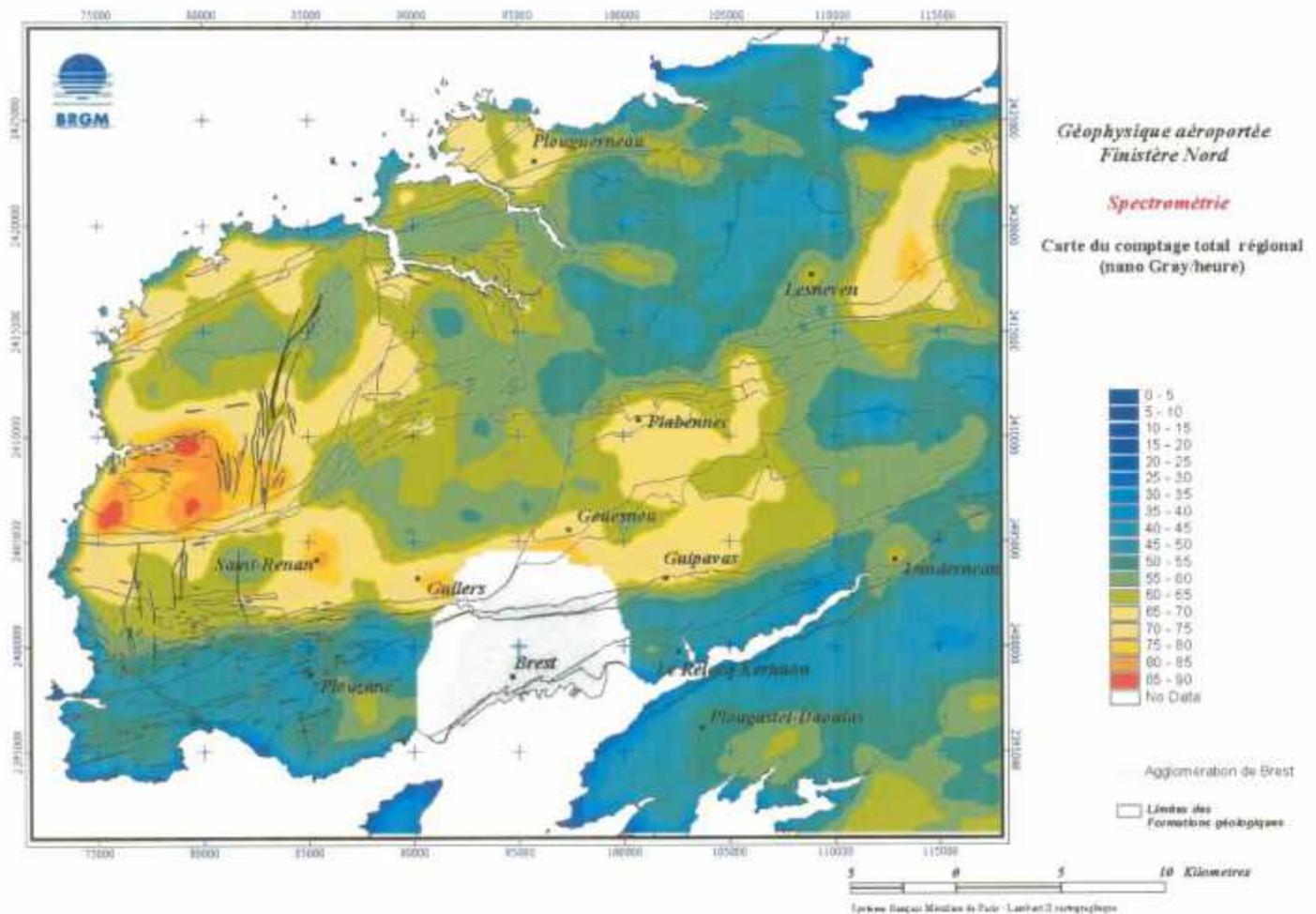
Figure 18a : Carte du comptage total (nano Gray / heure)



**Figure 18b : Carte « automatique » des discontinuités spectrométriques à partir de la carte du comptage total**

Afin de séparer ces deux types d'anomalies, une carte de l'effet régional a été calculée (figure 18c) par une méthode de lissage par moyenne glissante, sur une fenêtre de 2.5 \* 2.5 km, avec une pondération par une fonction inverse de la distance au centre de la fenêtre. Cette carte est assez peu contrastée et montre de grands ensembles :

- (1) Les réponses les plus fortes sont observées en bordure du complexe granitique zoné de l'Aber Ildut. Elles sont notamment bien marquées au sud du pluton. De fortes réponses sont aussi observées immédiatement au nord de Brest où elles intéressent un groupe de formations granitiques (Granite de St-Renan et granites de Kersaint, faciès fins et grossiers).
- (2) Les réponses faibles sont rares et d'extension limitée. On peut en signaler sur les séries paléozoïques, sur la terminaison orientale des faciès fins du granite de Kersaint, dans la vallée de l'Aber Ildut, à l'Ouest de Brest.



**Figure 18c : Carte du comptage total régional (nano Gray / heure)**

Une carte d'anomalie résiduelle (figure 18d) a été ensuite obtenue en soustrayant ce champ régional de la donnée initiale. Cette carte a servi de base pour une analyse qualitative des discontinuités structurales spectrométriques, complétée ensuite par l'analyse des autres documents radiométriques (en particulier rapport K/Th).

Le schéma des discontinuités spectrométriques (figure 18e) met en évidence à peu près les mêmes orientations que le magnétisme. Ces cartes font apparaître quatre familles de discontinuités :

- une famille (multiples éléments) qui montre clairement la zonation radiométrique du granite de l'Aber Ildut. Cette zonation, mise en évidence par cette méthode, est aussi connue par les méthodes de la cartographie traditionnelle et de la géochimie. Cette zonation correspond effectivement à des différenciations minéralogiques et géochimiques du granite, connu dans la littérature comme étant un "complexe granitique zoné",

- Dans le Nord-Est, s'individualise une famille N120-140 corrélable avec des failles reconnues,

- Dans le Sud-Est du domaine, une famille semble sécante à l'Ouest sur les unités géologiques reconnues. Elle correspond globalement à la manifestation du cisaillement Nord-armoricain et peut être suivie jusqu'à l'Est du domaine où elle semble plus concordante avec les unités géologiques (ce qui est observé sur le terrain),
- Dans le Sud du domaine et particulièrement dans les métasédiments briovériens et paléozoïques, une famille N70-80° se distingue. Des directions similaires sont connues dans ce secteur mais ici, cette famille de discontinuités apparaît clairement sécante sur les structures mises en évidence en surface.

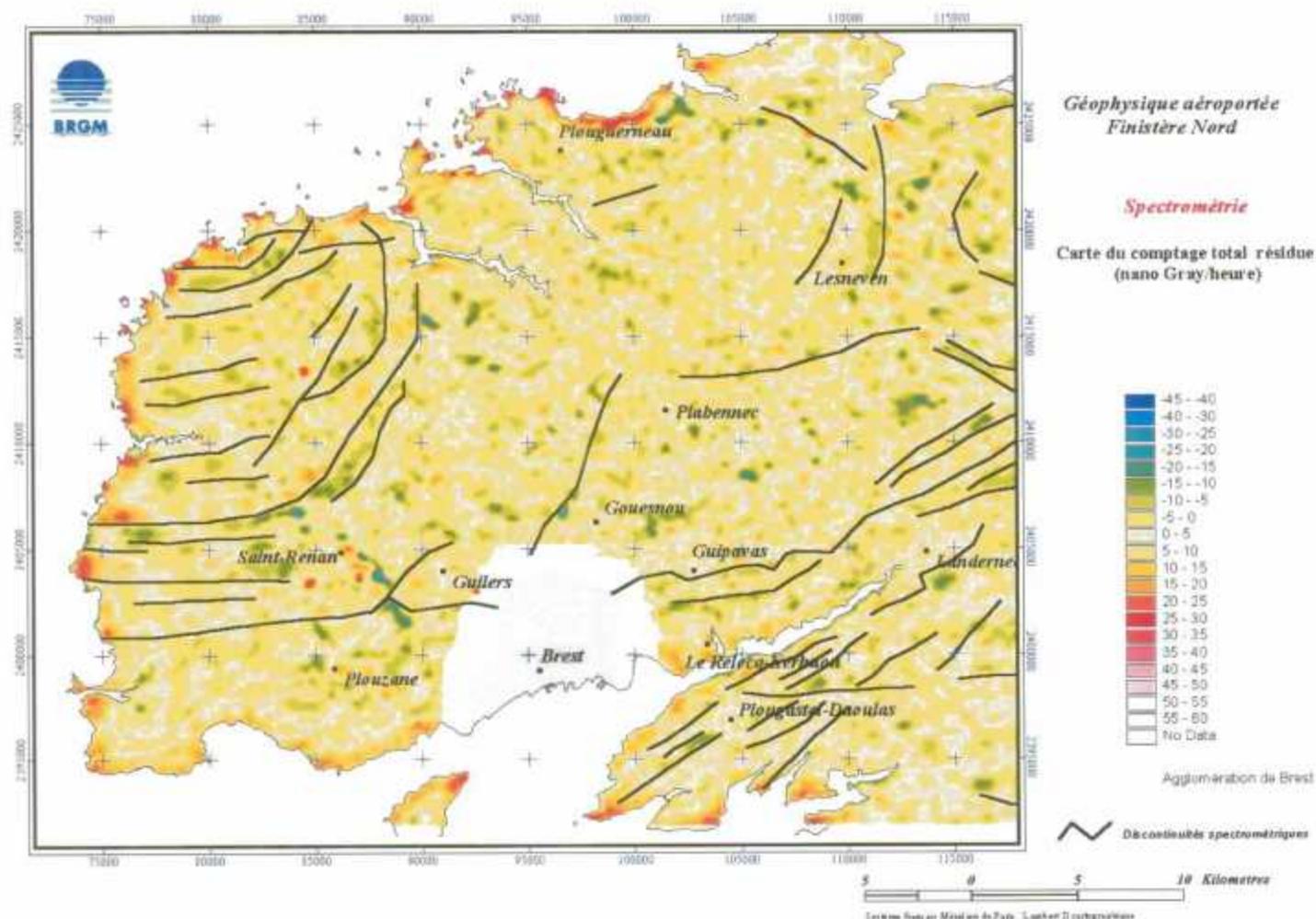


Figure 18d : Carte du comptage total résiduel (nano Gray / heure)

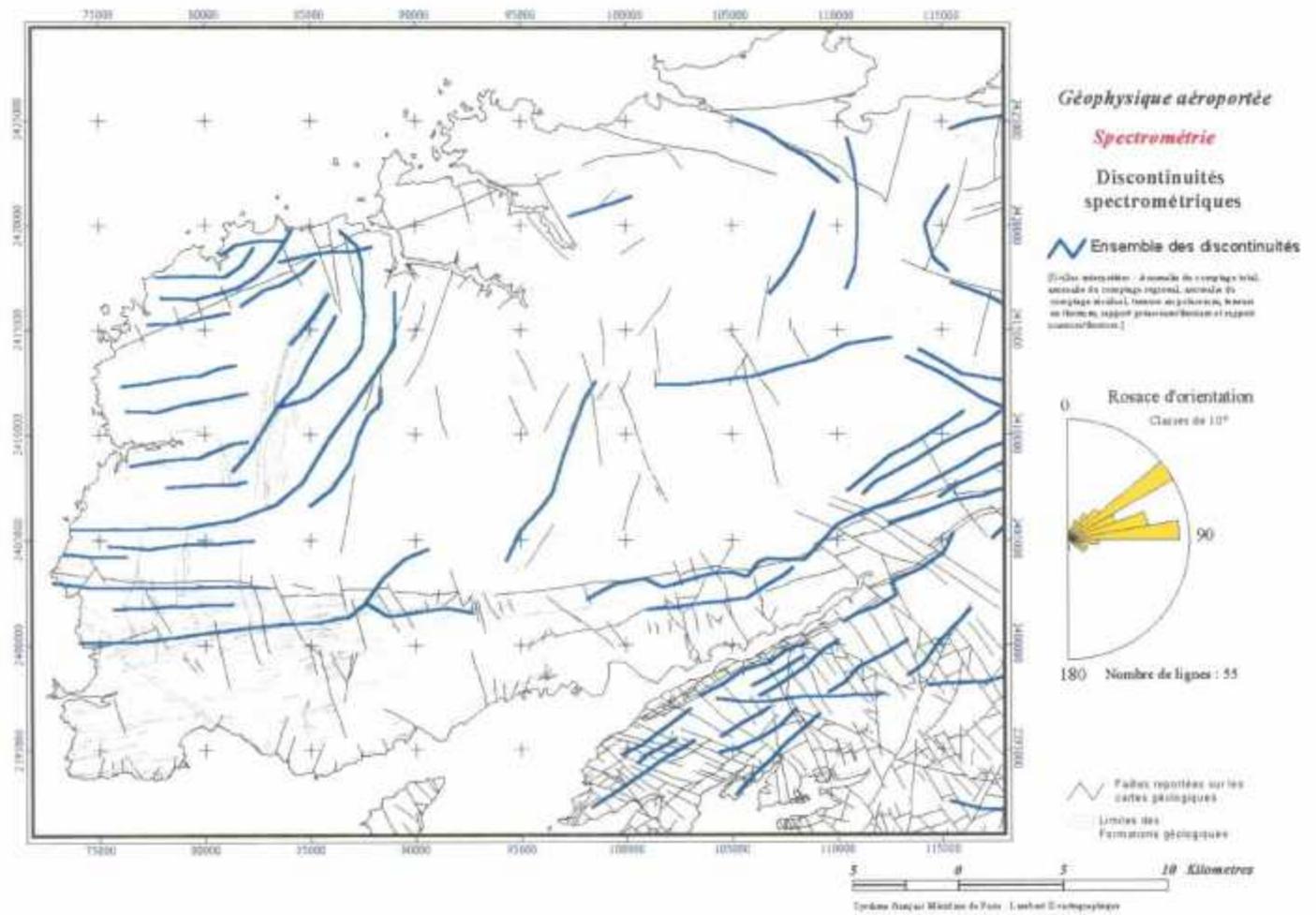


Figure 18<sup>e</sup> : Discontinuités spectrométriques et géologie

Les mêmes traitements, lissage pour le calcul de l'anomalie régionale et le calcul de l'anomalie résiduelle, ont été réalisés sur les éléments uranium, thorium et potassium. Les cartes résiduelles n'apportent pas d'information supplémentaire sur les discontinuités spectrométriques présentes sur la zone étudiée. Elles ne sont donc pas présentées. Les anomalies régionales (figure 19, 20 et 21) fournissent par contre des informations complémentaires sur de probables différenciations lithologiques. Il en est de même des cartes des rapports K/Th (figure 22), U/Th (figure 23) et K/U (figure 24).

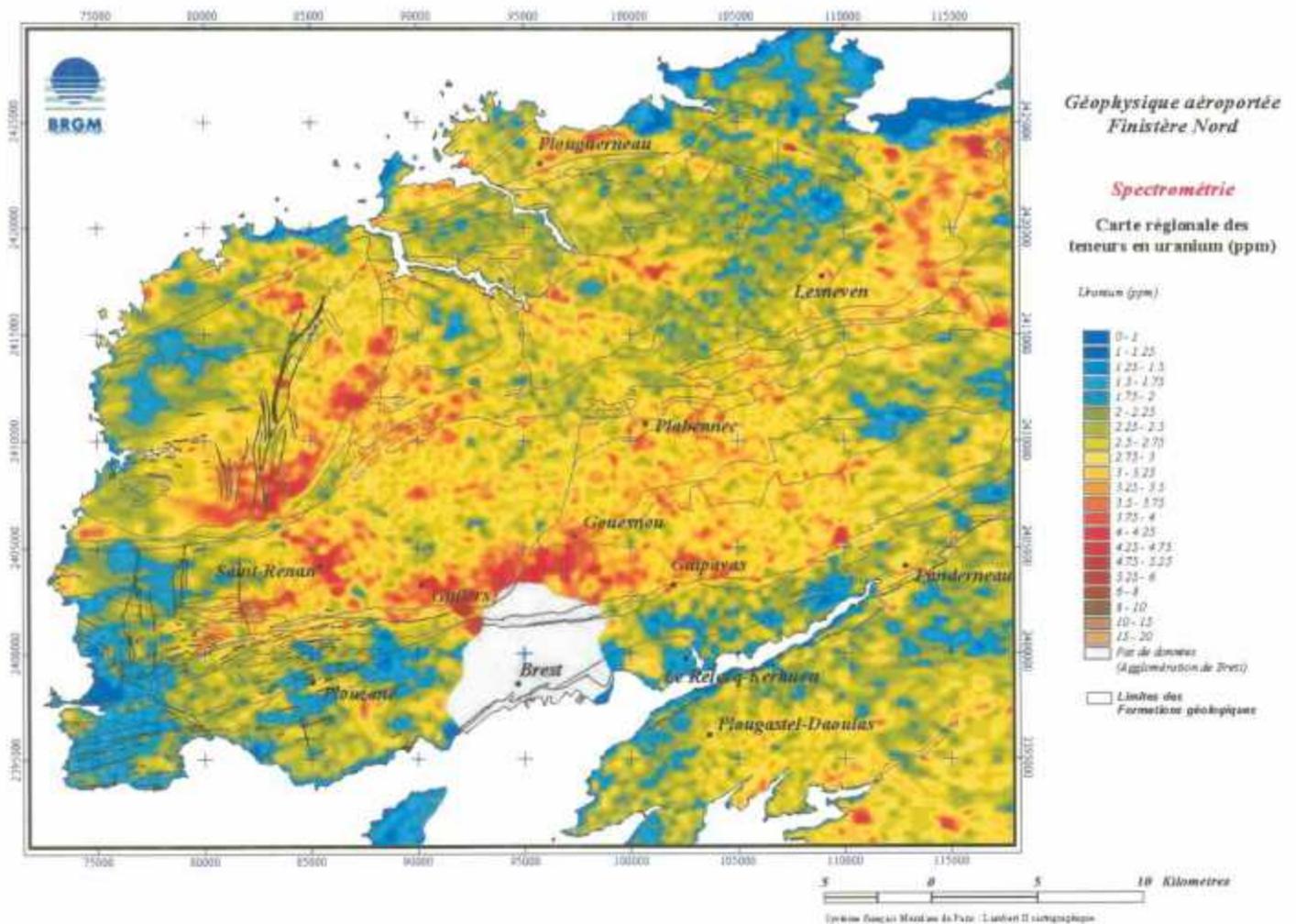


Figure 19 : Carte des teneurs équivalentes (ppm) en uranium

#### a) Teneurs en uranium

Les principales observations à ajouter sur la teneur en uranium sont :

- une zonation du granite de l'Aber-Ildut, avec de fortes teneurs en bordure (faciès du granite à deux micas de Porz-paul et granite à tourmaline de Plouarzel),
- des teneurs généralement assez faibles sur les formations paléozoïques (opposé de ce qui est observé sur le secteur de Ploërmel),
- une forte anomalie locale au nord de Brest, sur le granite de St-Renan et les gneiss de Brest (non expliquée),
- des faibles teneurs dans les fonds de vallées (exemple : alluvions de l'Aber-Ildut à l'Ouest de Brest) ainsi que sur les estrans en général,
- une faible teneur au niveau de la terminaison orientale des faciès fins du granite de Kersaint (cette zone n'a pas encore fait l'objet d'un levé cartographique détaillé ; l'anomalie observée pourrait éventuellement provenir d'une différenciation granitique, d'une intrusion par un matériel dioritique ou encore être liée à la présence d'une couverture sédimentaire tertiaire ou quaternaire comme cela est observé pour l'Aber Ildut),
- des faibles teneurs sur les orthogneiss de Plounevez-Lockrist (non expliquées) et faibles teneurs au centre des orthogneiss de Tréglonou ; cela pourrait être la

signature de formations superficielles pelliculaires telles que des zones hydromorphes, bien connues à cet endroit.

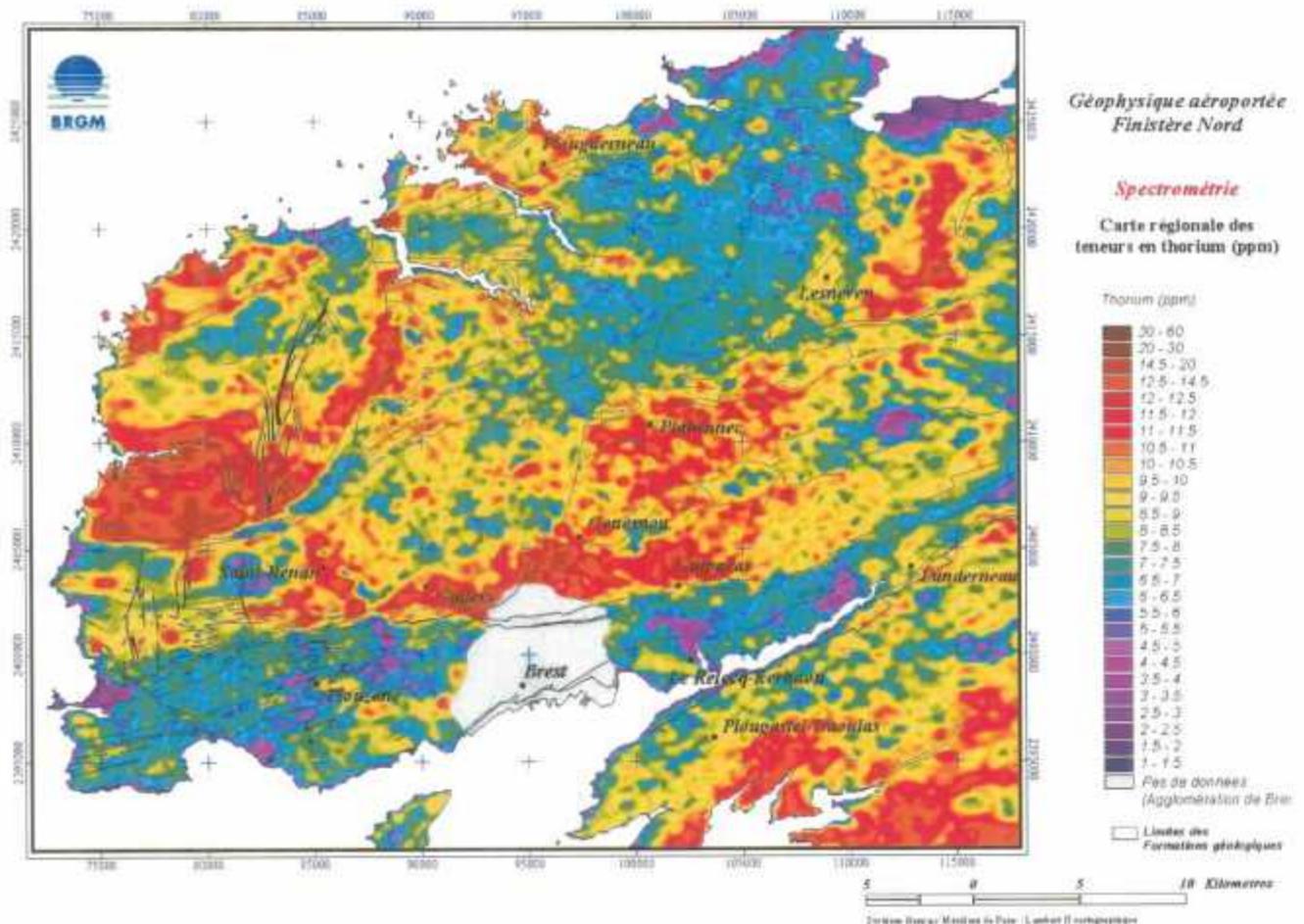


Figure 20 : Carte régionale des teneurs équivalentes (ppm) en thorium

## b) Teneurs en thorium

Les principales observations sur le teneur en thorium sont :

- une différenciation possible dans le complexe granitique de l'Aber-Ildut, avec de fortes teneurs en bordure sud. Cette anomalie pourrait résulter de différenciation géochimiques mais de telles zonations n'ont pas été mises en évidence sur le terrain,
- des fortes teneurs localement sur les formations paléozoïques,
- des différenciations importantes dans les gneiss de Brest, le Briovérien (non expliquées),
- une différenciation très nette dans le massif de St-Renan (non expliquée) mais encore plus franche dans le massif de Kersaint où les valeurs les plus fortes semblent être en relation avec les faciès les plus grenus. Dans les faciès les plus fins, à l'Est, on remarquera la zone anormale où les concentrations en thorium chutent drastiquement.

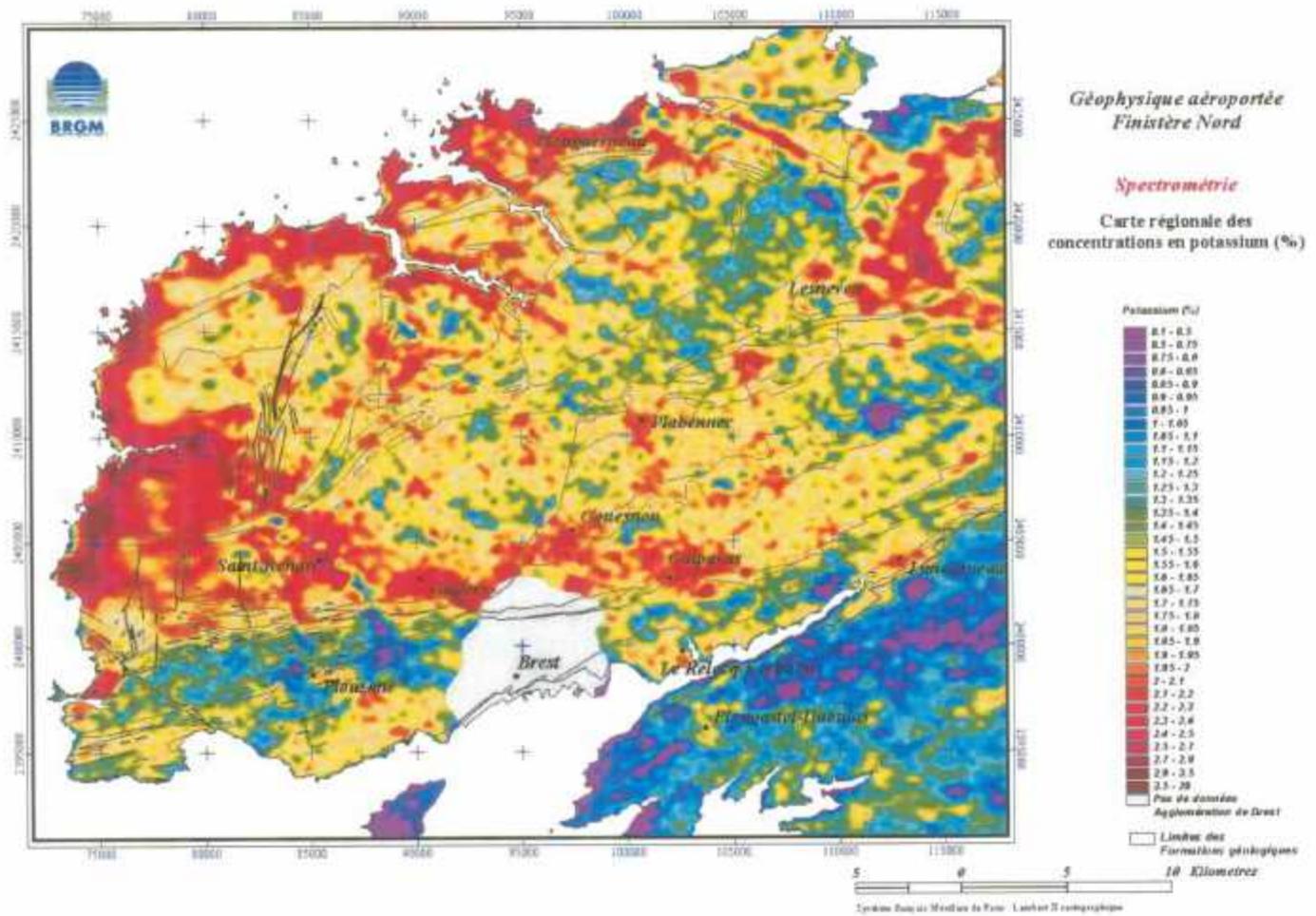


Figure 21 : Carte régionale des concentrations (%) en potassium

### c) Teneurs en potassium

Les principales observations sur la concentration en potassium sont :

- de fortes anomalies sur le complexe granitique de l'Aber-Ildut,
- de fortes teneurs sur les estrans et en bordure maritime, assez en retrait du trait de cote. Ceci pourrait être lié à la mise à nu de la roche alors qu'ailleurs, les reliques des formations d'altération entraînent une diminution de la concentration en potassium,
- des teneurs faibles sur roches paléozoïques (cela était aussi observé sur le secteur de Ploërmel),
- des teneurs très faibles à l'Ouest de Brest. Ceci est lié à la présence de sédiments cénozoïques de l'Oligocène (sables, argiles et graviers) et d'une vaste nappe alluviale (Quaternaire),
- les mêmes anomalies locales (Brest, Lesneven, Tréglonou) que celles observées pour l'Uranium et/ou le thorium. Certaines d'entre-elles sont liées à des zones hydromorphes (Tréglonou, Lesneven), d'autres restent inexplicées.

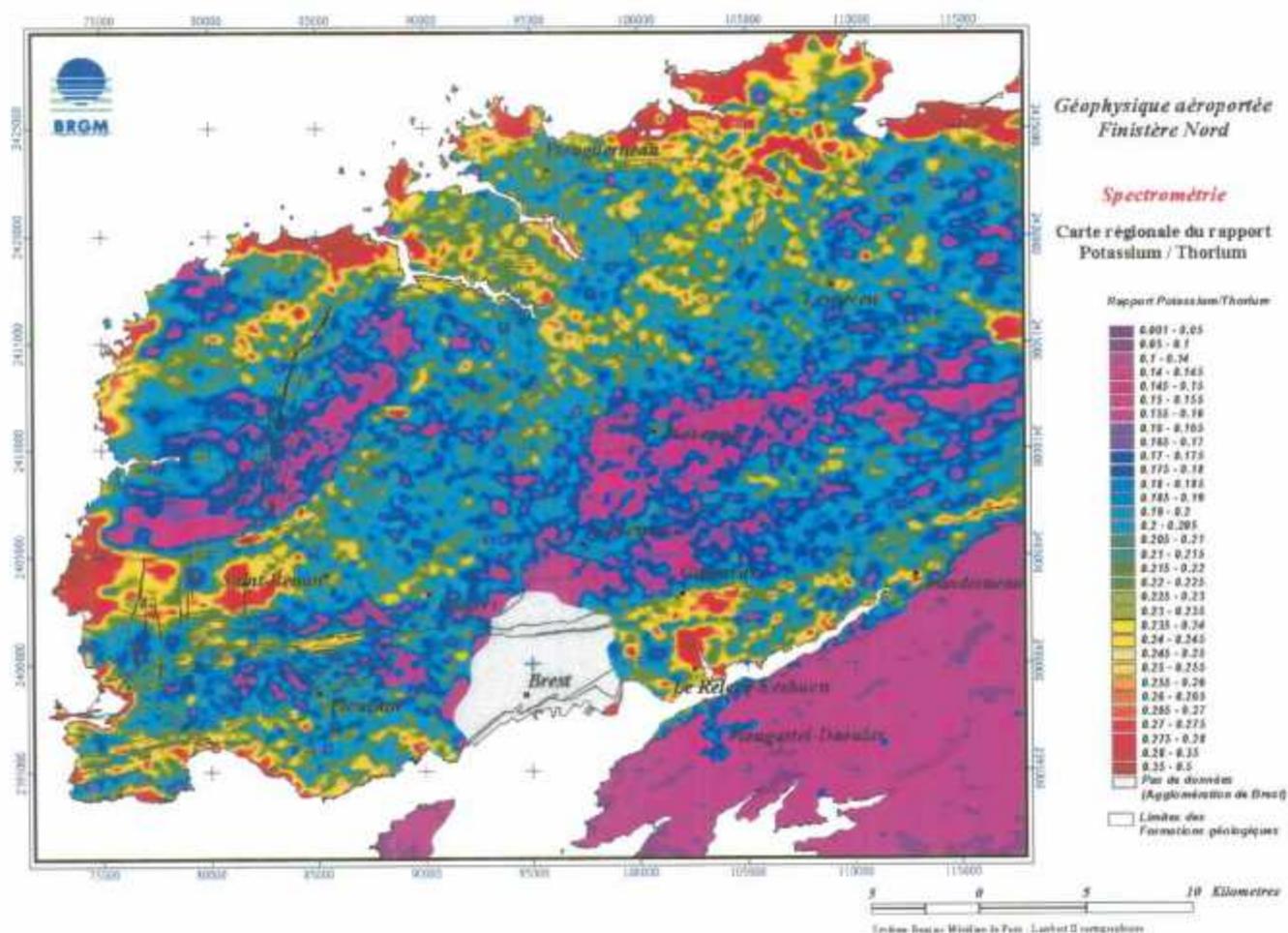


Figure 22 : Carte du rapport potassium sur thorium

#### d) Rapport potassium/thorium

Les principales observations sur le rapport K/TH sont :

- une différenciation dans le complexe granitique de l'Aber Ildut avec des valeurs de rapport très faibles en bordure sud (différenciation magmatique),
- des faibles valeurs du rapport sur tous les terrains paléozoïques,
- une dispersion des valeurs du rapport sur les granites de St-Renan et de Kersaint. Sur le granite de St-Renan, les valeurs les plus fortes sont observées à l'Ouest, cette zone pouvant correspondre au domaine où les altérites ont été décapées entièrement. Sur le granite de Kersaint, les faciès les plus fins montrent encore leur particularité avec des valeurs de rapports plus fortes que celles observées pour les faciès grossiers avoisinants,
- Au sein de chaque unité géologique, les dispersions de la valeur du rapport K/Th sont vraisemblablement liées à la présence ou à l'absence de formations superficielles (altérites, limons, colluvions...).

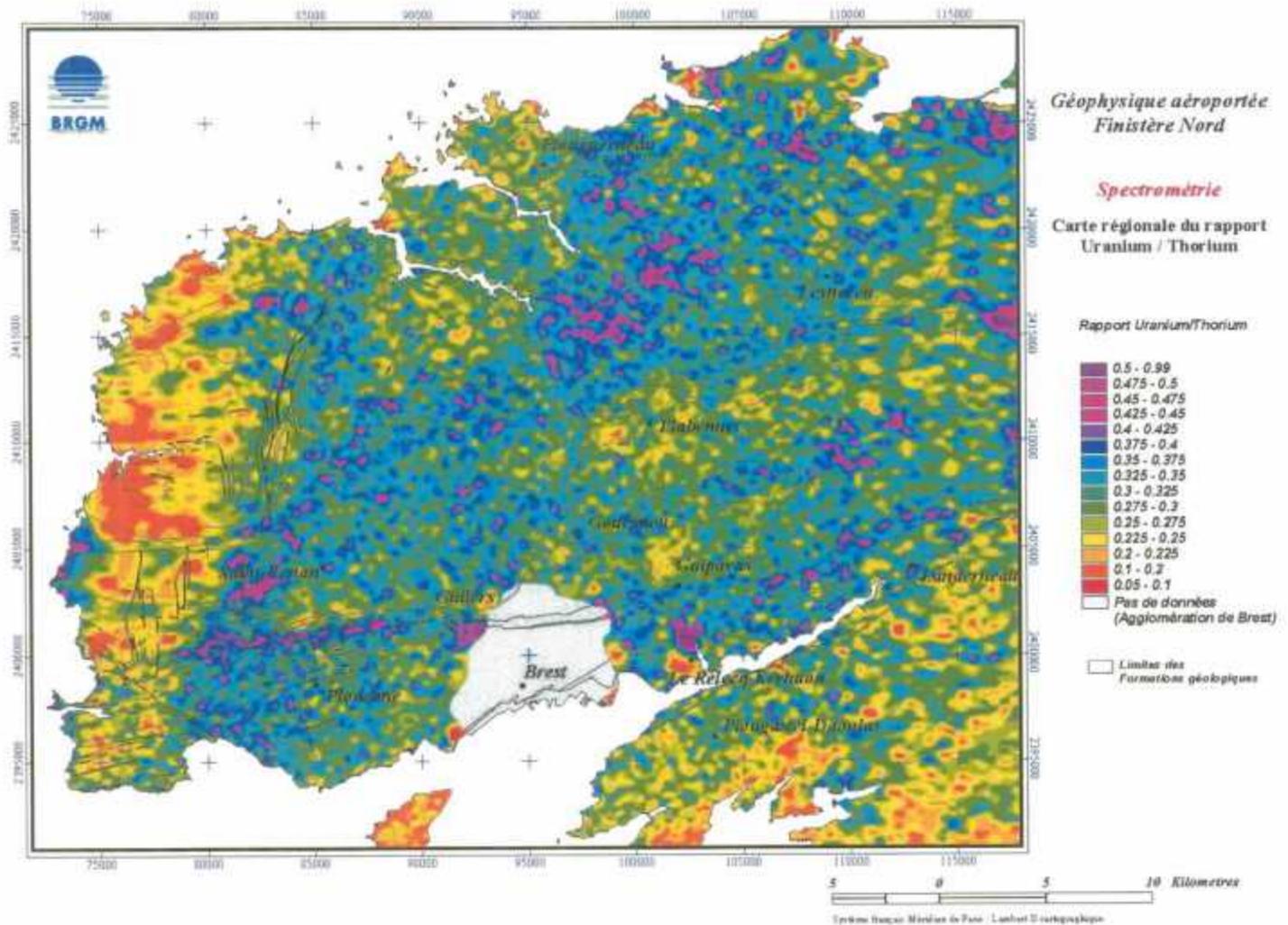


Figure 23 : Carte des rapports uranium sur thorium

### e) Rapport Uranium/thorium

Cette carte présente une singularité par rapport aux différentes cartes afférentes à la spectrométrie étudiées jusqu'à maintenant. L'Est du domaine d'étude semble suivre la logique énoncée pour les autres cartes, avec des différenciations particulières au sein de chaque unité géologique. L'Ouest du secteur d'étude présente, en revanche, un brusque changement dans les valeurs du rapport Uranium/Thorium. A l'Ouest du champ filonien du Bas-Léon s'observent de très faibles valeurs du rapport, quelles que soient les lithologies concernées. Cette particularité est probablement à mettre en relation avec l'absence de formations d'altération.

Pour le domaine Est, on observe :

- des différenciations locales mais de faibles amplitudes dans les séries paléozoïques,
- très fortes valeurs du rapport localement sur certains granites (comme, encore une fois, sur les faciès fins du granite de Kersaint), ainsi que sur certains gneiss, et en particulier les gneiss de Brest. Les autres formations présentent des valeurs de rapports assez homogènes.

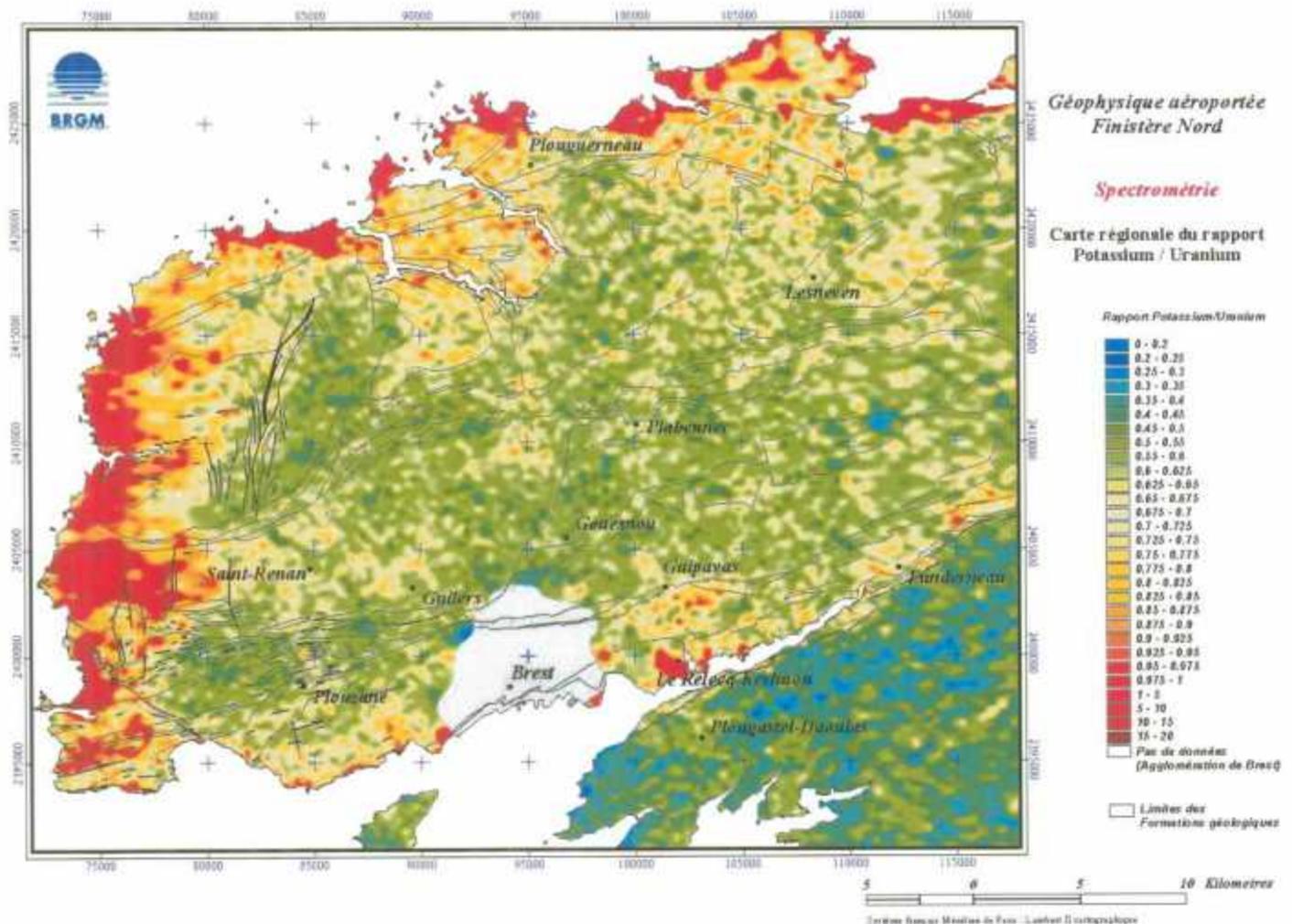


Figure 24 : Carte des rapports potassium sur uranium

#### f) Rapport potassium/uranium

Les principales observations sur le rapport K/U sont :

- la particularité signalée pour la carte précédente est encore marquée ici avec de fortes valeurs du rapport à l'Ouest du champ filonien du Bas-Léon. Il est donc possible que ce fait soit lié à la répartition des teneurs en uranium,
- homogénéité sur l'ensemble du domaine étudié avec, toujours, l'anomalie à l'Est du granite de Kersaint, dans les faciès fins et des valeurs de rapport plus faibles pour les séries paléozoïques.

#### 4.4. UTILISATION DE LA SPECTROMETRIE DANS L'INDIVIDUALISATION DES DOMAINES ALTERES

L'étude du rapport entre ces différents éléments et en particulier du rapport K/Th est aujourd'hui envisagée dans la détermination des domaines altérés. En effet, lors d'une altération (et *à fortiori* lors d'une altération de type latéritique comme il a pu se développer au Cénozoïque dans le Massif armoricain), le potassium est un élément

susceptible d'être lessivé dès les premiers stades alors que le thorium est un élément beaucoup plus stable.

Ainsi, au sein d'une même unité géologique (et pour des lithologies semblables), et en première approximation, plus le rapport K/Th est faible, plus le degré d'altération est grand. *Dans le même ordre d'idée, l'uranium, plus mobile que le thorium a pu être remobilisé et les rapports K/Th et U/Th peuvent alors être employés, particulièrement en domaines granitiques (teneurs importantes)*

#### 4.4.1. Méthodologie

Trois grilles au pas de 125m concernant le pourcentage de potassium (K), la teneur équivalente en thorium (Th) et la teneur équivalente en uranium (U) ont été réalisées; ensuite trois autres grilles dérivant des premières ont été calculées (K/Th, U/Th, K/U). Les données géologiques sont issues de la carte numérique au 1/250 000 de Bretagne en cours d'élaboration. Les tables attributaires de ces cartes ont été modifiées afin de les rendre compatibles entre-elles et de faire apparaître un champ spécifique contenant la nature des formations considérées associée à leur âge de mise en place ou de métamorphisme connu. Nous pouvons citer par exemple pour les formations plutoniques : « Plutonique – indifférencié » et « Plutonique – Carbonifère ».

La grille "géologique" ainsi définie a ensuite été transférée sous Arcview 3.1 afin de permettre sa superposition avec les données géophysiques et les calculs (notamment les rapports entre les différentes teneurs) sur des domaines définis.

Afin d'estimer la signature des formations superficielles, les études ont portées, en fonction de la disponibilité des données, de la bonne connaissance géologique de certains domaines (et notamment des formations superficielles que l'on y rencontre et de leur répartition), sur trois domaines répartis sur des lithologies différentes :

1 - Unité des schistes des Mauges. Très bonne connaissance de la répartition des formations superficielles et de leur épaisseur grâce à un travail détaillé (L'Hostette et Wyns au cours de l'année 2000 d'après un DESS de l'Hostette (Avignon, 1999)).

2 - Briovérien de Bretagne centrale. Formation constituée principalement de schistes et de grès peu métamorphiques, associés localement à des conglomérats grossiers. Les levés des feuilles au 1/50 000 effectués récemment dans ces secteurs ont tenu compte de la répartition des formations d'altération (isaltérites et allotérites) et des formations superficielles au sens large (limons, loess, terrasses...). Les feuilles considérées sont : Ploërmel, Montfort-sur-Meu, Rennes, St-Méen-le-Grand, Janzé...

3 - Secteur de Scaër (Sud-finistère) : Ce secteur est bien connu régionalement comme étant un des secteurs ayant conservé depuis la période latérisante (estimée tertiaire) un profil altéré parmi les plus complets que l'on puisse trouver sur le Massif armoricain (présence de silicifications indiquant vraisemblablement la surface Eocène...). Ce secteur se localise sur des métasédiments briovériens, des métasédiments d'âge indéterminé mais rapportés au Briovérien (métamorphisme de contact par granites hercyniens) et des plutons hercyniens contemporains du fonctionnement du cisaillement sud-armoricain.

#### 4.4.2. Résultats

Les résultats obtenus ont été généralisés pour certaines formations comme pour les granitoïdes hercyniens, les unités métamorphiques protérozoïques et les unités métasédimentaires protérozoïques et localement paléozoïques (Carbonifère).

Afin d'estimer la signature spectrométrique des formations superficielles silto-argileuses telles que les limons ou les loess et afin d'affiner la signature particulière des formations d'altération, la partie Nord-Est de la carte géologique de Guingamp a été digitalisée.

Ce secteur présente un recouvrement silto-argileux suffisamment important pour que la radiométrie spectrale puisse être utilisée (maille au pas de 250 mètres dans ce secteur). Il présente, en outre, une cartographie détaillée des formations d'altération et un panel représentatif de formations géologiques variées (depuis des gabbros jusqu'à des granites hercyniens porphyroïdes)

#### Résultats concernant le Léon (figure 25) :

Pour les formations métasédimentaires ou peu métamorphiques considérées, l'exercice a montré que quelles que soient les lithologies concernées, il est possible de déterminer des rapports  $[K]/[Th]$  qui signent clairement, distinctement et sans ambiguïté possible la présence de formations superficielles et en particulier la présence d'altérites. En généralisant les résultats obtenus à l'ensemble de ces lithologies, en faisant varier ce rapport linéairement, il est possible de tracer une carte de la « probabilité de présence de formations meubles » sur le Massif armoricain et *à fortiori* sur le Léon. Cette démarche sera, dans l'avenir, affinée et généralisée à des formations qui n'ont pas encore été prises en compte ici.

Pour les formations plutoniques et métaplutoniques, la méthode employée montre que l'utilisation d'un seul rapport n'est pas suffisante et qu'il faut employer le rapport des concentrations en uranium et thorium. Les rapports  $[K]/[Th]$  et rapports  $[U]/[Th]$  ainsi couplés permettent, de la même façon que pour les unités métasédimentaires et métamorphiques, l'individualisation de zones à fort potentiel d'altération. Cependant, dans les différents domaines où une approche plus locale a été tentée (Plabennec et Guingamp); on s'aperçoit qu'il est particulièrement difficile, à l'aide des méthodes employées, d'individualiser les zones à altérites des zones à formations superficielles autres (limons, loess); de même, il est particulièrement délicat de séparer les domaines altérés des domaines considérés comme sains sur roches granitiques. De ce fait, la généralisation à l'ensemble des formations plutoniques et métaplutoniques sur le Massif armoricain ne semble pas pouvoir encore être faite dans l'état actuel des investigations. Un travail de fond sur la signification des mesures spectrales aéroportées est actuellement mené au BRGM et devrait à terme, conjointement à l'utilisation de procédés nouveaux non-utilisés dans cette étude, parvenir à proposer une cartographie fiable des formations d'altération.

**En conclusion, l'utilisation des levés de géophysique aéroportée dans la caractérisation des domaines altérés sur le Massif armoricain semblent pouvoir être un outil puissant. Les résultats obtenus dans les domaines sédimentaires ou métasédimentaires sont cohérents avec les connaissances locales et peuvent vraisemblablement être généralisés à l'ensemble du Massif armoricain (une attention particulière devra néanmoins être apportée dans la distinction, dans ces**

secteurs entre une signature d'argiles d'altération et une signature de formation superficielle argilo-silteuse). Une cartographie des formations d'altération du Massif armoricain semble plus délicate dans les domaines granitiques ou granito-gneissiques.

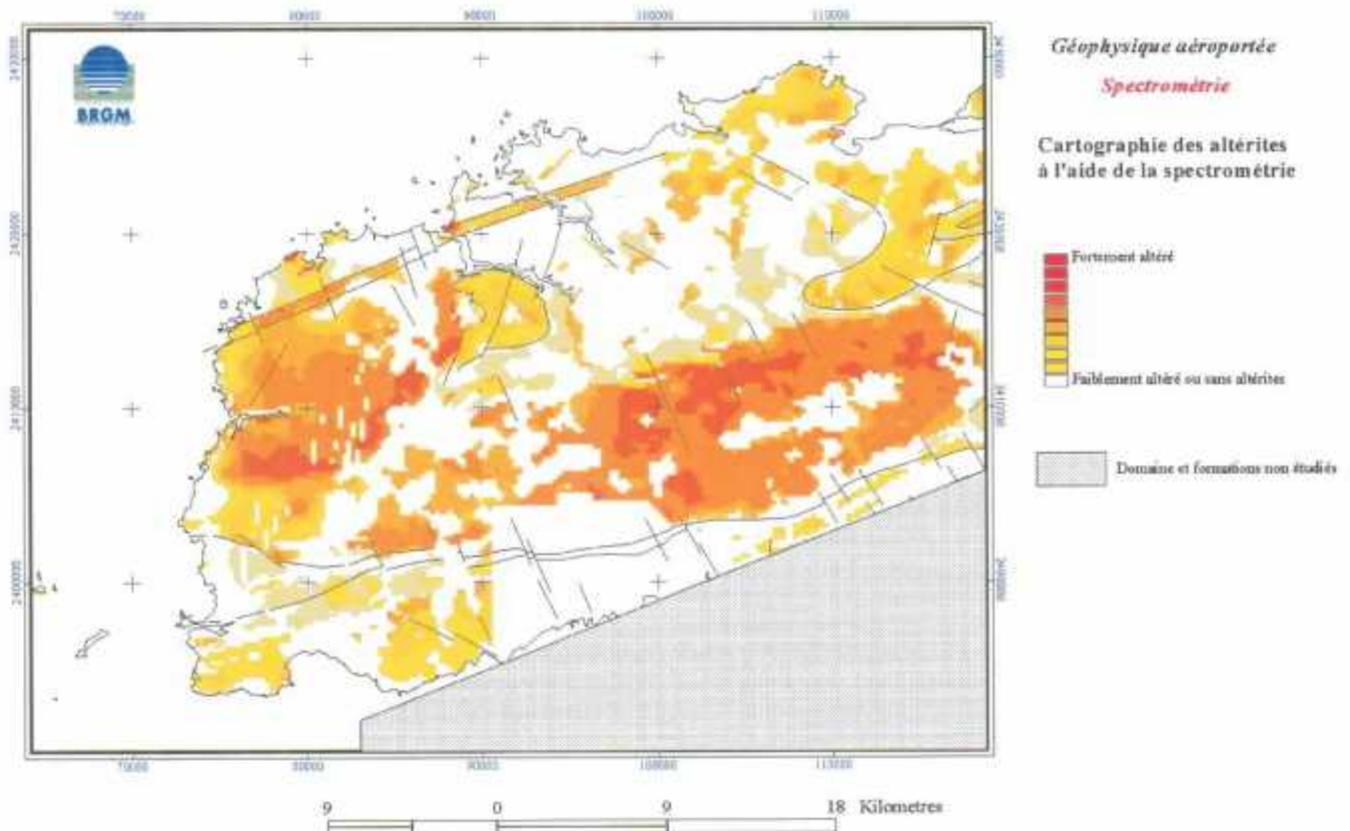
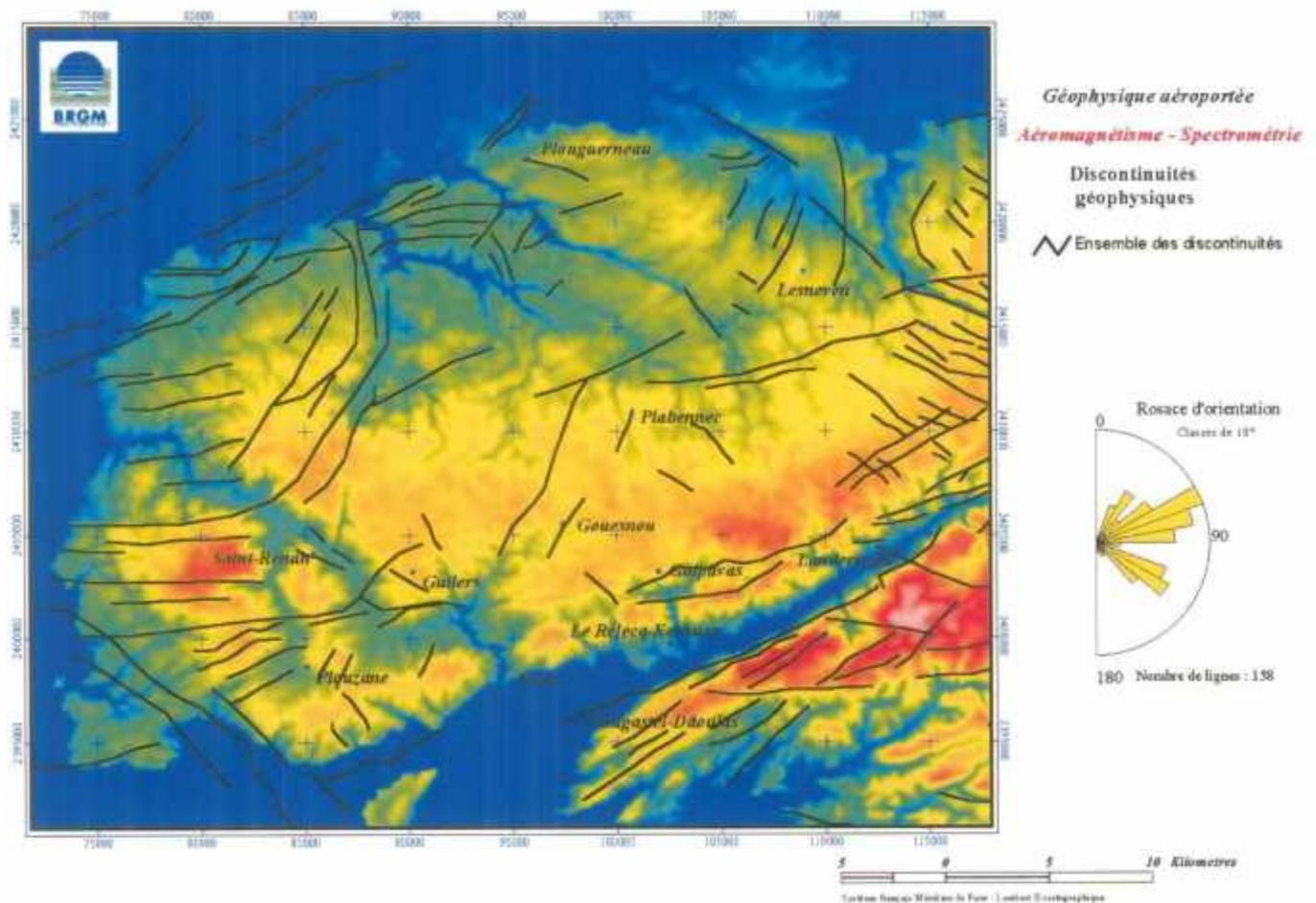


Figure 25 : Proposition d'une carte du « potentiel » de présence d'altérites à l'aide de la radiométrie aéroportée

#### 4.5. SCHEMA STRUCTURAL COMBINE

Les éléments structuraux déduits des données de géophysique aéroportée, magnétisme et radiométrie, ont été reportés sur un document unique (figure 26) et confrontés aux données de la carte géologique et de la photo interprétation.



**Figure 26 : Schéma structural géophysique combiné sur fond de MNT**

Le schéma structural combiné confirme l'importance régionale des orientations N60°-80°. De très nombreuses discontinuités magnétiques possèdent cette orientation, parfois confirmées par la radiométrie. Elles sont ainsi mises en évidence au niveau des deux grands accidents hercyniens que sont le cisaillement nord armoricain et le linéament Porspoder-Guissény, dans des couloirs de quelques centaines de mètres de large.

Au sud de l'Elorn, la spectrométrie et le magnétisme mettent en évidence de nombreuses discontinuités N60°-70°, parallèles au système de failles de l'Elorn. Certaines de ces fractures sont identifiées sur le terrain (décalage dans les séries paléozoïques), alors que d'autres, en revanche, n'ont pas été décelées lors des levés de la carte géologique. La plupart du temps, elles sont visibles en aéromagnétisme mais sont indécélables en spectrométrie. Ceci leur confère éventuellement un caractère profond, non affleurant. Il se peut aussi qu'elles soient localement masquées par des formations superficielles.

Le magnétisme et la spectrométrie montrent clairement la structuration N120°-140°. Cette orientation est celle des principaux filons basiques qui jalonnent le système de failles « Kerforme » dans l'Ouest du domaine étudié. Une population de discontinuités, de même orientation, est bien mise en évidence dans l'Est du domaine étudié alors qu'elle n'apparaît pas sur les cartes géologiques. La carte géologique au 1/50 000 n'est pas levée dans ce secteur et la carte au 1/80 000 n'accorde, en général, que peu d'importance aux accidents cassants.

Enfin, les deux approches permettent l'identification d'un certain nombre de faits géologiques, connus pour certains d'entre eux depuis les observations des terrain. Il s'agit principalement de zonations géochimiques et notamment de la zonation du complexe granite de l'Aber Ildut, de différenciation magmatiques telles que l'on peut en observer dans le Massif de Kersaint. Dans nombre de cas cependant, des discontinuités spectrométriques sont mises en évidence au sein d'ensemble considérés jusqu'alors comme homogènes.

**En conclusion, cette approche par géophysique aéroportée permet l'obtention d'un schéma structural cohérent dans l'ensemble avec les données de la géologie classique. Elle permet en outre (aéromagnétisme) de mettre en évidence des structures profondes, non affleurantes, mais dont le rôle dans l'histoire géologique d'une région peut-être primordial. Elles permettent enfin de différencier assez aisément les différentes unités géologiques et permettent des différenciations (spectrométrie) au sein d'une même unité. Ces outils peuvent ainsi servir de support majeur, notamment dans les régions où la connaissance géologique est réduite.**

## 5. Validation : Recherche de corrélations entre schéma structural géophysique et position de forages à fort débit

Le débit moyen mesuré en forage sur la zone est de  $8,9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Pour 81 % des forages, les débits sont inférieurs à  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'historgramme des débits (figure 27) montre également que 14 % des forages ont un débit situé entre 15 et  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , et 5 % des forages entre 30 à  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ces coupures ont été adoptées pour la classification et le report sur carte des débits observés (figure 27).

Les forages présentant un gros débit horaire sont en proportion très faible sur la zone étudiée (9 forages sur 1172 ont un débit supérieur à  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

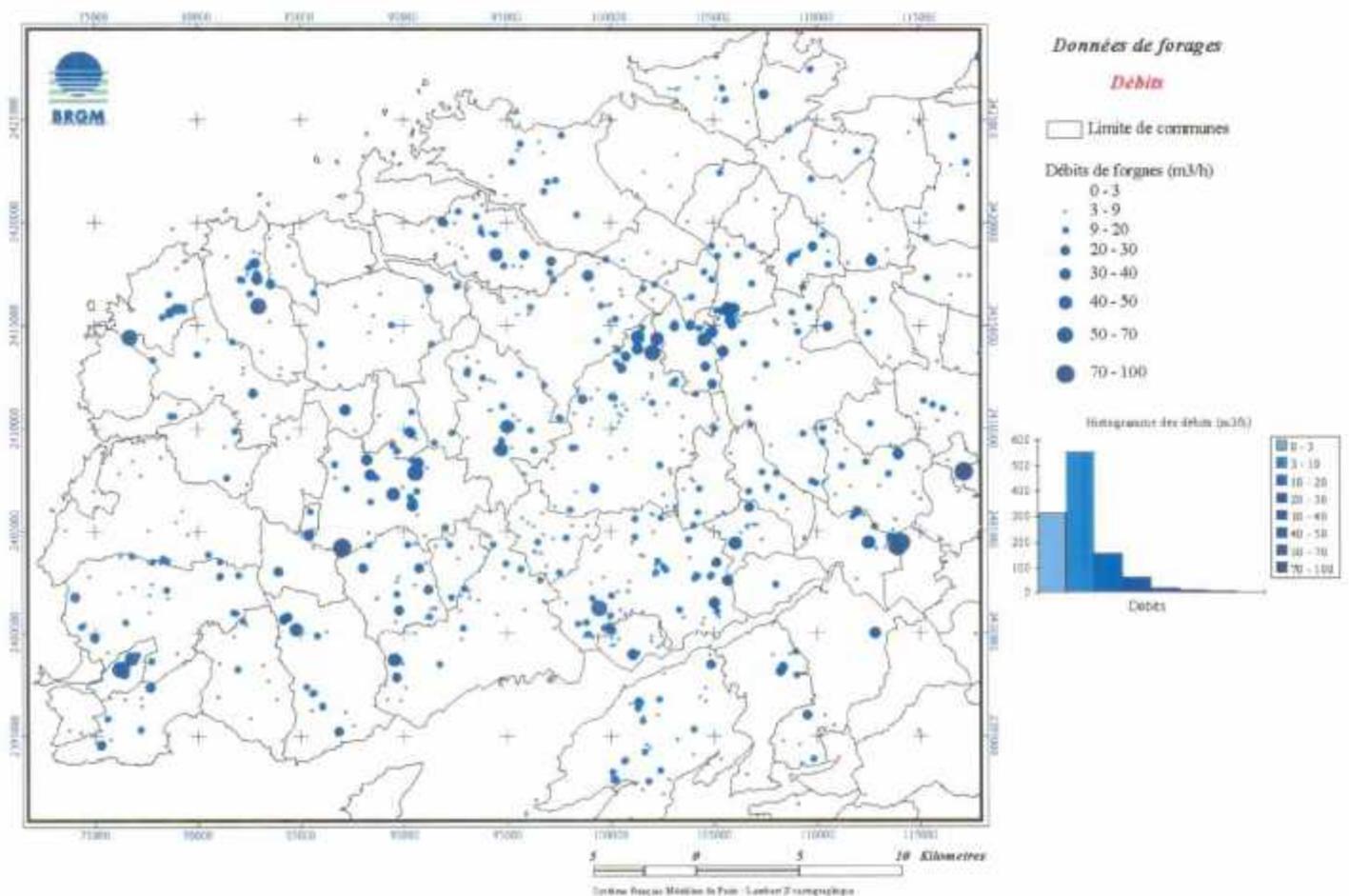


Figure 27 : Répartition des forages et débits horaires

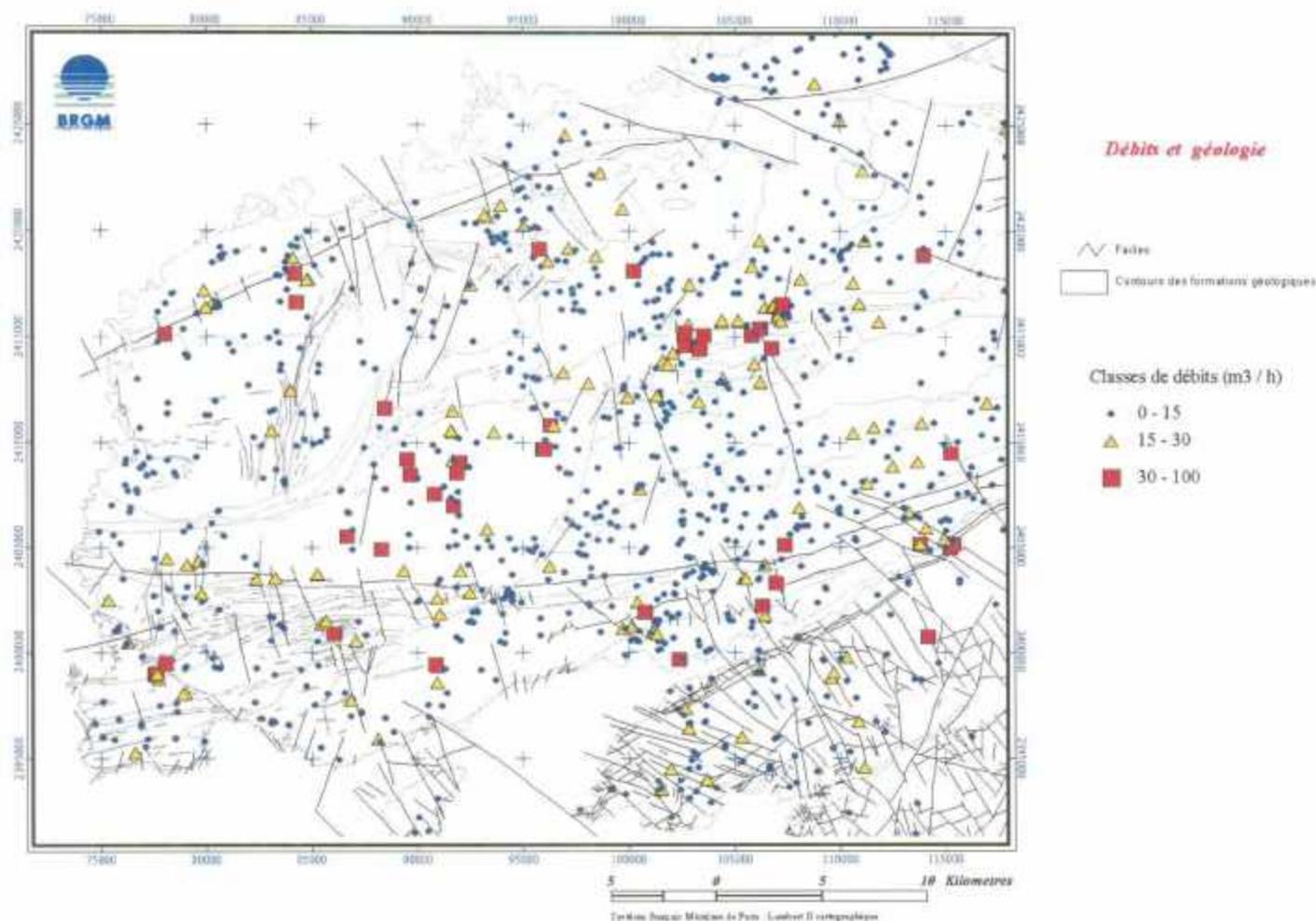
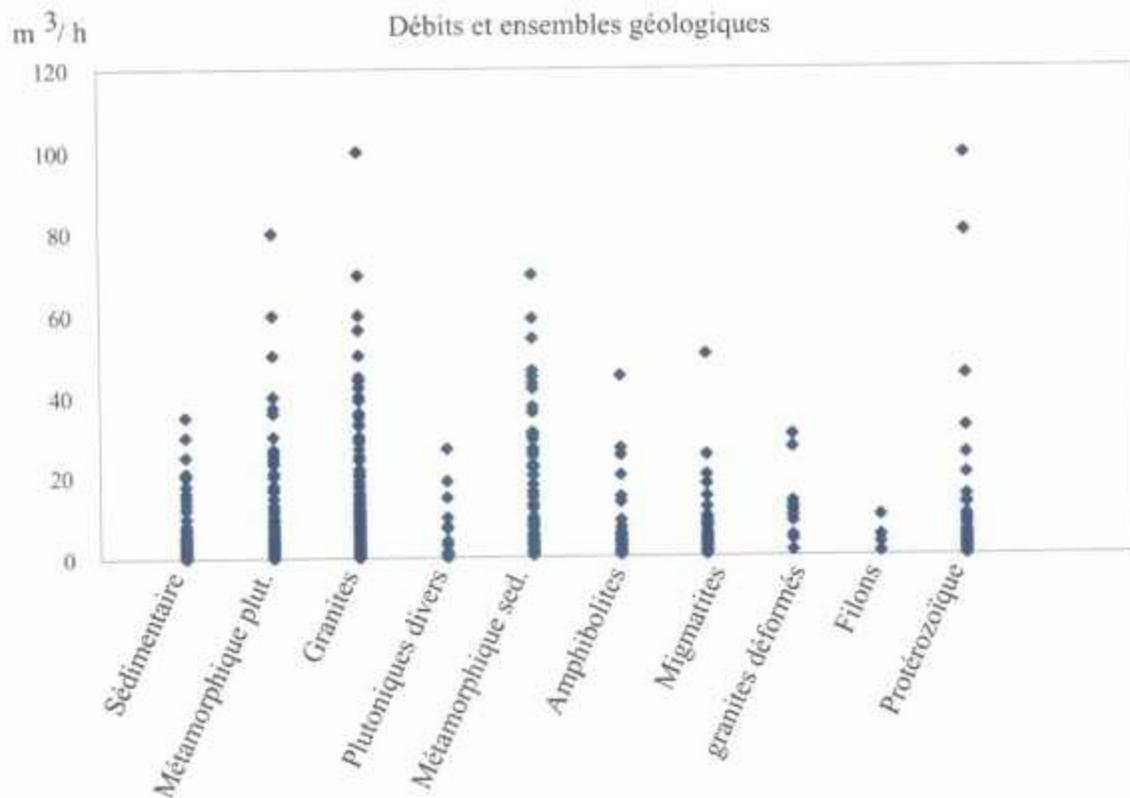


Figure 28 : Implantation des forages et géologie

Dans toutes les formations géologiques est implanté un nombre relativement important de forages. En observant le positionnement des forages à fort débit par rapport aux failles (figure 28) on observe que ces forages semblent être alignés suivant 3 directions :

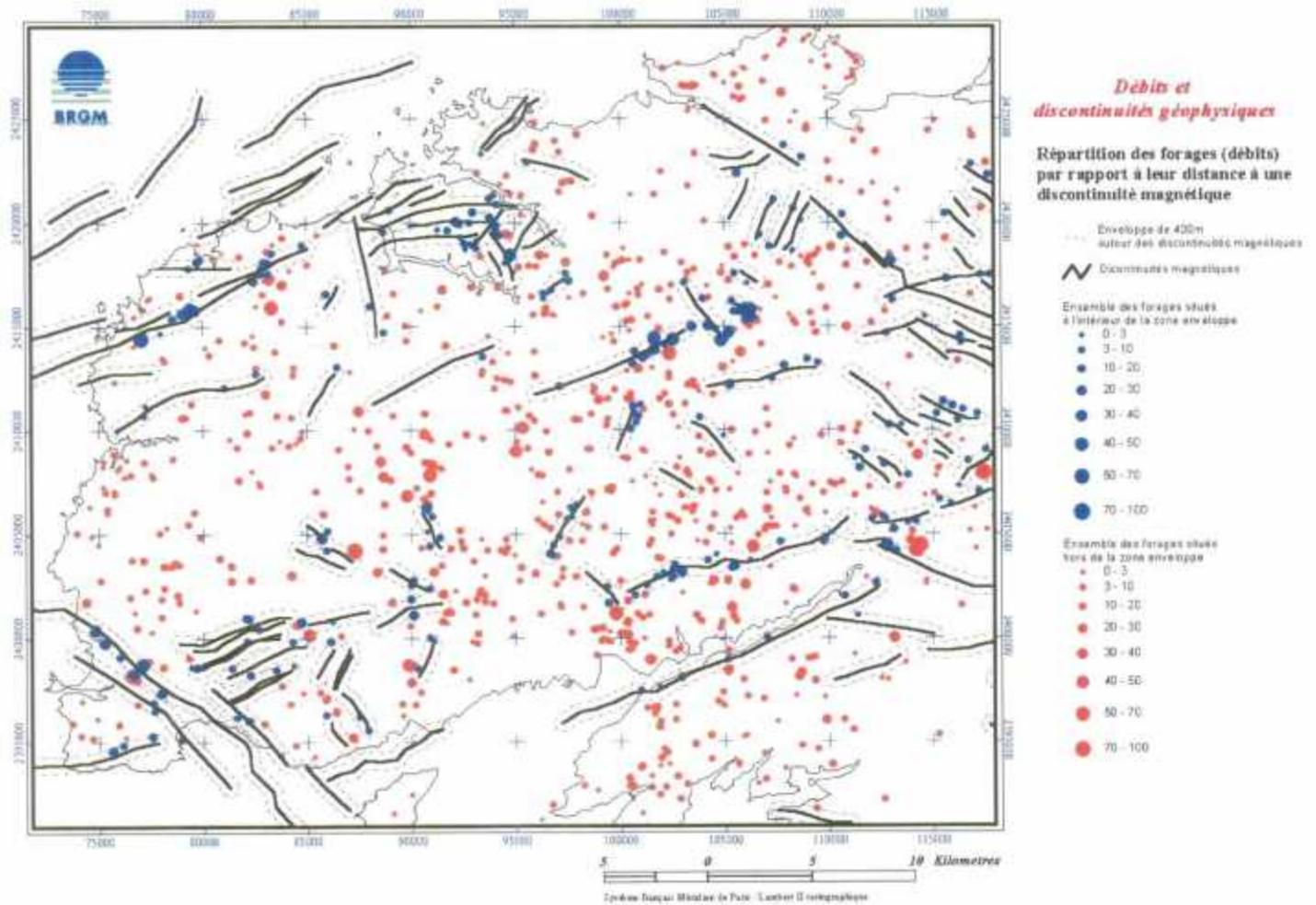
- N60-80 au NW (linéament de Porspoder-Guissény) et au SE du secteur (faille de l'Elorn),
- N150-160 à l'est et à l'ouest de Brest, perpendiculaire au cisaillement Nord Armoricaïn,
- N120-130 au SW du secteur à proximité des filons de dolérite du faisceau de Kerforme, et au NE du secteur proche d'un accident traversant les gneiss de Tréglonou.

Pour certaines lithologies, il apparaît des zones favorables (cas du granite de St-Renan, des gneiss de Lesneven et dans une moindre mesure des orthogneiss de Plounevez-Lockrist) qui semblent indépendante de la fracturation (en tous cas de celle reconnue sur le terrain).



**Figure 29 : Forages (débits) par regroupements géologiques**

L'étude des débits en fonction des grands ensembles géologiques (figure 29) présentés au chapitre n°4 « données géologiques » montre que les forages implantés sur les domaines granitiques ou à dominante granitique (métamorphiques plutoniques) sont généralement les plus productifs et le débit horaire dépasse régulièrement  $40\text{m}^3/\text{h}$ . Les forages implantés sur les formations protérozoïques et les formations métamorphiques issues de formations sédimentaires sont dans l'ensemble moins productifs mais le débit de certains forages peut dépasser  $60\text{m}^3/\text{h}$ . Les forages implantés sur les autres groupes présentent des débits beaucoup moins importants qui ne dépassent que très rarement  $30\text{m}^3/\text{h}$ .

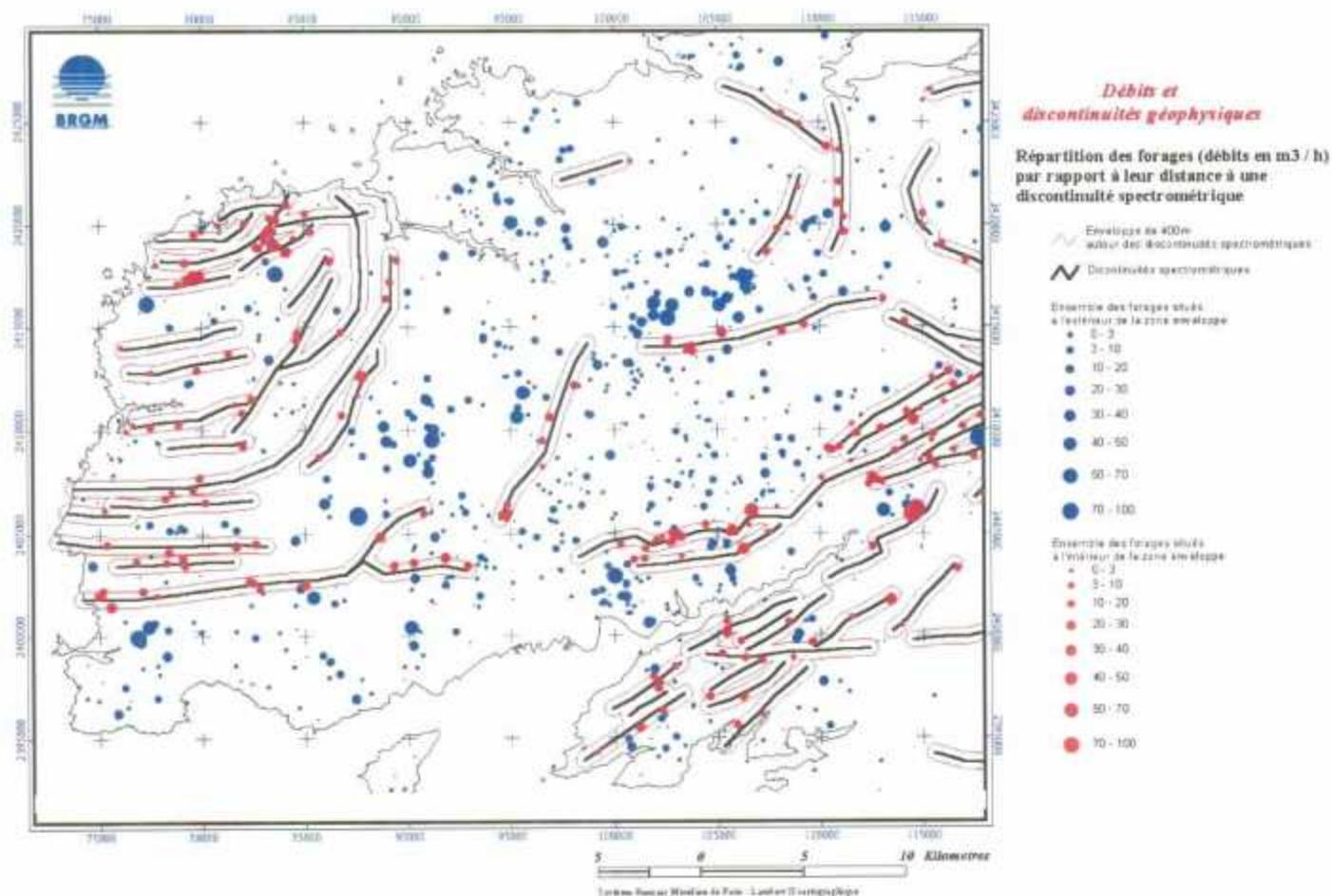


**Figure 30 : Répartition des forages par rapport aux discontinuités magnétiques**

Une zone de 400m a été définie autour des discontinuités magnétiques afin de déterminer leur influence sur les débits (figure 30). Les forages ont ensuite été subdivisés en deux ensembles :

- un groupe qui rassemble les forages situés à l'intérieur de cette enveloppe et susceptibles d'être affectés par les accidents géophysiques,
- un groupe composé des forages situés à plus de 400m de toute discontinuité et dont les débits risquent d'être, *a priori*, moins liés à la présence de discontinuités.

On peut remarquer immédiatement que les forages présentant les débits horaires les plus importants sont localisés en dehors de la zone enveloppe mais généralement à proximité de celle-ci ou dans la prolongation immédiate des discontinuités. Les forages présentant les débits moyens à forts sont principalement localisés à l'intérieur de la zone enveloppe, excepté pour les forages se situant sur le granite de St-Renan. Un nombre important de forages à forts débits qui n'étaient, *a priori*, pas localisés sur des accidents tectoniques connus, sont situés à l'aplomb de discontinuités magnétiques. Cela est particulièrement évident pour ceux localisés dans les gneiss au Nord du granite de Kersaint et ceux localisés dans les orthogneiss de Plounevez-Lockrist.



**Figure 31 : Répartition des forages par rapport aux discontinuités spectrométriques**

La même approche a été réalisée pour les discontinuités spectrométriques (figure 31). Il n'apparaît que très peu de corrélations entre les débits observés et la localisation du forage vis à vis d'une discontinuité. Cette observation rejoint les conclusions qui avaient été énoncées pour le secteur de Ploërmel.

Cependant, la spectrométrie met en évidence des discontinuités d'orientation N60°-70° dans le Sud-Est du domaine (parallèles à la faille de l'Elorn) ainsi que dans les domaines métamorphiques jouxtant le granite de Kersaint au Nord où les forages présentent des débits moyens à forts.

Les données de radiométrie aéroportée paraissent ainsi moins favorables, dans le cas du Léon, que les données du magnétisme. Elles doivent cependant être prises en considération comme critère de prospection puisqu'il semble que, localement, des forages à fort débit y sont associés.

Certains forages ne semblent pas directement corrélés avec les discontinuités du schéma structural géophysique :

- des forages à fort débit situés dans le granite de St Renan peuvent être corrélés aux accidents N150 déduits du MNT,
- des forages à moyen débit sont situés le long des filons de microgranite du Bas Léon à l'ouest du secteur.

## **6. Conclusion**

Ce second test a permis d'affiner la démarche, élaborée sur la zone de Ploërmel (Morbihan), basée sur le traitement combiné des données magnétiques et spectrométriques. Cette démarche ayant pour but de mettre en évidence de discontinuités géophysiques susceptibles de constituer des guides de prospection hydrogéologique.

L'existence d'éléments structuraux issus de cette interprétation est largement confirmée par comparaison avec des données des cartes géologiques ou avec des discontinuités issues de l'interprétation de l'ombrage du MNT (linéaments).

Schéma structural géologique et schéma structural géophysique sont donc largement cohérents entre eux. De plus, dans nombre de cas, les levés permettent de déceler des structures (zonations géochimiques) et des failles jusqu'à présent non reconnues lors des levés de terrains.

Cet outil géophysique est par conséquent un guide utile dans toute investigation géologique, même sur des secteurs déjà « connus » par ailleurs.

En ce qui concerne l'utilisation des données de géophysique aéroportée dans la localisation de discontinuités susceptibles de constituer des drains privilégiés, les résultats obtenus en considérant les données de magnétisme montrent que les forages à fort débit sont localisés à l'aplomb ou à proximité immédiate de discontinuité.

Les données du magnétisme aéroporté peuvent donc très largement concourir à l'établissement d'un schéma qui pourra guider les recherches en eaux souterraines.

Les données de spectrométrie apportent une contribution moindre dans ce domaine. En revanche, elles pourront largement, à terme, être utilisées dans la détermination des domaines altérés susceptibles de constituer des réservoirs capacitifs et transitionnels vers le milieu fissuré plus profond.

Enfin, les nouveaux outils d'interprétation structurale automatique, en cours d'élaboration dans le cadre du projet de recherche "Méthodes Géophysiques au service de la cartographie numérique et 3D" devraient permettre d'optimiser cette étape en la rendant à la fois plus objective et plus exhaustive.

## **Bibliographie**

- Bonnet S., 1998. Tectonique et dynamique du relief : le socle armoricain au Pléistocène. Thèse Univ. Rennes, Mémoires Géosciences Rennes, 86, 352p.
- Blakely, R.J. and Simpson, R.W., 1986. Locating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494-1498.
- BRGM, 1999. Cartographie quantitative de la ressource en eau souterraine - Carte à 1/50 000 PLABENNEC-EST (Finistère Nord) – Rapport BRGM R40519, 23p., 1 tab., 10 planches, 7 figures.
- Castaing, C. and Debeglia, N., 1992. A new method for combining gravimetric and geological data. *Tectonophysics*, 204, 151-162.
- Debeglia N., Perrin J., 2000. Démonstration de la contribution de la cartographie aéromagnétique basse altitude : haute résolution à la maîtrise des ressources en eaux souterraines et en matériaux de la Bretagne. Etude de faisabilité. Apports des levés géophysiques aéroportés pour la recherche et la protection des ressources en eau : application à la feuille Ploërmel (Morbihan). BRGL/RP-50583-FR, 41p., 19 fig., 1 tabl.
- Durand S., 1960. Le Tertiaire de Bretagne. Etude stratigraphique, sédimentologique et tectonique. Thèse Etat (Géologie), Univ. Rennes, Mem. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, Rennes, 12, 389p.
- Estéoule-choux J., 1967. L'Eocène du Massif armoricain. Données nouvelles apportées par l'étude des minéraux argileux. Applications paléogéographiques et paléoclimatiques. Colloque sur l'Eocène, Paris, mai 1968, Mem BRGM, 58, 416-425.
- Estéoule-Choux J., 1968b. Contribution à l'étude des argiles du Massif armoricain. Mem. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, Rennes, 14, 319p.
- Mathieu F. et Vachette Ch. Evaluation of groundwater resources (GS.10) Letlhakeng-botlhapatlou groundwater project. Geophysical investigation in area D. Rapport BRGM 91 GPH 005.
- Ollivier-Pierre, 1980. Etudes palynologiques (spores et pollens) de gisements paléogènes du Massif armoricain. Stratigraphie et paléogéographie. Mem. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, 25, 239p.
- Quesnel F., 1996. Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Doc BRGM N°263, 266p et annexes.
- Thomas E., 1999. Evolution cénozoïque d'un domaine de socle : le Massif armoricain. Apport de la cartographie des formations superficielles. Thèse Univ. Rennes, 2 Volumes, 300p et annexes.

Wyns R., 1991a. Evolution tectonique du bâti armoricain oriental au Cénozoïque d'après l'analyse des paléosurfaces continentales et des formations géologiques associées. *Géologie de la France*, 3, 1991, 11-42

Wyns R., 1996b. Essai de quantification de la composante verticale de la déformation finie cénozoïque en Poitou, Liomousin et dans la plate-forme Nord-aquitaine d'après l'analyse des paléosurfaces continentales et des sédiments associés. In : Colloque Quantification de la tectonique et de l'eustatisme à partir d'informations stratigraphiques et géomorphologiques, Réunion SGF - ASF, Rennes, Octobre 1996.

Wyns R., Guillocheau F., 1999. Géomorphologie grande longueur d'onde, altération, érosion et bassins épicontinentaux. In : Colloque GéoFrance 3D, Lyon, 23-24 novembre 1999, 1999. Editions BRGM, 103-108.

Références des cartes géologiques consultées :

**Cartes au 1/50 000 :**

N° 237 Plouarzel-Ouessant : Chauris L. et Hallégouët B., 1994 - Carte géol. France (1/50000), feuille **Plouarzel - Ile d'Ouessant** (237), Orléans: BRGM. Notice explicative par L. Chauris avec la collaboration de B. Hallégouët (1994), 132p.

N° 238 Plabennec : Thomas E., Outin J.M., Hallégouët B., à paraître – Carte géol. France (1/50 000), feuille **Plabennec** (238). Orléans : BRGM. Notice explicative par J.M. Outin avec la collaboration de E. Thomas, B. Hallégouët, Y. Quété, , M. Le Goffic , J.M. Rivière , M. Ballèvre (édition fin 2002).

N° 273 Le Conquet : Chauris L. et Hallégouët B., 1989 - Carte géol. France (1/50000), feuille **Le Conquet** (273), Orléans: BRGM. Notice explicative par L. Chauris et B.Hallégouët (1989), 69p.

N° 274 Brest : Chauris L. et Hallégouët B., 1980 - Carte géol. France (1/50000), feuille **Brest** (274). Orléans: BRGM. Notice explicative sous la coordination de L. Chauris et Y. Plusquellec (1980), 51p.

N°275 Le Faou : Babin C., Garreau J., Melou M., Pusquellec Y., Morzadec P., Pelhâte A., Chauris L., Thonon P., Darboux J.R., Hallégouët B., Guigues J., 1982 - Carte géol. France (1/50000), feuille **Le Faou** (275). Orléans: BRGM.

N° 201 St-Pol-de-Léon Chauris L., Marcoux E., Hallégouët B., Bouysse P., 1999 - Carte géol. France (1/50000), feuille **Saint-Pol-de-Léon** (201), Orléans: BRGM. Notice explicative par L. Chauris et E. Marcoux avec la collaboration de P. Bouysse, B. Hallégouët, E. Egal, V. Johan, E. Le Goff et D. Thiéblemont (1999).

**Cartes au 1/80 000 :**

N° 57 Brest : Chauris L. et Hallégouët B., 1972 - Carte géol. France (1/80000), feuille **Brest** (57)(partie pays de Léon), 3<sup>e</sup> édit., Orléans: BRGM.

N° 40 et 56 Plouguerneau - Ouessant : Chauris L., 1966a - Carte géol. France (1/80000),  
feuille **Plouguerneau-Ouessant** (40 et 56), 2<sup>e</sup> Édit., Orléans : BRGM

N° 58 Morlaix : Pruvost P., Delattre Ch., Jérémine E., Waterlot G. 1962 - Carte géol.  
France (1/80000), feuille **Morlaix** 2<sup>e</sup> édit., Orléans: BRGM.

**BRGM**  
**SERVICE DES ACTIONS REGIONALES**  
**Service Géologique Régional de Bretagne**  
2 rue de Jouanet – 35700 Rennes - Tél. 02.99.84.26.70.- Fax. 02.99.84.26.79.