







# SILURES Bretagne Valorisation des données de géophysique aéroportée

Rapport d'avancement de l'année 3

BRGM/RP-53621-FR Janvier 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2005 EAUC10

B. Mougin, N. Debeglia, J. Perrin et E. Thomas



Mots clés : SILURES, eaux souterraines, hydrogéologie, géologie, géophysique aéroportée, forages, Côtes d'Armor, Finistère, Morbihan, Ille-et-Vilaine, Bretagne.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : B. MOUGIN, N. DEBEGLIA, J. PERRIN et E. THOMAS (2005) - SILURES Bretagne - Valorisation des données de géophysique aéroportée - Rapport d'avancement de l'année 3 - BRGM/RP-53621-FR - 85 p., 11 tabl., 44 fig.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le programme SILURES Bretagne propose la création d'un Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines au niveau de la région Bretagne. Il a pour but d'interpréter l'ensemble des sondages archivés dans la Banque du Sous-Sol, gérée par le BRGM, de créer des cartes de la base des altérites et du milieu fissuré, de croiser ces données avec les résultats d'une campagne de levés géophysiques aéromagnétiques et radiométriques, et de créer une base de données. Cet ensemble de tâches doit permettre, à terme, de mieux gérer les ressources en eau souterraine de Bretagne.

Ce programme, d'une durée de 5 ans, est réalisé grâce à la collaboration de la Région Bretagne, des Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère et du Morbihan et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Ce rapport constitue un état d'avancement de la 3<sup>ème</sup> année du projet SILURES Bretagne qui s'est focalisée sur l'interprétation des données géophysiques aéroportées (magnétisme et spectrométrie).

Le travail réalisé a permis, à partir des données brutes mesurées, de tracer des discontinuités structurales grâce à un outil automatique développé dans le cadre d'un programme de recherche du BRGM. Ces discontinuités ont ensuite été corrélées avec les résultats des forages d'eau (débit obtenu rapporté à la profondeur) pour mettre en évidence des directions de discontinuités favorables ou défavorables à l'implantation de forages d'eau :

- au niveau de la Bretagne, les directions de discontinuités à N0-10° et N70-80° sont favorables, tandis que la direction N120-130° est défavorable ;
- plus localement dans le secteur du Léon, les directions N40-50° et N100-110° sont défavorables et les directions N10-20°, N130-140° et N160-170° sont favorables.

Ces orientations défavorables sont en bonne adéquation avec les connaissances des systèmes de contraintes s'exerçant sur le Massif armoricain avec une compression globalement orientée Nord-Sud qui tend actuellement à « fermer » ces grandes fractures orientées Ouest-Est. Dans le même temps, les structures plus ou moins perpendiculaires à ces directions tendent plutôt à s'ouvrir et apparaissent comme des directions plus favorables.

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, le travail d'interprétation des données se finalisera au cours de la 4<sup>ème</sup> année du projet (interprétation des données de forages et des hydrogrammes des rivières). Il sera suivi d'une organisation et d'un archivage des données, puis d'un travail de réalisation et édition de cartographie de synthèse en année 5.

## Sommaire

1.	Rappel du contexte et des objectifs du projet SILURES Bretagne	8
	1.1. CONTEXTE	8
	1.2. OBJECTIF	9
	1.3. ORGANIGRAMME TECHNIQUE DU PROJET	9
2.	Description des données géophysiques	. 12
	2.1. MAGNÉTISME	. 12
	2.2. RADIOMÉTRIE SPECTRALE (SPECTROMÉTRIE)	. 13
	2.3. DEUX TYPES DE DONNÉES COMPLÉMENTAIRES	. 13
3.	Rappel sur la méthode de travail	. 14
	3.1. REMARQUE	. 14
	3.2. RAPPELS DES TRAVAUX RÉALISÉS	. 14
	3.3. TRAVAIL EFFECTUÉ AU COURS DE LA 3 <sup>ÈME</sup> ANNÉE	. 15
4.	Traitement automatique des données géophysiques (magnétisme et spectrométrie) et du modèle numérique de terrain	. 16
	4.1. RAPPEL SUR L'OUTIL DE TRAITEMENT AUTOMATIQUE	. 16
	4.2. RÉALISATION DU TRAITEMENT AUTOMATIQUE SUR L'ENSEMBLE DE LA BRETAGNE	. 28
	4.3. CONCLUSION	. 33
5.	Corrélation avec les forages d'eau	. 34

7.	Etude statistique sur la zone du Léon 7.1. DONNÉES DES FORAGES 7.2. ETUDE STATISTIQUE EN 18 CLASSES D'AZIMUTS 7.3. SYNTHÈSE GRAPHIQUE DE L'ÉTUDE SUR LE LÉON Conclusion	<b>76</b> 76 78 83 <b>97</b>
7.	Etude statistique sur la zone du Léon 7.1. DONNÉES DES FORAGES 7.2. ETUDE STATISTIQUE EN 18 CLASSES D'AZIMUTS 7.3. SYNTHÈSE GRAPHIQUE DE L'ÉTUDE SUR LE LÉON	76 76 78 83
7.	Etude statistique sur la zone du Léon   7.1. DONNÉES DES FORAGES   7.2. ETUDE STATISTIQUE EN 18 CLASSES D'AZIMUTS	<b>76</b> 76 78
7.	Etude statistique sur la zone du Léon 7.1. DONNÉES DES FORAGES	<b>76</b> 76
7.	Etude statistique sur la zone du Léon	76
6.	Synthèse : utilisation des résultats comme guide d'implantation de forages d'eau	63
	5.5. RÉSULTATS SUR LA BRETAGNE	57
	5.4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE STATISTIQUE DES ATTRIBUTS DES DISCONTINUITÉS GÉOPHYSIQUES	48
	5.3. RÉSULTATS OBTENUS	42
	5.2. UTILISATION DE L'OUTIL "FAVORABILITÉ LIGNE"	37

### Liste des figures

Figure 1 - Organigramme technique du projet SILURES Bretagne	10
Figure 2 - Regroupement des discontinuités élémentaires en discontinuités « fractures »	20
Figure 3 - Regroupement des discontinuités « fractures » en « lignes » brisées	22
Figure 4 - Etapes de traitement des « lignes »	26
Figure 5 - Exemple d'analyse structurale détaillée effectuée sur le rapport K/Th	29
Figure 6 - Exemple d'analyse structurale régionale effectuée sur le rapport K/Th	30
Figure 7 - Histogramme des Q/P des forages de Bretagne et définition des classes	36
Figure 8 - Principe de l'outil "favorabilité ligne"	39
Figure 9 - Exemple de fichier Excel obtenu à la suite de l'utilisation de SYNARC©	41
Figure 10 - Calcul de la direction moyenne sous SYNARC ©	43
Figure 11 - Différence des classes normalisées pour les 3 méthodes (magnétisme, spectrométrie et linéaments)	45
Figure 12 - Statistique de répartition des paramètres Q/P/F et Azimut moyen associés aux Lignes Mag	50
Figure 13 - Histogrammes du paramètre Q/P/F associé aux Lignes Mag (par secteurs angulaires d'Azimut de +/- 13°)	47
Figure 14 - Distribution différentielle du paramètre Q/P/F associé aux Lignes Mag (analyse par secteur d'azimut)	48
Figure 15 - Distribution différentielle groupée de Q/P/F associé aux Lignes Mag (Classes regroupées en 4 groupes d'effectif comparable)	50
Figure 16 - Principe de recouvrement des classes	57
Figure 17 - Index de favorabilité des linéaments pour 27 classes	58
Figure 18 - Index de favorabilité des segments CT pour 27 classes	58
Figure 19 - Index de favorabilité des segments "Mag" pour 27 classes	59
Figure 20 - Index de favorabilité des lignes "CT" pour 27 classes	59
Figure 21 - Index de favorabilité des linéaments topographique pour la Bretagne	61
Figure 22 - Index de favorabilité des segments "CT" pour la Bretagne	61
Figure 23 - Index de favorabilité des segments "Mag" pour la Bretagne	62
Figure 24 - Favorabilité des linéaments MNT bretons en fonction de leur orientation	66
Figure 25 - Favorabilité des segments CT bretons en fonction de leur orientation	68
Figure 26 - Favorabilité des segments Mag bretons en fonction de leur orientation	69
Figure 27 - Représentation des discontinuités favorables en Bretagne	72
Figure 28 - Représentation des discontinuités défavorables en Bretagne	73

Figure 29 - Représentation des secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau en Bretagne	74
Figure 30 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables sur la Bretagne	75
Figure 31 - Histogramme des Q/P des 1215 forages du Léon et définition des classes	77
Figure 32 - Histogramme de Q/P/F des segments CT	79
Figure 33 - Histogrammes de l'azimut des segments CT	80
Figure 34 - Exemples d'histogrammes d'écarts à la distribution moyenne	81
Figure 35 - Index de favorabilité des segments "CT" pour la Zone "Léon"	81
Figure 36 - Index de favorabilité des linéaments pour la Zone "Léon"	82
Figure 37 - Index de favorabilité des segments "Mag" pour la Zone "Léon"	83
Figure 38 - Favorabilité des linéaments en fonction de leur orientation (secteur du Léon)	86
Figure 39 - Favorabilité des segments CT en fonction de leur orientation (Léon)	88
Figure 40 - Favorabilité des segments Mag en fonction de leur orientation (Léon)	89
Figure 41 - Représentation des discontinuités favorables à l'implantation de forages d'eau (secteur du Léon)	92
Figure 42 - Représentation des discontinuités défavorables à l'implantation de forages d'eau (secteur du Léon)	94
Figure 43 - Représentation des secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau (secteur du Léon)	95
Figure 44 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables dans le Léon	96

#### Liste des tableaux

Tableau 1 - Paramètres utilisés pour l'analyse structurale automatique en Bretagne	31
Tableau 2 - Nombre de discontinuités élémentaires, de lignes et de segments de lignes résultant de l'analyse automatique des variables traitées sur tout le Massif Armoricain	32
Tableau 3 - Classement des 10 649 forages bretons en fonction de leur productivité	36
Tableau 4 - Caractéristiques des familles de discontinuités étudiées	42
Tableau 5 - Caractéristiques des classes des attributs des discontinuités géophysiques	49
Tableau 6 - Classification et code couleur des index de favorabilité	63
Tableau 7 - Résultats finaux pour l'étude sur la Bretagne en 18 classes	63
Tableau 8 - Classement des 1215 forages du Léon en fonction de leur productivité	78
Tableau 9 - Paramètres employés pour l'étude Léon	78
Tableau 10 - Classification et code couleur des index de favorabilité	83
Tableau 11 - Résultats finaux pour l'étude sur le Léon en 18 classes	84

## 1. Rappel du contexte et des objectifs du projet SILURES Bretagne

#### 1.1. CONTEXTE

La gestion des ressources en eau implique la prise en compte des eaux souterraines. Celles-ci interviennent de façon non négligeable, voire prépondérante, dans l'alimentation des rivières, le transfert des éléments dissous et la satisfaction des besoins. En milieu de socle tel que la Bretagne, la prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du sous-sol et des paramètres qui régissent l'emmagasinement et l'écoulement des eaux souterraines reste difficile.

Des données existent (forages recensés, régime des cours d'eau...), des méthodologies ont été mises au point et testées (typologie des bassins versants, modélisation des écoulements...), et des outils d'acquisition des paramètres de terrain tels que la porosité sont disponibles (géophysique par résonance magnétique protonique - RMP). De plus, une campagne de prospection géophysique aéroportée a été réalisée au cours de l'été 1998 pour le compte du Ministère de l'Industrie. Un précédent levé aéromagnétique avait été également réalisé, en 1992, dans la région de Saint-Malo, pour le compte du CNRS/INSU et du BRGM. L'ensemble constitue une importante source d'informations sur la constitution et la nature du sous-sol.

Compte-tenu de ces différents constats, le projet SILURES (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines) a été mis en place par le BRGM Bretagne en collaboration avec le Conseil Régional Bretagne, les Conseils Généraux du Morbihan, du Finistère et des Côtes d'Armor, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, et la Direction Régionale de l'Environnement Bretagne.

Ce projet SILURES se décompose en trois projets menés en parallèle :

- <u>SILURES Bretagne</u> qui propose à partir des données existantes (aéromagnétisme, forages recensés, régime des rivières...) mises en forme, réinterprétées et complétées - la création d'une base de données sur les eaux souterraines couvrant l'ensemble du territoire régional ;
- <u>SILURES Bassins versants</u> qui est une application du projet SILURES Bretagne à certains bassins versants, avec une acquisition de données nouvelles afin de réaliser des cartes de paramètres spécifiques tels que l'extension des différents réservoirs aquifères, la porosité des réservoirs par géophysique, les débits instantanés obtenus en foration ou les volumes d'eau stockés ;
- <u>SILURES Suivi</u> qui va concevoir un réseau de surveillance pour palier au manque de données fiables concernant l'amplitude des fluctuations saisonnières des différentes entités aquifères du territoire breton, et ainsi anticiper certaines mesures et avoir une meilleure appréciation de la réserve.

Le présent rapport détaille l'avancement du projet SILURES Bretagne.

#### 1.2. OBJECTIF

L'objectif du projet SILURES Bretagne consiste, par la valorisation des données existantes (aéromagnétisme, forages archivés à la banque des données en soussol...) et l'acquisition de données nouvelles (forages non localisés, régime des cours d'eau, pluviométrie...), à réaliser une base de données sur les eaux souterraines permettant d'approcher le mode de fonctionnement des entités aquifères à l'échelle de la Bretagne, le but principal étant d'appréhender la vitesse de renouvellement de l'eau des différentes nappes dans une optique de réhabilitation de la qualité des eaux souterraines et des rivières.

Cette base de données permettra la création de documents d'aide à la décision à l'échelle de la région Bretagne (1/250 000), avec notamment la création des cartes suivantes :

- secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine doit être encouragée (zones productives),
- zones où l'inertie du milieu physique est la plus faible favorisant les actions de reconquête de la qualité de l'eau à court terme.

#### **1.3. ORGANIGRAMME TECHNIQUE DU PROJET**

Le durée du projet a été fixée à cinq ans avec la répartition suivante :

- les trois premières années sont dédiées à l'interprétation et à la valorisation des données,
- la quatrième année à la création de la base de données,
- et la cinquième année à la création et à l'édition des documents de synthèse.

L'organigramme technique du projet est rappelé en figure 1.

Les cartes de synthèses définies au dernier paragraphe ci-dessus (point 1.2.) seront réalisées grâce à plusieurs cartes de paramètres (définies en bas de l'organigramme de la figure 1). La création de ces cartes passe par trois phases d'interprétation et de valorisation des données existantes :

- la valorisation des données géophysiques aéroportées (aéromagnétisme et spectrométrie),
- l'interprétation des données de forages,
- et la modélisation des hydrogrammes des rivières.



Ces trois phases seront réalisées au cours des trois premières années du projet.

L'objet de ce rapport est de faire l'état d'avancement de la 3<sup>ème</sup> année du projet, et de se focaliser sur la présentation des résultats issus de la valorisation des données de géophysique aéroportée.

## 2. Description des données géophysiques

De mi-juillet à fin octobre 1998, le BRGM a conduit une campagne 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. Des données magnétiques et de radiométrie spectrale ont ainsi été acquises. Les mesures et la compilation de cette campagne « Massif Armoricain » ont été réalisés par la compagnie Sander, sous la supervision du BRGM. Les mesures ont été réalisées avec une garde au sol moyenne de 120 m, l'espacement des lignes de vols étant de 250, 500 ou 1000 m, suivant les zones. Des traverses espacées de 10 km recoupent perpendiculairement ces lignes. Le positionnement a été réalisé par GPS différentiel complété par les enregistrements d'un altimètre radar.

Précédemment, une campagne aéromagnétique avait été réalisée sur la baie de Saint-Brieuc et la région de Saint-Malo. Ce levé a été réalisé en 1992, par la même société Sander, pour le compte de l'INSU/CNRS et du BRGM. Ce levé a été réalisé à une altitude constante de 350 m au-dessus de la mer. L'espacement des lignes de vol était de 500 m et les lignes étaient recoupées par des traverses espacées de 2 km. Ces données étant de qualité satisfaisante, quoiqu'un peu moins détaillées que celles du levé « Massif Armoricain », principalement du fait d'une altitude de vol en moyenne un peu plus élevée, ce secteur n'a pas été revolé en 1999. On ne dispose donc dans cette zone que des données aéromagnétiques, la radiométrie spectrale n'ayant pas été acquise à l'occasion du levé Saint-Malo.

#### 2.1. MAGNÉTISME

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.

La prospection aéromagnétique a pour objet la mesure des variations du champ magnétique terrestre (exprimées en nanoTesla) causées par des modifications des propriétés magnétiques des structures et formations géologiques. 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.

Lors du levé « Massif Armoricain », 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 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. Les données du levé Saint-Malo ont été acquises et compilées d'une manière similaire.

#### 2.2. RADIOMÉTRIE SPECTRALE (SPECTROMÉTRIE)

En hydrogéologie, la radiométrie pourra être utilisée pour aider à compléter la cartographie géologique, localiser les accidents et analyser l'altération.

La radiométrie spectrale permet d'évaluer les contrastes de concentration des radioéléments (uranium : U, thorium : Th, potassium : K) 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. On parle de comptage total lorsque la contribution des trois radioéléments, U, K et Th, n'est pas différenciée. Dans la suite du rapport le comptage total sera noté « CT ».

Les données de radioactivité naturelle du levé « Massif Armoricain » ont été enregistrées avec un spectromètre gamma à 256 canaux, corrigées 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. 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 est 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. Le comptage total est exprimé en unité de débit de dose absorbé (nano Gray / heure).

#### 2.3. DEUX TYPES DE DONNÉES COMPLÉMENTAIRES

Les données aéromagnétiques signent des structures géologiques et des accidents profonds tandis que la radiométrie spectrale permet de localiser des contours géologiques et des accidents plus superficiels (méthode peu pénétrante).

L'utilisation parallèle des deux méthodes est donc complémentaire.

## 3. Rappel sur la méthode de travail

#### 3.1. REMARQUE

Le cahier des charges initial du projet SILURES Bretagne (phase « Valorisation des données de géophysique aéroportée ») prévoyait : la mise à disposition des données géophysiques, puis leur traitement par digitalisation manuelle et enfin une corrélation des tracés effectués avec les débits des forages d'eau.

Par rapport à ce cahier des charges initial, l'interprétation des données a été plus complète et moins subjective. Les résultats obtenus et décrits ci-après sont donc largement supérieurs à ceux prévus dans le cahier des charges initial.

#### 3.2. RAPPELS DES TRAVAUX RÉALISÉS

Les travaux à effectuer sur l'ensemble de la région Bretagne ont été organisés en plusieurs tâches réparties sur les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> années du projet SILURES Bretagne. Au cours de la 2<sup>ème</sup> année, les travaux suivants ont été réalisés (cf. détail dans le rapport d'avancement de l'année 2 BRGM/RP-52825-FR) :

- acquisition du MNT de la Bretagne et traitement (\*),
- analyse structurale automatique du MNT puis valorisation,
- traitement et interprétation des données magnétiques et radiométriques,
- transfert des données dans un SIG,
- analyse structurale automatique des données radiométriques.

(\*) Le modèle numérique de terrain (MNT) produit par l'IGN renseigne l'altitude du sol sur chaque maille de 50 \* 50 m sur la Bretagne. Cette donnée est essentielle à la compréhension des anomalies géophysiques. En effet, les linéaments naturels déduits du MNT (tracé des fractures supposées existantes et recoupant la surface du sol) seront croisés avec les discontinuités géophysiques issues des méthodes du chapitre 2 afin de confirmer leur existence et leur caractère plus ou moins profond.

#### 3.3. TRAVAIL EFFECTUÉ AU COURS DE LA 3<sup>ÈME</sup> ANNÉE

Au cours de la 3<sup>ème</sup> année du projet :

- la valorisation du MNT s'est achevée (secteur Sud-Ouest des Côtes d'Armor et Est du Finistère),
- une analyse structurale automatique des données magnétiques a été opérée,
- les données « non-continues » ont été intégrées dans le SIG,
- les données structurales ont été corrélées avec les débits des forages (cf. explications du chapitre 5),
- les données obtenues ont été représentées sur des cartes de synthèse (cf. explications du chapitre 6) et le présent rapport a été rédigé.

Les données dites « non-continues » intégrées dans le SIG sous Arcview sont :

- les données des forages et les valeurs de débit,
- les linéaments naturels issus du MNT,
- les contours géologiques numériques et les failles extraits de la carte géologique à 1/250 000,
- les résultats des analyses structurales automatiques des données magnétiques et spectrométriques (lignes et segments de ligne).

# 4. Traitement automatique des données géophysiques (magnétisme et spectrométrie) et du modèle numérique de terrain

Afin de prendre un exemple pour illustrer les différentes étapes de traitement, une grille à la maille de 125 \* 125 m du champ magnétique réduit au pôle (magnétisme) localisée dans le secteur de Ploërmel sera utilisée. La méthode s'applique de la même façon aux données spectrométriques (spectrométrie) et au modèle numérique de terrain.

#### 4.1. RAPPEL SUR L'OUTIL DE TRAITEMENT AUTOMATIQUE

L'analyse structurale des données géophysiques peut être réalisée manuellement. Les discontinuités sont alors digitalisées à partir d'une ou de plusieurs images géophysiques adaptées, cartes de gradients, de résiduelles ou représentation ombrée. En magnétisme, cette analyse peut-être basée sur des grilles du gradient vertical réduit au pôle, représentées 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. C'est ce qui avait été fait lors du test réalisé sur le secteur de Ploërmel (Debeglia et Perrin, 2000). L'interprétation manuelle des données géophysiques présente cependant l'inconvénient d'être subjective et fastidieuse dès que les surfaces à traiter sont importantes. C'est pourquoi une méthode d'interprétation automatique a-t-elle été élaborée dans le cadre du projet de recherche et développement du BRGM « Méthodes Géophysiques au service de la cartographie numérique et 3D ».

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 ou par des algorithmes de différence spatiale, intégrés à la plupart des outils standard de traitement de données.

La transformation en gradient horizontal est généralement accompagnée d'une opération dite de « réduction au pôle » dont l'intérêt est de recentrer une partie des anomalies à l'aplomb des structures qui les créent. La forme et l'amplitude de l'anomalie magnétique créée par un corps aimanté donné varient, en effet, selon la géométrie du corps (forme, orientation, pendage) et la latitude magnétique du lieu de mesure. Au pôle magnétique nord, le champ inducteur est vertical, maximal et orienté vers le bas. Les anomalies d'origine induite y 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.

#### 4.1.1 Etapes du traitement pour l'extraction des discontinuités

#### 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 et on doit définir un seuil d'amplitude à partir du quel un maxima sera retenu. Ce seuil peut être choisi assez bas, par exemple, 0.01% de l'amplitude totale de l'anomalie, sauf s'il est nécessaire de limiter le temps de calcul.

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)

A la fin de l'analyse deux fichiers contenant les caractéristiques de discontinuités élémentaires sont constitués. Ces fichiers, d'extension .mif et .mid, sont au format d'import de MAPINFO. Les attributs des discontinuités élémentaires sont les suivants :

- KDIS, indice de la discontinuité,
- X, Y, coordonnées du centre,
- KEPIJ, classement selon l'importance du gradient horizontal (système de 3 classes avec équirépartition),
- ALPIJ, angle de la discontinuité, en radian, de 0 à PI, compté dans le sens trigonométrique à partir de l'axe des abscisses,

- I, J, indices dans la grille du centre de la discontinuité,
- GHMAX, gradient horizontal maximal au centre de la discontinuité,
- d, longueur de la discontinuité, variable selon son orientation, du pas à sa diagonale,
- xt1, yt1, xt2, yt2, coordonnées des extrémités de la discontinuité.

## *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 la discontinuité d2 dont le centre est le plus proche de celui de d1 et qui respecte un triple critère :
  - > angle entre les 2 discontinuités inférieur à un seuil angulaire, alpha, donné,
  - > distance selon la direction moyenne du groupe inférieure à un seuil, disl, donné,
  - distance perpendiculairement à la direction moyenne du groupe inférieure à un seuil, disp, donné.
- Si une discontinuité d2 est trouvée, les discontinuités d1 et d2 sont regroupées en un seul segment moyen rectiligne qui remplace d1 et d2 est éliminée. Si aucune discontinuité d2 ne correspond au critère, d1 est conservée, inchangée. 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 de regroupement, seuils d'angle, alpha, et de distance, disl et disp, sont réglables.

#### Etape 2b : Algorithmes de traitements des discontinuités "fractures"

Les fractures de longueur inférieure à un seuil, dlmin, donné sont éliminées, ce qui permet si nécessaire de clarifier l'image structurale, en supprimant des fractures isolées. Dans le cadre de ce test, toutes les fractures ont été conservées. En cas d'intersection, l'accident le plus court est arrêté sur le plus long, la portion de discontinuité conservée étant la plus étendue.

A la fin de ces deux dernières étapes deux fichiers, au format d'import de MAPINFO, contenant les caractéristiques de discontinuités fractures sont constitués. Les attributs des discontinuités fractures sont semblables à ceux des discontinuités élémentaires. Cependant :

- le paramètre KEPIJ, devient le nombre de discontinuités élémentaires intervenant dans le regroupement,
- les paramètres, I, J, sans objet, sont mis à 0,
- la longueur de la discontinuité, d, n'est plus limitée et est fonction des regroupements effectués.

La figure 2 ci-dessous montre, sur le secteur de Ploërmel (4 x 4 km), le résultat des étapes 2a et 2b de regroupement des discontinuités élémentaires (représentée en noir) en discontinuités « fractures » rectilignes (en gris), et de traitements des discontinuités « fractures ». Les centres des fractures sont notés par un point rouge.

#### Y (en km)



Figure 2 - Regroupement des discontinuités élémentaires en discontinuités « fractures » (traitement du champ magnétique réduit au pôle, secteur de Ploërmel)

#### Influence des paramètres de regroupement en discontinuités « fractures »

• Influence du seuil angulaire, alpha

Pour favoriser les regroupements, on peut utiliser un seuil angulaire, alpha, relativement élevé, 30 à 40°, sans trop affecter la précision de localisation des fractures.

• Influence du seuil de distance perpendiculairement à l'allongement, disp

Pour augmenter les regroupements, on peut prendre un seuil de distance perpendiculairement à l'allongement du groupe de discontinuités, disp, plus élevé. Augmenter ce seuil ne favorise pas particulièrement la création de longues fractures mais permet d'éviter d'avoir des accidents parallèles, doublés, voir triplés, dans les zones de gradient larges. Cependant, la précision de la localisation des fractures peut être affectée si on augmente trop ce paramètre.

• Influence du seuil de distance selon l'allongement, disl

Pour privilégier les regroupements en longues fractures, on peut prendre un seuil de distance selon l'allongement du groupe de discontinuités, disl, plus élevé. Augmenter ce seuil favorise la création de fractures de grande taille en reliant entre eux des segments d'accidents isolés. Cependant, si on augmente trop ce paramètre, on risque de créer une continuité fictive entre des éléments de fait indépendants. Si on ne veut pas privilégier les fractures rectilignes et si on prévoit d'utiliser l'étape suivante pour relier les « fractures » par des « lignes » brisées, il vaut mieux utiliser un seuil disl petit, de l'ordre de 0,125 km et laisser l'algorithme suivant opérer.

#### Etape 3a : Algorithmes de regroupements des discontinuités « fractures » en « lignes »

Il serait 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.

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, f1.
- On cherche la fracture f2, telle que :
  - > l'angle (f1, f2) soit inférieur à un seuil angulaire, alpha, donné,
  - la distance entre une extrémité de f1 et une extrémité de f2 soit inférieure à un seuil de distance, dis, donné,
  - > il n'existe pas d'autre discontinuité plus proche de f2.
- Si une fracture f2 est trouvée, on initialise une nouvelle ligne.
- On construit ensuite la ligne, de proche en proche, de part et d'autre du segment initial, f1. Les segments utilisés sont extraits de la procédure.
- La procédure reprend par la création d'une nouvelle ligne à partir des segments restants. Lorsqu'il n'y a plus de regroupement possible, la procédure s'arrête.
- Seules les lignes de longueur supérieure à un seuil fixé, dlmin, sont conservées.

La figure 3 ci-dessous montre, sur le secteur de Ploërmel, le résultat de l'étape 3a de regroupement des discontinuités « fractures » (représentée en noir) en « lignes » brisées (en gris). Les centres des fractures sont notés par un point rouge.





Figure 3 - Regroupement des discontinuités « fractures » en « lignes » brisées (traitement du champ magnétique réduit au pôle, secteur de Ploërmel)

#### Etape 3b : Algorithmes de traitements des « lignes »

Le traitement des lignes est contrôlé par un paramètre unique, sdmax. Sdmax est la distance à partir de laquelle deux lignes trop proches seront concaténées en une seule ligne. Pour des raisons algorithmiques tenant au mode de recherche des points proches, le même paramètre est utilisé comme pas d'échantillonnage constant lors du lissage de la ligne.

Le traitement des lignes comporte 3 étapes successives :

 le lissage de la ligne est réalisé par un algorithme de splines sous tension, codé par A.K. CLINE (1987) et issu du package FITPACK, distribué par Netlib. Le paramètre de tension ayant été fixé à 0, l'algorithme se comporte strictement comme un « cubic spline ». Le lissage a surtout pour but d'obtenir un échantillonnage régulier de la ligne ce qui facilitera les traitements ultérieurs ;

- le traitement des intersections de lignes permet de clarifier l'image. Le principe du traitement est le suivant :
  - si les deux lignes ne se recoupent qu'une fois, le plus petit des quatre segments de ligne définis par l'intersection est supprimé s'il est plus petit que dlmin, sinon, les lignes ne sont pas modifiées ;
  - si les deux lignes se recoupent plusieurs fois, on ne garde que les segments situés à l'extérieur de la zone d'intersection, et seulement s'ils sont plus grands que dlmin;
- la concaténation des lignes trop proches a également pour but de simplifier le schéma structural. Si deux lignes restent à une distance inférieure à sdmax sur une longueur de plus d'un pas d'échantillonnage, les lignes sont interrompues et les deux portions de lignes trop proches sont remplacées par un segment unique. Pour préserver la continuité de l'image de la discontinuité, aucun segment de ligne ainsi créé n'est supprimé, même s'il est plus court que dlmin. Dans les zones de gradient large où la localisation de l'accident principal est imprécise et se manifeste par plusieurs discontinuités parallèles, le tracé final sera donc constitué de lignes interrompues, localement doublées.

Deux fichiers contenant les caractéristiques des discontinuités lignes sont constitués, l'un avant traitement des lignes, l'autre, après traitement. Ces fichiers contiennent, pour chaque ligne les attributs suivants :

- KDIS, indice de la ligne,
- KEPIJ, nombre de points de la ligne,
- d, longueur de la ligne,
- orientation globale (azimuth par rapport au Nord) calculée entre les deux points extrêmes de la ligne,
- orientation moyenne (azimuth par rapport au Nord) pondérée par la longueur de chaque segment constituant la ligne (rappel : les lignes brisées sont constituées de segments rectilignes jointifs de même longueur),
- écart-type des directions des segments,
- GHMAX, gradient horizontal moyen,
- Suivis des coordonnées x, y, des points de la ligne

La figure 4 ci-après montre, sur le secteur de Ploërmel, le résultat du traitement des « lignes » qui est décomposé en 4 cartes :

- a) lignes initiales,
- b) lignes après interpolation et traitement des intersections,
- c) lignes finales après concaténation,
- d) lignes finales superposées aux discontinuités élémentaires initiales.

Les lignes sont tracées sur fond de gradient vertical du champ magnétique réduit au pôle. Le paramètre sdmax est égal à 0.125 km.



Figure 4 - Etapes de traitement des « lignes » (traitement du champ magnétique réduit au pôle, secteur de Ploërmel)

#### Influence des paramètres de regroupement en « lignes »

Des seuils angulaires, alpha assez élevés, 40 à 60°, favorisent le regroupement en « lignes ». La diminution de ce paramètre permet d'obtenir des accidents rectilignes, mais en plus petit nombre. Il ne faut pas trop augmenter le seuil de distance, dis, afin de pas créer de liaisons factices entre des discontinuités trop éloignées.

La diminution du paramètre dImin de 0.3 à 0.6 permet d'éliminer des discontinuités isolées.

L'augmentation de la distance sdmax entraîne une diminution du nombre de « lignes », et favorise le caractère rectiligne des accidents (représentation plus régionale).

#### Etape 4 : Sortie finale des résultats au format MAPINFO

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,
- gradient moyen le long de la ligne,
- orientation globale (azimut par rapport au Nord) calculée entre les deux points extrêmes de la ligne,
- orientation moyenne (azimut par rapport au Nord),
- écart-type des directions des segments par rapport à la direction moyenne,
- rotation, égale à la différence de direction entre le début et la fin de la ligne,
- rotation maximale, égale à la différence entre les orientations maximales observées le long de la ligne,
- coordonnées du premier point 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...

Les données concernant les segments de lignes sont également 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 à laquelle appartient le segment,
- nombre de points de la ligne,
- longueur de la ligne,
- gradient moyen le long de la ligne.
- orientation globale (azimut par rapport au Nord) calculée entre les deux points extrêmes de la ligne,
- orientation moyenne (azimut par rapport au Nord),
- écart-type des directions des segments par rapport à la direction moyenne,
- rotation, égale à la différence de direction entre le début et la fin de la ligne,
- rotation maximale, égale à la différence entre les orientations maximales observées le long de la ligne,
- azimut du segment

Ces deux derniers fichiers permettront, par des sélections sur ces attributs, d'isoler des portions de lignes ayant des caractéristiques particulières : portions rectiligne ou ayant une orientation donnée, en particulier.

#### 4.2. RÉALISATION DU TRAITEMENT AUTOMATIQUE SUR L'ENSEMBLE DE LA BRETAGNE

Ces traitements ont été réalisés durant les années 2 et 3, après un test de l'outil automatique et une validation des résultats, effectués sur le secteur de Plabennec (rapport BRGM/RP-52825-FR). Ce test a en particulier permis de choisir des paramètres de traitement qui semblaient optimaux sur la zone de Plabennec. Durant les traitements d'ensemble de la Bretagne ces paramètres ont cependant du être adaptés afin de permettre une restitution des résultats d'une part à une échelle détaillée (1/50 000) et d'autre part à une échelle plus régionale (1/250 000).

L'analyse structurale a nécessité une préparation des grilles de gradients horizontaux qui a été effectuée de manière différente suivant les données et l'échelle de sortie finale envisagée :

- Le MNT, initialement disponible au pas de 50 m, a été rééchantillonné au pas de 125\*125 m afin d'obtenir une grille cohérente avec les données aéroportées. Les gradients ont été calculés par le logiciel Geosoft.
- Les données spectrométriques, échantillonnées à la maille 125\*125 m, ont été filtrées en fréquentielle afin d'éliminer les anomalies de longueur d'onde inférieure à 500 m environ et les gradients ont été calculés par transformations fréquentielles. Le lissage des données permet de faire abstraction de la variabilité locale des anomalies radiométriques. Ces grilles ont été utilisées pour réaliser une analyse détaillée (lisibilité à l'échelle du 1/250 000). Les variables analysées sont le comptage total, le potassium (K), le thorium (Th), l'uranium (U) et le rapport K/Th. Un exemple d'analyse détaillée du rapport K/Th (sans unité) est présenté figure 5. A cette échelle, l'image est difficilement exploitable, les discontinuités étant de petite taille et rarement rectilignes.



Figure 5 - Exemple d'analyse structurale détaillée effectuée sur le rapport K/Th (spectrométrie, interprétation détaillée, secteur Sud-Ouest des Côtes d'Armor)

Une interprétation plus régionale des données spectrométriques a été ensuite réalisée à partir de données lissées par moyenne pondérée en raison inverse de la distance dans une fenêtre de 2 km, puis rééchantillonnées au pas de 500\*500 m. Les gradients ont été ensuite calculés par l'algorithme de différence disponible dans le logiciel Surfer<sup>™</sup>. Les variables analysées sont également le comptage total, le potassium (K), le thorium (Th), l'uranium (U) et le rapport K/Th. Un exemple d'analyse régionale du rapport K/Th, réalisée sur la même zone que précédemment afin de permettre la comparaison, est présenté figure 6. Cette image présente une meilleure lisibilité, les accidents étant plus continus. Par ailleurs, des orientations préférentielles commencent à apparaître.



Figure 6 - Exemple d'analyse structurale régionale effectuée sur le rapport K/Th (spectrométrie, interprétation régionalisée, secteur Sud-Ouest des Côtes d'Armor)

- Pour réaliser leur analyse détaillée, les données magnétiques ont été réduites au pôle et lissée par prolongement vers le haut à 250 m d'altitude puis rééchantillonnées à la maille 250\*250 m.
- Pour l'analyse régionale, les grilles magnétiques ont été rééchantillonnées à la maille 500\*500 m.

Les paramètres d'analyse structurale finalement retenus sont rassemblés dans le tableau 1 ci-après.

			Regroupement en fractures			Regroupement des fractures en lignes – traitement des lignes				
Données	Lissage et maille de traitement	Seuil	alpha	disp	disl	dlmin	alpha	dis	dlmin	sdmax
MNT	125 * 125	1 %	30	70	125	125	40	150	1000	500
Spectro détail, K,U, TH, comptage total, rapport	Filtrage fréquentiel préalable Maille 125 * 125	1 %	30	70	125	125	60	500	1000	500
Spectro régionale, K,U,TH, comptage total, rapport	Lissage + échantillonnage à 500 * 500 m	1%	30	70	125	125	40	500	1000	500
Mag détail	Lissage + échantillonnage à 250 * 250 m	0.025 %	30	125	250	250	50	500	1000	500
Mag régional	Lissage + échantillonnage à 500 * 500 m	0.05 %	30	250	500	500	50	500	2000	500

#### Tableau 1 - Paramètres utilisés pour l'analyse structurale automatique en Bretagne

Le tableau 2 récapitule les résultats de l'analyse automatique des variables traitées, en nombre de discontinuités élémentaires, et en nombre final de lignes et de segments de lignes.

Données	Nombre de discontinuités élémentaires	Nombre final de lignes	Nombre final de segments de ligne		
MNT	682472	8364	20676		
Traitement détaillé du Comptage total	375168	48605	31646		
Traitement détaillé de K	443277	15310	56724		
Traitement détaillé de U	198903	8677	26230		
Traitement détaillé de Th	353321	13355	47906		
Traitement détaillé de K/Th	413455	14411	55628		
Traitement régional du Comptage total	31015	5375	21677		
Traitement régional de K	45245	6802	15414		
Traitement régional de U	49099	9254	31915		
Traitement régional de Th	25647	4498	18410		
Traitement régional de K/Th	49614	8605	31871		
Traitement détaillé du magnétisme (levé Massif Armoricain)	248504	21153	91032		
Traitement régional du magnétisme (Levé Massif armoricain)	86600	5715	42600		
Traitement détaillé du magnétisme (levé St-Malo)	29038	1905	8612		
Traitement régional du magnétisme (Levé St-Malo)	9401	631	4567		

Tableau 2 - Nombre de discontinuités élémentaires, de lignes et de segments de lignes résultant de l'analyse automatique des variables traitées sur tout le Massif Armoricain

La plupart des traitements importants ont été réalisés sur une station UNIX, Compaq Alpha. Les temps de calcul, principalement fonction du nombre de discontinuités élémentaires détectées ont varié de plusieurs jours (MNT et traitements détaillés) à quelques heures (traitements régionaux). Ils se décomposent de la manière suivante :

- Temps de lecture et enregistrement des grilles, relativement peu important (moins de 20 mn, pour le MNT)
- Extraction des discontinuités élémentaires : de 10 à 20 mn, suivant les paramètres, pour extraire 10000 discontinuités élémentaires (de l'ordre de 20 heures, pour le MNT),
- Temps de regroupement en fracture, qui augmente très vite avec le nombre de discontinuités élémentaires (plus de 24 heures, pour le MNT)
- Temps de regroupement des fractures en ligne, plus faible car il y a beaucoup moins de fractures que de discontinuités élémentaires (7 heures, pour le MNT). Ce temps peut être assez largement augmenté par le traitement final des lignes (gestion des intersections et concaténation de lignes proches).

Au temps de calcul correspondant à l'analyse structurale elle même doit être ajouté le temps de préparation, constitution des grilles, lissages, échantillonnage, calcul des gradients et de la réduction au pôle, en magnétisme.

#### 4.3. CONCLUSION

Les résultats de l'analyse structurale automatique constituent une base d'informations qui pourront être utilisées tout au long du déroulement du projet SILURES : utilisation des données régionales, pour le projet SILURES Bretagne, et des données détaillés, pour le projet SILURES Bassins versants. Postérieurement à la réalisation du projet SILURES, les éléments structuraux ainsi établis permettront de travailler dans le détail sur une zone particulière et suivant les besoins.

## 5. Corrélation avec les forages d'eau

#### 5.1. CARACTÉRISTIQUES DES FORAGES D'EAU

En application du Code Minier (articles 131 et 132, titre VIII du Livre I), environ 17000 forages sont connus en Bretagne. Une partie de ces forages (environ 10 000) possèdent une localisation géographique suffisamment précise pour qu'ils soient numérotés (affectation d'un numéro BSS - Banque de données du Sous-Sol) et rassemblés dans un fichier informatique.

Ce fichier comporte, selon le niveau de détail fourni par le foreur, les informations suivantes :

- numéro BSS du forage, commune où le forage existe,
- date de réalisation, entreprise réalisant le forage,
- coordonnées en Lambert 2 et altitude du forage,
- débit instantané mesuré en fin de foration, profondeur atteinte, rapport de productivité débit/profondeur,
- diamètre de l'ouvrage, géologie rencontrée,
- niveau piézométrique, niveau de la première arrivée d'eau.

Les informations transmises par les entreprises de forage portent quasi systématiquement sur la profondeur finale de l'ouvrage et sur son débit instantané. Les autres informations, moins systématiques, concernent la nature et l'état de la roche traversée (lithologie, altération) et la localisation des différentes arrivées d'eau (fissures productives recoupées par le forage). Ces données sont de valeurs inégales car dépendant notamment du foreur, de son attention au déroulement du forage et de son aptitude à restituer ce qu'il a pu observer et mesurer.

Par ailleurs, les forages ont des profondeurs variées (95% des forages ont une profondeur inférieure ou égale à 100 m) et sont réalisés avec des objectifs différents (par exemple, pour un particulier : objectif de débit de 3 m<sup>3</sup>/h). Ces biais ainsi introduits peuvent être notables, mais peuvent être compensés par le grand nombre d'informations.

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, 10 649 forages ont été utilisés pour valoriser les discontinuités issues des données aéromagnétiques (lignes et segments) et 9 467 forages ont été utilisés pour les données de radiométrie spectrale (partie Nord des Côtes d'Armor en moins).
Le rapport Q/P (débit instantané/profondeur) de ces 10 649 forages a été regroupé en 5 classes (cf. figure 7). Le tableau suivant rassemble les résultats obtenus.



Classes	1	2	3	4	5	
Q/P (m <sup>3</sup> /h/m)	< 0.05	0.05 - < 0.10	0.10 - < 0.20	0.20 - < 0.50	>= 0.50	
Nb forages	2740	2568	2562	2036	743	
%	26	24	24	19	7	

*Figure 7 - Histogramme des Q/P des forages de Bretagne et définition des classes* 

Tableau 3 - Classement des 10 649 forages bretons en fonction de leur productivité

Les seuils ont été définis compte tenu des caractéristiques hydrogéologiques de la Bretagne et afin d'avoir des classes de répartition quasi homogènes tout en isolant une classe 5 présentant les meilleurs résultats.

### 5.2. UTILISATION DE L'OUTIL "FAVORABILITÉ LIGNE"

Dans ce chapitre, les résultats obtenus au niveau des forages d'eau (quantité d'eau souterraine disponible en fonction de la profondeur forée) vont être associés aux discontinuités géophysiques (magnétisme et spectrométrie), issues des traitements automatiques du chapitre 4, afin d'analyser une éventuelle relation entre les propriétés des forages et celles des discontinuités, sur une profondeur de 0 à 100 m (gamme de profondeur renseignée par les forages).

A l'origine de cette démarche, deux hypothèses ont été considérées pour tout le raisonnement scientifique qui suit :

- 1. Certaines discontinuités géophysiques peuvent être la signature de la fracturation du socle (en milieu fracturé de socle, la fissuration associée aux fractures et aux failles peut constituer des drains qui favorisent les écoulements souterrains).
- 2. La limite d'influence des discontinuités sur les forages est limitée à un périmètre de 400 mètres.

Ces hypothèses ont été validées dans plusieurs rapports et sur deux secteurs tests en Bretagne : aux alentours de Ploërmel dans le Morbihan et sur le Léon dans le Finistère (respectivement BRGM/RP-50583-FR et BRGM/RP-51740-FR).

La valorisation des discontinuités obtenues à la suite de l'utilisation des programmes de tracé automatique (cf. chapitre 4) a été effectuée sur 5 familles distinctes :

- > les linéaments manuels topographiques (lignes),
- les discontinuités magnétiques linéaires (lignes),
- les discontinuités spectrométriques (Comptage Total) linéaires (lignes),
- les discontinuités magnétiques segmentaires (segments) (rappel : les lignes brisées sont constituées de segments rectilignes jointifs de même longueur),
- > et les discontinuités spectrométriques (Comptage Total) segmentaires (segments).

Cette valorisation utilise l'outil « favorabilité ligne » du module SYNARC© développé par le BRGM à des fins d'analyses structurales fines. Ce module utilise l'interface du logiciel ARCGIS© sous licence ESRI.

Le traitement consiste à compléter la table attributaire de chaque population de discontinuité par deux nouveaux attributs calculés :

- 1. Le dénombrement des éléments ponctuels (ici les forages) situés dans le périmètre d'influence des discontinuités.
- 2. La valeur du paramètre choisi (ici l'attribut débit/profondeur) correspondant aux forages concernés ; Toutefois lorsque plusieurs forages sont détectés, on obtient la somme des valeurs.

L'outil « favorabilité lignes » permet de choisir la zone d'exploration où le poids des éléments détectés sera maximal (figure 8). Pour l'étude, une distance d'investigation de 398 mètres a été choisie (zone bleue). Il permet en outre de fixer une distance supplémentaire (zone verte) où le poids des éléments est calculé en fonction de leur éloignement à la source (ici, afin de minimiser les écarts et les valeurs flottantes, cette distance supplémentaire a été fixée à quatre mètres. En résumé, l'outil affectera le poids 1 a tout élément compris entre 0 et 398 mètres de la discontinuité, un poids compris entre 0 et 1 et fonction de la distance pour tout élément se situant dans une ceinture 398-402 m (exemple : 0.5 à 400 m et 0.75 à 401 m).



Figure 8 - Principe de l'outil "favorabilité ligne" Les 3 discontinuités sont des exemples et ne proviennent pas d'une méthode en particulier (magnétisme, spectrométrie ou MNT) Le temps de traitement de l'outil « favorabilité ligne » sur les lignes ou les segments est variable et dépend du nombre d'éléments linéaires à renseigner, ainsi bien sûr que du nombre d'éléments ponctuels à compter. Pour les discontinuités linaires, l'outil fonctionne entre 2 et 3 heures pour chaque variable (2-3 heures pour le comptage des forages, 2-3 heures pour renseigner le champ débit/profondeur). Pour les discontinuités segmentaires, le temps de traitement est doublé ou triplé pour un même nombre de forages (5-6 heures pour le comptage des forages, 5-6 heures pour renseigner le champ débit/profondeur)

A la suite de cette opération, la table attributaire de chaque famille de discontinuités (figure 9) contient donc, en plus des paramètres d'origine, les champs attributaires renseignés suivants :

- NB\_FORAGES : nombre de forages associés à une discontinuité
- CUMUL\_Q\_P : somme des rapports débit/profondeur (Q/P) des forages associés
- MOYQ\_P\_L (=CUMUL\_Q\_P / NB\_FORAGES) Calcul ultérieur : Q/P moyen associé à chaque segment ou discontinuité linéaire. C'est le paramètre sur lequel vont être réalisées les différentes études statistiques.

1	Classeur1						_ 🗆 🗵
	A	В	С	D	E	F	G 🗖
1	NUM_LIGNE	AZIM_SEG	CUMULQ_P	NB_FORAGES	MOYQ_P_L		
2	2	94.200	0.021428571428571	1	0.0214285714		
3	2	97.500	0.021428571428571	1	0.0214285714		
4	2	89.300	0.140000000000000	1	0.140000000		
5	111	111.200	0.036666666666666	1	0.03666666667		1
6	111	110.200	0.036666666666666	1	0.0366666667		
7	118	128.600	0.200000000000000	1	0.200000000		
8	118	130.200	0.2000000000000000	1	0.200000000		
9	118	105.000	0.072289156626506	1	0.0722891566		
10	118	91.400	0.072289156626506	1	0.0722891566		
11	122	26.300	0.280282771415776	4	0.0700706929		
12	122	174.700	0.180282771415776	3	0.0600942571		
13	122	149.700	0.249373680506685	3	0.0831245602		
14	122	154.100	0.160000000000000	1	0.160000000		
15	137	87.400	0.076703296703297	2	0.0383516484		
16	138	77.700	0.109548872180454	2	0.0547744361		
17	138	74.600	0.109548872180454	2	0.0547744361		
18	138	67.900	0.259649122807014	2	0.1298245614		
19	138	84.700	0.259649122807014	2	0.1298245614		
20	138	66.500	0.259649122807014	2	0.1298245614		
21	138	92.000	0.692307692307690	2	0.3461538462		
22	138	74.500	0.692307692307690	2	0.3461538462		-
	Feuil1	Feuil2 / Feuil3 /		1			DI

Figure 9 - Exemple de fichier Excel obtenu à la suite de l'utilisation de SYNARC©

Dans la suite du rapport on parlera de segments (ou lignes) « renseigné(e)s » lorsque ces discontinuités sont associées à au moins un forage.

### 5.3. RÉSULTATS OBTENUS

Le tableau 4 résume les principales caractéristiques des cinq familles de discontinuités (cf. chapitre 5.2.). Pour les discontinuités de type « ligne », le pourcentage d'éléments renseignés par rapport aux populations d'origine est relativement bon, de l'ordre de 40% avec un maximum à 56% pour les discontinuités « lignes » issues de l'interprétation automatique des gradients du magnétisme. Pour les segments, ce pourcentage chute autour de 24% mais le nombre de segments renseignés reste statistiquement satisfaisant (supérieur à 1500 pour les discontinuités linéaires, 3600 pour les discontinuités demeure dans tous les cas suffisamment élevé : de l'ordre de 35% pour les lignes avec un maximum à 50% pour les linéaments; plus de la moitié des forages est associée à une ou plusieurs discontinuités dans le cas de l'utilisation des segments.

LIGNES	Nh lignes	Nb lignes	0/.	Nb_forages	0/2	Forag	ges rensei	gnants	CUMUL_Q/P			MOYQ/P/L			
	ND lightes	renseignées	/0	renseignants	/0	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Ecart-type
MAGNÉTISME	2674	1515	56.65	3759	35.3	1	2.48	21	0	0.438252	7.400763	0	0.165248	2.307471	0.182
SPECTRO CT	3979	1677	42.14	3323	35.1	1	1.9898	17	0.001	0.358	17.26	0.002	0.16608	2.0403	0.200
LINÉAMENTS	6680	2720	40.7	5377	50.49	1	1.97394	16	0.011	0.33995	7.429	0.011176	0.16136	5	0.208

SEGMENTS	Nb Nb	Nb segments renseignés		Nb_forages renseignants		Forages renseignants		CUMUL_Q/P			MOYQ/P/S				
	segments		%		%	Min	Моу	Max	Min	Моу	Max	Min	Моу	Max	Ecart-type
MAGNÉTISME	19702	4710	23.9	7165	67.28	1	1.52123	11	0	0.2666742	5	0	0.1671634	5	0.214
SPECTRO CT	15361	3600	23.44	5419	57.24	0	1.50517	13	0	0.2725858	16.95519	0	0.16661918	3.75	0.215

NB : les chiffres décimaux concernant le nombre des forages renseignants proviennent de la pondération appliquée dans la zone 398-402m A ce titre, les valeurs minimales portées ici à 0 pour CUMUL\_Q/P, MOYQ/P/L et MOYQ/P/S sont infiniment proches de 0 mais supérieures.

Tableau 4 - Caractéristiques des familles de discontinuités étudiées (le paramètre MOYQ\_P\_L est associé aux lignes et MOYQ\_P\_S aux segments)

La moyenne du nombre de forages renseignant une discontinuité fluctue entre 1.5 et 2.5. Par rapport aux discontinuités segmentaires, les discontinuités linéaires ont en général plus de forages qui les renseignent, ce qui est logique compte tenu de leur longueur (plusieurs kilomètres parfois).

L'histogramme de l'attribut Q/P des 10649 forages permet de les ordonner en cinq classes (cf. figure 7 et tableau 3).

Afin d'obtenir des histogrammes et des rosaces de direction représentatifs dans la suite de l'étude, les classes ont été regroupées :

- Classes à faibles Q/P : classe 1 et classe 2
- Classes à forts Q/P : classe 4 et classe 5

Les analyses de l'orientation (azimuts) des discontinuités ont été menées :

- sur l'effectif global par famille de discontinuités,
- sur l'effectif renseigné par les forages,
- et sur l'effectif représentatif des deux classes définies ci-dessus.

Dans chacun des cas, les populations ont été comptées, un histogramme des fréquences a été construit et une rosace d'orientation a été calculée (utilisation du module SYNARC© avec l'outil « rosace de direction »). Pour les lignes courbes, le module donne l'orientation moyenne de la ligne (figure 10).



Figure 10 - Calcul de la direction moyenne sous SYNARC ©

Compte tenu qu'il était délicat de sélectionner des discontinuités courbes en fonction d'un azimut moyen souvent peu représentatif, l'étude s'est par la suite attachée à caractériser les discontinuités segmentaires, petits fragments unitaires ayant un azimut unique (voir paragraphe 4). Ceci facilite principalement les sélections en fonction des tranche d'azimuts et permet ainsi une discrétisation plus élaborée.

#### 5.3.1. Les segments « magnétiques » (figure 11a)

<u>Ensemble des segments</u> : 19702 segments composent l'effectif breton global. Les orientations principales s'organisent autour de maxima observés entre N90° et N110° avec environ 4800 segments. Les directions comprises entre N70° et N90° ainsi que celles comprises entre N110° et N140° sont bien représentées avec plus de 1000 segments par tranche d'orientation. Les autres tranches sont plus faiblement marquées avec une population de 450 à 600 segments par tranche.

<u>Les segments renseignés</u> : 4710 (24% des effectifs) segments sont renseignés par les forages. La colonne des fréquences par tranche d'azimuts montre une allure

sensiblement équivalente à celle de la totalité des segments. Cependant, si les directions comprises entre N90° et N110° restent dominantes, la part représentative des populations dont l'orientation est comprise entre N60° et N90° et entre N110° et N130° est proportionnellement plus importante. La tranche qui inclue les segments d'orientation N0-N10° et N170-N180° est aussi proportionnellement un peu plus développée que dans le cas précédent.

Le groupe « faible Q/P » comprend les classes 1 et 2 de l'histogramme Q/P (figure 7 et tableau 3) et rassemble les segments dont le Q/P moyen est inférieur à 0,1. 2233 segments sont concernés ce qui correspond à environ 47.4% des effectifs renseignés. L'allure globale des répartitions reste la même que pour l'ensemble des segments renseignés avec une nette dominance des classes 9 et 10 de la figure 11a (N90-N110°).

Le groupe « fort Q/P » correspond à l'assemblage des classes 4 et 5 de l'histogramme Q/P. Il rassemble ainsi les segments dont le Q/P moyen est supérieur à 0.2. 1136 segments entent dans cette catégorie, ce qui représente 24.11% des effectifs renseignés. Les classes 9 et 10 (N90-N110°) ne sont plus celles où les effectifs sont les plus nombreux (9.6%); elles sont supplantées par la classe 8 (11.5%) (N80-N90°).

#### Magnétisme - Segments

a)

#### Segments (tous) Segments renseignés Classes 1 et 2 HQ/P Classes 4 et 5 HQ/P Classes 1 et 2 HQ/P lasses 4 et 5 HQ ifférence Azim\_Segments Nb\_Discontinuités lasses d'orientation Nb\_Discontinuités Nb\_Discontinuités Nb\_Discontinuités Normalisation Normalisation 2.51 526 3.35 0.84 0-10 128 56 0 38 28 10-20 432 108 2.46 0.49 44 20-30 387 104 45 28 2.02 2.46 0.45 2.10 30-40 444 115 47 38 3.35 1.24 3 40-50 597 153 63 43 3.79 0.96 4 50-60 787 221 299 4.21 5.55 0.81 94 57 5.02 5 60-70 996 77 1.23 6 124 6.78 70-80 1318 316 138 89 6.18 7.83 1.65 0.60 80-90 1943 506 244 131 10.93 11.53 8 2393 552 109 12.81 90-100 286 9.60 -3.21 9 2363 2003 524 109 -2.18 10 100-110 263 11.78 9.60 11 110-120 439 233 76 10.43 6.69 -3.74 12 120-130 1642 379 188 81 8.42 7.13 -1.29 1199 262 68 5.73 5.99 0.25 13 130-140 128 3.72 52 14 140-150 846 185 83 4.58 0.86 15 150-160 665 136 66 34 2.96 2.99 0.04 584 577 2.82 3.52 16 160-170 170-180 137 63 40 0.70 17 146 68 38 4710 19702 2233 1136

# SILURES Bretagne - Valorisation des données de géophysique aéroportée



Spe	ctrométrie : Comptage T	otal - Segments							
			Segments (tous)	Segments renseignés	Classes 1 et 2 HQ/P	Classes 4 et 5 HQ/P	Classes 1 et 2 HQ/P	Classes 4 et 5 HQ/P	Différence
<b>b</b> )	Classes d'orientation	Azim_Segments	Nb Discontinuités	Nb Discontinuités	Nb Discontinuités	Nb Discontinuités	Normalisation	Normalisation	
D)	0	0-10	521	110	50	32	2.86	3.60	0.74
	1	10-20	405	101	59	21	3.37	2.36	-1.01
	2	20-30	525	115	59	28	3.37	3.15	-0.22
	3	30-40	713	175	81	45	4.63	5.06	0.43
	4	40-50	911	211	96	53	5.49	5.96	0.48
	5	50-60	921	219	111	50	6.34	5.62	-0.72
	6	60-70	878	209	102	46	5.83	5.17	-0.65
	7	70-80	927	227	94	65	5.37	7.31	1.94
	8	80-90	1337	292	144	67	8.23	7.54	-0.69
	9	90-100	1500	341	168	76	9.60	8.55	-1.05
	10	100-110	1229	274	132	58	7.54	6.52	-1.02
	11	110-120	1255	274	131	72	7.49	8.10	0.61
	12	120-130	1092	269	149	57	8.51	6.41	-2.10
	13	130-140	1009	248	122	73	6.97	8.21	1.24
	14	140-150	736	208	100	60	5.71	6.75	1.03
	15	150-160	526	123	63	26	3.60	2.92	-0.68
	16	160-170	423	97	41	28	2.34	3.15	0.81
	17	170-180	453	107	48	32	2.74	3.60	0.86
			15261	2600	1750	000			





#### Linéaments - Lignes

			Segments (tous)	Segments renseignés	Classes 1 et 2 HQ/P	Classes 4 et 5 HQ/P	Classes 1 et 2 HQ/P	Classes 4 et 5 HQ/P	Différence
- 1	Classes d'orientation	Azim_Segments	Nb_Discontinuités	Nb_Discontinuités	Nb_Discontinuités	Nb_Discontinuités	Normalisation	Normalisation	
C)	0	0-10	47	23	10	9	0.76	1.37	0.61
,	1	10-20	154	58	24	17	1.83	2.59	0.76
	2	20-30	615	233	99	68	7.57	10.37	2.80
	3	30-40	914	372	171	84	13.07	12.80	-0.27
	4	40-50	501	198	97	46	7.42	7.01	-0.40
	5	50-60	193	89	53	16	4.05	2.44	-1.61
	6	60-70	127	53	18	20	1.38	3.05	1.67
	7	70-80	166	70	35	17	2.68	2.59	-0.08
	8	80-90	278	107	52	27	3.98	4.12	0.14
	9	90-100	446	168	78	37	5.96	5.64	-0.32
	10	100-110	247	110	64	19	4.89	2.90	-2.00
	11	110-120	220	88	45	16	3.44	2.44	-1.00
	12	120-130	213	89	49	14	3.75	2.13	-1.61
	13	130-140	425	185	93	40	7.11	6.10	-1.01
	14	140-150	1035	433	209	119	15.98	18.14	2.16
	15	150-160	848	339	159	79	12.16	12.04	-0.11



La normalisation des populations à l'effectif de groupe (\*) : fort Q/P (classes 4 et 5) ou faible Q/P (classes 1 et 2), permet de mesurer les variations proportionnelles de chaque classe.

(\*) Par exemple, la normalisation de la population fort Q/P a été calculée de la façon suivante (cf. tableau et graphique associé) :

Normalisation de la classe d'orientation i =

Nb de discontinuités dans la classe i x 100 / Nb total de discontinuités à fort Q/P

(exemple : Normalisation de la classe d'orientation 0 = 38 x 100 / 1136 = 3.35)

La différence des populations normalisées à l'effectif de groupe a ensuite été calculée : Différence = fort Q/P (classes 4 et 5) - faible Q/P (classes 1 et 2)

Elle permet de mettre en évidence des orientations favorables (la différence est positive) ou défavorables à l'implantation de forage d'eau (la différence est négative). Pour une classe d'orientation donnée, une différence positive indique qu'il y a proportionnellement plus de forages à fort Q/P associés aux segments de la classe que de forages à faible Q/P.

Il apparaît ainsi que la classe 9, qui compte un nombre important de segments semble moins avantageuse que la classe 6 par exemple, qui compte un nombre de segments moindre mais proportionnellement plus de segments à fort Q/P. Ainsi, les classes 9 à 12 semblent être, du point de vue de l'analyse des Q/P des classes d'azimuts moins intéressantes que les classes 3 à 8 (N30° à N 90°) avec une classe 6 qui se différencie nettement.

#### 5.3.2. Les segments « comptage total » (figure 11b)

<u>Ensemble des segments</u> : 15361 segments composent l'effectif global des segments issus de l'interprétation automatique des gradients spectrométriques (Comptage total). Ce nombre moins important que pour les segments « magnétiques » s'explique par l'absence de données au niveau d'une partie des Côtes d'Armor. A ce titre, une fraction des forages a été retirée puisque ne pouvant être en aucune façon associée à une discontinuité CT. Les classes 8 à 13 (azimuts variant de N80 à N140°) sont nettement représentées avec un maximum de 1500 segments (9.7% des effectifs globaux).

*Les segments renseignés :* sur les 15361 segments initiaux, 3600 sont renseignés par un ou des forages, ce qui représente environ 23.5% des effectifs. La classe 9 qui comprend les segments dont l'azimut varie entre N90° et N100° est la plus représentée avec 341 segments. Les classes 8 et 10 à 13 sont bien renseignées avec des populations variant de 248 à 292 segments.

L'étude des paramètres Q/P associés aux forages renseignant les segments montre que 1750 segments (48.6% des segments renseignés) ont un Q/P inférieur à 0.1 (classes 1 et 2 de l'histogramme Q/P). Pour ces faibles Q/P, la classe 9 reste

dominante avec 9.6% des effectifs; la classe 8 (8.2%) et les classes 10 à 12 (8.5% à 7.5%) sont encore bien marquées.

L'étude des segments à fort Q/P (classes 4 et 5 de l'histogramme Q/P) montre que 889 segments entrent dans cette catégorie (24.7% des segments renseignés). La classe 9 est encore la classe la plus marquée mais les classes 11 et 13 sont proportionnellement assez proches (8.09 et 8.2%).

L'étude de la différence entre les deux groupes (forts Q/P - faibles Q/P, cf. graphique) permet de mettre en évidence que la classe 7 notamment (azimuts compris entre N70° et N80°), comme pour les segments « magnétiques », est proportionnellement la classe la plus intéressante. Elle est accompagnée, dans une moindre mesure, des classes 13, 14, 16 et 17. Les classes 9, 10 et 12 semblent être proportionnellement nettement moins intéressantes.

#### 5.3.3. Les segments « linéaments » MNT (figure 11c)

<u>Ensemble des segments :</u> 6680 ont été tracés manuellement à partir de l'étude d'ombrage du Modèle Numérique de Terrain au pas de 50 m (IGN). Trois groupes d'azimuts sont les plus représentés : les classes 14 et 15 qui correspondent aux azimuts compris entre N140° et N160° sont les plus représentées avec 28.1% des effectifs; puis ce sont les classes 2 et 3 avec 22.9% des linéaments. La classe 9 est aussi bien renseignée avec 446 segments. Ces directions principales sont évidemment en relation avec les directions structurales du Massif armoricain : elles correspondent aux traces superficielles de fractures importantes, qui se sont mises en place dans le socle armoricain postérieurement à l'orogenèse hercynienne (300 million d'années) et qui ont été maintes fois réactivées lors de phases de déformation ultérieures, dont une phase actuellement active liée à la convergence de l'Afrique vers l'Europe (« Poussée alpine »).

<u>Les segments renseignés :</u> sur les 6680 segments initiaux, 2720 sont renseignés par un ou des forages, ce qui représente environ 40.7% des effectifs. Les classes 14 et 15 puis 2 et 3, et 9 restent bien renseignées avec respectivement : 772 (28.4%), 605 (22.2%) et 168 segments (6.2%).

L'étude des paramètres Q/P associés aux forages renseignant les segments montre que 1308 segments (48.1% des segments renseignés) ont un Q/P inférieur à 0.1 (classes 1 et 2 de l'histogramme Q/P). Les 3 directions majoritaires restent bien renseignées malgré une légère diminution de la classe 9.

L'étude des segments à fort Q/P (classes 4 et 5 de l'histogramme Q/P) montre que 656 segments entrent dans cette catégorie (24.1% des segments renseignés). Les 3 directions majoritaires restent inchangées.

L'étude de la différence entre les deux groupes (forts Q/P - faibles Q/P, cf. graphique) permet de mettre en évidence que les classes 2, 6 et 14 sont proportionnellement les classes les plus favorables. Les classes 5 et 10 à 13 semblent être proportionnellement nettement moins intéressantes.

Les tableaux et graphiques de la figure 11 montrent que :

- l'échantillon des 10649 forages est représentatif car les orientations observées sur les discontinuités renseignées par des forages d'eau (colonne « segments renseignés » du tableau de la figure 6) sont très proches des orientations observées sur les discontinuités non renseignées (colonne « segments (tous) »);
- malgré un travail sur des extrêmes au niveau des graphiques de la figure 6 (différence entre les meilleures classes et les moins bonnes de l'histogramme Q/P), certaines orientations apparaissent d'ores et déjà favorables (N70-N80°) et défavorables (N120-N130°) à l'implantation d'un futur forage d'eau, quelque soit le type de discontinuité utilisé (linéament, segment Mag et segment CT).

Ces graphiques de la figure 11 mettent en évidence le besoin d'une étude statistiquement fiable afin de n'exclure aucune classe de l'histogramme Q/P (ici la classe 3) et afin de travailler sur toutes les populations de discontinuités renseignées.

#### 5.4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE STATISTIQUE DES ATTRIBUTS DES DISCONTINUITÉS GÉOPHYSIQUES

La méthodologie développée ici correspond à une tentative d'analyse des variations éventuelles du comportement hydrogéologique des discontinuités géophysiques. Les illustrations de ce chapitre sont fournies par l'analyse des lignes magnétiques. Bien entendu la méthodologie s'applique aux segments ou lignes des couvertures du Magnétisme (Mag) et du Comptage total (CT) et aussi aux linéaments naturels. D'ailleurs nous utiliserons pour cette raison et pour simplifier le vocable générique de « discontinuités ». La caractérisation statistique des tendances a été faite essentiellement sur le couple d'attributs Q/P/F (F = nombre de forages ; cet attribut est équivalent à MOYQ\_P\_L du chapitre 5.2.) et Azimuts associés aux discontinuités.

#### 5.4.1. Approche statistique

Les analyses statistiques sont établies sur la base de classifications de la population de discontinuités étudiée. Les dénombrements ont été réalisés simplement avec un tableur Excel.

En préalable à une classification deux paramètres doivent être choisis :

- l'intervalle inter-classe (In) ;
- le nombre de classes (Nc).

Ces deux critères interdépendants déterminent la finesse et la précision des résultats : un grand nombre de classes et un intervalle court permettent d'atteindre une haute résolution dans l'analyse, mais il peut en résulter des effectifs de classe très disparates avec pour conséquence une forte imprécision statistique sur les dénombrements en particulier pour les classes de très faible effectif. L'intervalle de variation du paramètre étudié relie par défaut In et Nc, il est donc intéressant de réduire cet intervalle en bornant le paramètre de manière à améliorer la classification. C'est le cas ici pour Q/P/F : on observe quelques échantillons à fortes valeurs qu'il est utile de regrouper dans la dernière classe ; le seuil est choisi de façon à réduire le nombre de classes d'effectifs très petits et à obtenir un effectif de dernière classe restant dans la gamme de la répartition.

Après quelques essais les paramètres suivants constituant un bon compromis, ont été choisis :

Paramètre	Nbre de	Borne	Borne	Intervalle
	classes	inférieure	Supérieure	
Azimut	27	0	180	6.667
Q/P/F	27	0	0.72	0.027

 Tableau 5 - Caractéristiques des classes des attributs des discontinuités géophysiques

 (Q : débit, P : profondeur, F : nombre de forages)

Les résultats de classification sont visualisés graphiquement sous la forme habituelle de diagrammes histogrammes. En figure 12 sont fournis les histogrammes pour les deux grands ensembles de discontinuités (la fréquence est en fait le nombre de lignes) : avec paramètre Q/P/F, sans paramètre Q/P/F selon que les discontinuités ont été ou non renseignées par des forages situés à proximité (voir chapitre 5.2.).

Ces histogrammes caractérisent le comportement global de la population de linéaments : les distributions sont structurées et régulières autour d'un mode bien marqué. En azimut la répartition est quasi gaussienne autour de ce mode situé vers 100°. En Q/P/F on observe essentiellement , après une augmentation très rapide, une décroissance des effectifs lorsque le paramètre croît au-delà du mode situé autour de la classe 3 (environ 0.067).

Au premier ordre les histogrammes d'Azimut des discontinuités, renseignées ou non renseignées en Q/P/F par les forages, sont très similaires ; ceci contribue à attester que l'échantillon des discontinuités « forées » ne comporte pas de biais et semble représentatif. Dans les deux cas, les orientations préférentielles mises en évidence sont très probablement attribuables à la structuration géologique.

De même nous avons observé à ce stade une très grande similarité des histogrammes du paramètre Q/P/F pour les différents types de discontinuités (Mag, CT ou linéaments topo - illustrations non fournies dans le rapport) : forme, moyenne, écart-type très voisins ou identiques. Cela semble prouver la bonne représentativité des différents types de discontinuités renseignées. Cette répartition semble conforme à celle de l'ensemble des forages.

L'analyse du diagramme de répartition 2D {Azimut ; Q/P/F} a été tentée ; elle est apparue assez bruitée et peu lisible au delà de la tendance générale : en dehors des modes identifiés les effectifs sont rapidement très faibles et par conséquent entachés d'un bruit statistique important.







Figure 12 - Statistique de répartition des paramètres Q/P/F et Azimut moyen associés aux Lignes Mag

#### 5.4.2. Analyse par secteur angulaire d'azimut

Pour appréhender un éventuel phénomène de distorsion dans la répartition de Q/P/F selon l'azimut, l'étape suivante a consisté à établir successivement les histogrammes de Q/P/F pour différents Azimuts. Les azimuts sont balayés selon 9 secteurs angulaires équidistants de 20° formés par regroupement de la classification initiale. Afin d'améliorer la stabilité des dénombrements, en particulier avec les classes de faible effectif chaque secteur est obtenu suite au regroupement de 4 classes (4 x 6.667°) : les secteurs ont donc une ouverture de 26.67°, c'est à dire que la nouvelle classification est légèrement régularisée (lissage) en raison d'un chevauchement de une classe initiale (6.67°) entre les secteurs consécutifs. Les histogrammes obtenus sont fournis avec quelques paramètres statistiques en figure 13. Les classes sont désignées par l'azimut de leur centre (exemple : N0° = N166.66 - N13.34°).

On peut observer de petites variations dans les profils de répartition d'une direction à l'autre, mais la lisibilité à ce stade reste difficile.

#### 5.4.3. Etablissement des distributions différentielles de Q/P/F

L'objectif de bien visualiser les écarts de répartition selon chacun des secteurs, a conduit à procéder aux deux traitements successifs suivants :

- 1- normalisation des dénombrements par l'effectif total de chaque groupe (présentation habituelle en % des histogrammes de fréquence).
- 2- établissement pour chaque secteur de l'histogramme, d'un différentiel évalué classe par classe de Q/P/F, par le calcul de l'écart d'effectif normalisé par référence à la population totale tous azimuts confondus.

Les résultats obtenus permettent de tracer les profils de répartition différentielle des Q/P/F donnés en figure 14.

Dans ces diagrammes la différenciation des comportements du paramètre Q/P/F selon l'Azimut est assez nette :

- certains profils (exemple Azimut N100°) sont plats ; Q/P/F reste toujours très proche du comportement de référence (écart quasi constant faible)
- d'autres montrent des classes de Q/P/F sur-représentées (écart positif) ou sous représentées (écart négatif).

Sur cette base, on peut mettre en évidence des orientations de discontinuité pour lesquelles telle gamme du paramètre Q/P/F est plus ou moins privilégiée. Ainsi une direction caractérisée avec davantage de Q/P/F faible et un déficit de Q/P/F fort ressort peu favorable à l'implantation d'un forage très productif et inversement.



Figure 13 - Histogrammes du paramètre Q/P/F associé aux Lignes Mag (par secteurs angulaires d'Azimut de +/- 13°)











Histogramme des écarts - Lignes Mag Azimut N20°









Figure 14 - Distribution différentielle du paramètre Q/P/F associé aux Lignes Mag (analyse par secteur d'azimut)

Toutefois les profils différentiels ainsi calculés en 27 classes, semblent encore assez confus, avec une instabilité due en partie à la variation de précision du différentiel en liaison avec l'effectif des classes. En effet les effectifs faibles souvent rencontrés (inférieurs à 10 dans la plupart des classes) détériorent la précision (erreur relative >30%). De plus une résolution importante sur le paramètre Q/P/F n'est certainement pas utile, ni significative.

#### 5.4.4. Distribution différentielle groupée de Q/P/F

Au final les classes de Q/P/F ont été regroupées en 4 groupes ayant des effectifs à peu prés comparables (de l'ordre de 25% de la population). Les bornes du regroupement ont été choisies par examen de la population tous azimuts confondus. Les limites ont été fixées aux valeurs suivantes:

- Groupe 1 = classes 1 + 2 (Q/P/F < 0.053)
- Groupe 2 = classes 2 + 3 ( 0.053 < Q/P/F < 0.107)
- Groupe 3 = classes 4 à 7 (0.107 < Q/P/F < 0.213)
- Groupe 4 = classes 8 à 27 ( 0.213 < Q/P/F)

On peut remarquer que les limites fixées sont cohérentes avec l'histogramme Q/P des 10 649 forages (cf. figure 7 et tableau 3).

Ces valeurs sont déterminées globalement pour tous les types de discontinuité étudiés. En quelque sorte on hiérarchise les discontinuités selon que le paramètre étudié est faible (inférieur au mode), moyen (de l'ordre du mode), fort ou très fort.

Les profils simplifiés du différentiel de Q/P/F obtenus sont donnés figure 15. La lisibilité est maintenant plus facile : sans ambiguïté les azimuts pour lesquels le groupe 1 est sous-représenté (Ecart négatif) et le groupe 4 bien représenté (Ecart positif) peuvent être considérés comme favorables pour l'implantation de forage d'eau ; En effet les statistiques montrent que les forages proches de ces accidents ayant un faible débit sont moins nombreux et ceux ayant un fort débit sont plus nombreux.



Figure 15 - Distribution différentielle groupée de Q/P/F associé aux Lignes Mag (Classes regroupées en 4 groupes d'effectif comparable)

#### 5.4.5. Calcul d'un index de favorabilité

Enfin à titre de synthèse et en vue d'automatiser l'analyse, la classification été paramétrée par la formulation d'une variable continue que nous désignerons « Index de Favorabilité (IF) » :

 $IF = -1 \times Ec1 + 1 \times Ec2 + 2 \times Ec3 + 3 \times Ec4$ 

avec Eci = Ecart normalisé du groupe i, pondéré par un coefficient -1, 1, 2 ou 3

Les pondérations visent à privilégier les fortes valeurs de Q/P/F et à pénaliser les faibles valeurs : elles correspondent à une qualification graduelle de médiocre à excellent.

En effet, un « Index de Favorabilité » positif pour un azimut donné montrera que celuici est favorable pour l'implantation de forage d'eau (prépondérance des groupes 2 à 4) tandis qu'un Index négatif indiquera un azimut défavorable (importance du groupe 1).

Le graphe de variation de l'index de favorabilité selon l'azimut est donné en bas à droite de la figure 15. Sur ce graphe les directions < N80° apparaissent favorables à l'exception de N20°, N40° étant la plus favorable ; N120° est la plus défavorable. Ces résultats semblent assez significatifs et montrent une relative stabilité aux paramètres de calculs, toutefois les critères de regroupement, le choix de la population de référence, ou les coefficients de pondération peuvent éventuellement modifier l'appréciation de la favorabilité de certains groupes.

## 5.5. RÉSULTATS SUR LA BRETAGNE

#### 5.5.1. Résultats sur 27 classes avec regroupement en 9 classes d'azimuts

La méthode décrite au chapitre 5.4. a été reconduite sur les autres populations de discontinuités linéaires : linéaments topographiques, segments du magnétisme « Mag », segments et lignes spectrométriques (Comptage Total « CT »).

Les classes d'azimuts sont indexées de 0 à 8. Comme montré sur la figure 16, la classe 1 (N20°) représente l'intervalle d'azimuts compris entre N07° et N33°; la classe 2 (N40°) représente l'intervalle d'azimuts compris entre N27° et N53°... Comme souligné au chapitre 5.4., il y a donc recouvrement d'environ 6° (« fenêtre glissante ») autour des bornes de chaque classe : une même discontinuité peut donc être comptée deux fois.



Figure 16 - Principe de recouvrement des classes

Pour les linéaments, l'index de favorabilité (cf. figure 17) varie peu. Quelle que soit la classe d'azimuts envisagée, les variations s'éloignent peu de la moyenne. Les classes les plus favorables semblent être les classes 1 (N07° à N33°) et 4 (N67° à N93°); les moins favorables étant les classes 0 (N173° à N13°), 3 (N47° à N73°), 5 (N93° à N113°) et la plus défavorable la classe 6 (N107° à N133° - identique à la classe la plus défavorable pour les lignes « Mag »).



Figure 17 - Index de favorabilité des linéaments pour 27 classes (Eci = Ecart normalisé du groupe i)

Pour les segments « CT », l'index varie encore moins autour de la moyenne (cf. figure 18), si bien qu'il semble assez délicat de déterminer des classes franchement favorables ou défavorables. La classe 0 (N173° à N13°) semble être plutôt favorable alors que la classe 6 (N107° à N133°), comme dans le cas des linéaments et des lignes « Mag » semble être plutôt défavorable. On peut ajouter à cette classe la classe 1 (N07° à N33°) qui montre un index de favorabilité négatif de valeur équivalente.



Figure 18 - Index de favorabilité des segments CT pour 27 classes

Pour les segments « Mag », l'index montre des amplitudes de variations plus perceptibles (cf. figure 19). Les classes 5 (N87° à N113°) et 6 (N107° à N133°) semblent être des classes défavorables alors que les classes 8 (N147° à N173°), 1 (N7° à N33°) et 3 (N47° à N73°) apparaissent plus favorables. Comparativement aux autres classes, la classe 2 (N27° à N53°) se démarque nettement avec un index de favorabilité à +26 (maximum des index observés sur la Bretagne, toutes familles de discontinuités confondues).



Figure 19 - Index de favorabilité des segments "Mag" pour 27 classes

Enfin, pour les discontinuités linéaires issues du rassemblement des unités segmentaires (cf. figure 20) pour la spectrométrie (CT), la classe 8 (N147° à N173°), fortement positive, se détache nettement. A l'opposé de ce qui peut être observé sur les graphes précédents, la classe 6, habituellement négative à très négative apparaît ici en amplitude assez fortement positive. Les classes 2 (N27° à N53°), 5 (N87° à N113°) semblent être les classes les moins favorables.



Figure 20 - Index de favorabilité des lignes "CT" pour 27 classes

#### 5.5.2. Étude et résultats sur 18 classes d'azimuts (sans fenêtre glissante)

L'étude statistique importante réalisée par classification et dénombrement en 27 ensembles sur la Bretagne a été reconduite sur l'ensemble des données afin de privilégier les sélections futures des orientations favorables et des orientations défavorables. Statistiquement, de part une fréquence moindre de discontinuités par classe d'azimuts, cette méthode est théoriquement un peu moins optimale mais elle permet de s'affranchir de l'effet de « fenêtre glissante » : une discontinuité ne sera donc sélectionnée qu'une fois. Le nombre de classes statistiques Nc est donc fixé à 18; l'intervalle inter-classe (ln) de 10° et la borne supérieure pour le Q/P/F reste inchangée à 0.72. L'exercice a été mené sur les segments CT, Mag et sur les linéaments topographiques. Il n'a pas été effectué d'étude sur les regroupements linéaires.

Le regroupement en quatre ensembles n'a pas été effectué de façon à obtenir des classes d'environ 25% de la population des discontinuités renseignées mais en fonction des seuils (au plus proche) reconnus sur l'histogramme Q/P des 10 649 forages (cf. figure 7 et tableau 3). Les groupes obtenus sont :

Groupe 1 : Q/P/F < 0.053 (voisin de 0.05) = Classe statistique 0

Groupe 2 : 0.05 < Q/P/F < 0.12 (voisin de 0.1) = Classes statistiques 1 et 2

Groupe 3 : 0.12 < Q/P/F < 0.2 = Classes statistiques 3 et 4

Groupe 4 : Q/P/F > 0.2 = Classes statistiques 5 à 17.

Les index de favorabilité ont été calculés de la même façon avec les mêmes constantes de pondération.

De la même façon qu'au chapitre précédent, les classes d'azimuts des discontinuités ont été indexées de 0 à 17 : classe d'azimut 0 (N0-10°) à classe 17 (N170-180°).

Pour les linéaments (figure 21), seule la classe 17 (N170°-180°) semble être fortement défavorable. Dans une moindre mesure, les classes 10 et 12 montrent des index négatifs qui traduisent leur caractère plutôt défavorable. En revanche, la classe 6 (N60°-N70°) semble être une classe favorable même si l'index de favorabilité reste peu élévé. Les classes 0, 1, 2 et 7 à index positif mais de faible valeur pourraient être des classes plutôt favorables.



Figure 21 - Index de favorabilité des linéaments topographique pour la Bretagne

Pour les segments spectrométriques (figure 22), l'index de favorabilté ne montre que peu de variations d'amplitude. Le maximum est observé pour la classe 16 (N160°-N170°). Comme dans le cas des linéaments topographiques, les classes 0 et 17 semblent représenter des directions plutôt favorables. De même, la classe 12 (N120°-N130°) demeure une classe défavorable mais la classe la plus défavorable est la classe 1 (N10°-N20°) avec néanmoins un index négatif assez faible.



Figure 22 - Index de favorabilité des segments "CT" pour la Bretagne

Pour les segments magnétiques (figure 23), les fluctuations de l'index de favorabilité sont encore moins marquées. De la classe 0 à la classe 7, c'est à dire de N0° à N 80°, les directions semblent plutôt favorables avec un maximum observé pour des azimuts compris entre N30° et N50°. Il ne semble pas se démarquer de classe franchement défavorable; les index négatifs ne sont pas très prononcés excepté peut-être pour les classes 9 et 11 qui représenteraient alors les intervalles les plus défavorables.



Figure 23 - Index de favorabilité des segments "Mag" pour la Bretagne

En comparant les 3 dernières figures aux figures 17, 18 et 19 (27 classes statistiques regroupées en 9 classes d'azimuts) on remarque que les index de favorabilité ont des tendances de variations générales comparables. La « méthode 27 classes » apparaît logiquement plus globalisante tandis que la « méthode 18 classes » est plus précise. En effet, pour les segments Mag, la figure 19 montre des classes N0 à N60° favorables (azimut N167 à N73°) tandis que la figure 23 montre des classes d'azimut N0 à N80° favorables.

Les 3 figures de ce chapitre feront l'objet d'analyses plus détaillées et de représentations cartographiques dans le chapitre 6.

# 6. Synthèse : utilisation des résultats comme guide d'implantation de forages d'eau

Les index de favorabilité représentés en histogrammes dans le chapitre 5.5.2. ont été organisés en 7 groupes en fonction de leur valeur. Un chiffre auquel est associé un code couleur particulier a été donné. Ce code couleur permet entre autres de mettre en évidence les extrêmes (discontinuités très favorables/défavorables).





Classes	CL0		CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7	CL8
Azimuths	N0-10		N10-20	N20-30	N30-40	N40-50	N50-60	N60-70	N70-80	N80-90
Magnétisme		1	1	1	2	2	0	1	1	Segmer
Spectrométrie		1	-1	0	0	1	0	0	1	Seamer
Linéaments		1	1	1	0	0	0	2	1	Lignes <sup>0</sup>
										0
	CL9		CL10	CL11	CL12	CL13	CL14	CL15	CL16	CL17
	N90-100		N100-110	N110-120	N120-130	N130-140	N140-150	N150-160	N160-170	N170-180
		-1	0	-1	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	-1	0	0	0	2	1
		0	-2	0	-1	0	0	0	0	-3

Tableau 7 - Résultats finaux pour l'étude sur la Bretagne en 18 classes

Ces 2 tableaux montrent qu'à l'échelle de la Bretagne et quelque soit le type de discontinuité (topographique, Mag ou CT) les directions comprises entre N0-10° et N70-80° sont toujours favorables, tandis que la direction N120-130° est systématiquement défavorable.

Dans une moindre mesure, les directions N90 à 120° sont défavorables et les directions N20-30°, N40-50° et N60-70° sont favorables. Les directions N10-20°, N50-60°, N80-90° et N130 à 160° apparaissent indifférentes.

La direction N30-40° semble favorable à proximité des discontinuités Mag et indifférente aux autres méthodes. De la même façon, la direction N160-170° semble favorable à proximité des discontinuités CT mais pas des autres. La direction N170-180° semble spécifiquement défavorable aux linéaments topographiques.

Les autres directions ont été rassemblées dans la catégorie « neutre » car elles semblent soit indifférentes quelque soit la méthode (exemple : N50-60°), soit favorable et/ou défavorable selon la méthode (exemple : N10-20°, favorable Mag et MNT, défavorable CT).

Ces conclusions seront illustrées sur la figure 30 en fin de chapitre.

Des cartes de synthèse ont été construites à partir de ces tableaux. Pour ne pas surcharger les figures, les azimuts très défavorables et défavorables ont été regroupés au sein d'un même ensemble appelé sur les figures « très défavorable » ; les azimuts plutôt défavorables étant désormais appelés « défavorables ». Les azimuts très favorables et favorables ont été, de la même façon, regroupés en un seul ensemble.

Pour les trois familles de données (linéaments topographiques figure 24, segments spectrométriques figure 25, et segments magnétiques figure 26), les sélections ont été effectuées sous SIG (Arcview) à partir des azimuts de l'ensemble des discontinuités répertoriées (incluant celles non renseignées par un ou des forages). Pour chaque figure, le code couleur est identique : les discontinuités neutres sont en noir, les discontinuités plutôt favorables sont en vert, les discontinuités très favorables sont en bleu, des discontinuités plutôt défavorables sont en orange et les discontinuités très défavorables sont en rouge.



Figure 24 - Favorabilité des linéaments MNT bretons en fonction de leur orientation



Figure 25 - Favorabilité des segments Comptage Total bretons en fonction de leur orientation



Figure 26 - Favorabilité des segments Mag bretons en fonction de leur orientation

Une carte synthétisant les discontinuités défavorables (3 familles superposées, cf. figure 27) ainsi qu'une carte montrant les discontinuités favorables (3 familles superposées, cf. figure 28) ont été réalisées (même code couleur que précédemment; les discontinuités « neutres » n'ont été figurées sur aucune des deux cartes).

Enfin, des zones tampons de 400 mètres ont été dessinées autour des discontinuités, symbolisant a priori leur zone d'impact (hypothèse de départ). La figure de synthèse (figure 29), qui peut tenir lieu de guide sommaire d'implantation des forages, montre ainsi l'ensemble des zones qui ont été étudiées. L'ordre de superposition est le suivant : on a privilégié de placer sur une couche supérieure les zones tampons des discontinuités défavorables (rouge), qu'il convient donc d'éviter au mieux pour implanter un forage que l'on veut productif, puis sur une couche intermédiaire les zones tampons des discontinuités favorables (bleu) et enfin, sur une couche inférieure les zones tampons des discontinuités jugées « neutres » (jaune); les domaines non recouverts par les zones tampons (éloignés de plus de 400 mètres de toute discontinuité) étant laissées en grisé.

On retrouve sur cette carte quelques traits structuraux remarquables du Massif armoricain. On distingue nettement les directions défavorables orientées N120°-N130° que l'on repère parfaitement bien au niveau des grandes failles sud-armoricaines (branches du cisaillement sud-armoricain). Les directions défavorables se distinguent aussi parfaitement et fluctuent autour de directions N90-120°; toute la carte semble ainsi clairement orientée. Ces orientations défavorables sont en bonne adéquation avec ce que l'on connaît du système de contraintes s'exerçant sur le Massif armoricain avec une compression globalement orientée Nord-Sud liée à la convergence des plaques Afrique et Eurasia et qui tend actuellement à « fermer » ces grandes fractures. Dans le même temps, les structures sécantes, voire perpendiculaires aux directions défavorables tendent plutôt à s'ouvrir et la gamme des directions comprises entre N0° et N80° apparaissent ainsi comme des directions dans l'ensemble plus favorables.


Figure 27 - Représentation des discontinuités favorables en Bretagne



Figure 28 - Représentation des discontinuités défavorables en Bretagne

(synthèse des 3 méthodes)



Figure 29 - Représentation des secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau en Bretagne

La figure 30 suivante a été réalisée à partir des conclusions portant sur le tableau 7, en début de chapitre 6.

Elle permet de visualiser les résultats obtenus en terme de directions favorables/défavorables (toutes méthodes confondues : Magnétisme, Spectrométrie et Linéaments MNT) à l'implantation de forages d'eau.



Figure 30 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables sur la Bretagne

## 7. Etude statistique sur la zone du Léon

Suite aux résultats mis en évidence sur toute la région Bretagne, l'étude s'est orientée vers une zone plus restreinte afin de répondre à un triple objectif :

- identifier si les grandes orientations favorables/défavorables régionalement le restaient localement,
- affiner l'étude régionale pour mettre en évidence des directions locales favorables/défavorables suite à des suppositions compte-tenu des connaissances de la tectonique locale,
- montrer qu'il est possible de préciser l'étude au niveau local et ainsi faire apparaître d'autres orientations plus ou moins intéressantes pour l'implantation de forages d'eau.

La zone retenue correspond globalement à la partie occidentale du Léon au Nord de Brest dans le Finistère.

Ce secteur géographique a été privilégié en raison d'un nombre relativement important de sondages bien répartis et d'une relative bonne connaissance des objets tectoniques et en particulier des orientations structurales.

### 7.1. DONNÉES DES FORAGES

Au niveau du secteur du Léon, 1215 forages ont été utilisés pour valoriser les discontinuités issues des données géophysiques aéroportées (aéromagnétisme et radiométrie spectrale).

Le rapport Q/P (débit instantané/profondeur) de ces 1215 forages a été regroupé en 4 classes (cf. figure 31). Le tableau suivant rassemble les résultats obtenus.



Figure 31 - Histogramme des Q/P des 1215 forages du Léon et définition des classes

Classes	Classes 1		3	4	
Q/P (m <sup>3</sup> /h/m)	< 0.10	0.10 - < 0.20	0.20 - < 0.40	>= 0.40	
Nb forages	384	320	290	221	
% 32		26	24	18	

Tableau 8 - Classement des 1215 forages du Léon en fonction de leur productivité

Les seuils ont été définis compte tenu des caractéristiques hydrogéologique du secteur c'est à dire en prenant en compte les paliers visibles au niveau de l'histogramme de la figure 31, et afin d'avoir des classes de répartition quasi homogènes.

#### 7.2. ETUDE STATISTIQUE EN 18 CLASSES D'AZIMUTS

La méthode statistique employée a été rigoureusement identique à celle développée pour l'ensemble de la Bretagne (voir chapitres 5.4 et 5.5). Le nombre de classes Nc a été fixé à 18, l'intervalle inter-classe (In) à 10°, sans recouvrement d'azimuts.

Les bornes des intervalles d'azimuts sont incorporées dans le dénombrement pour les bornes inférieures et exclues pour les bornes supérieures (Exemples: Classe 0 : de 0° inclus à 10° exclu; classe 1 : de 10° inclus à 20° exclu...)

Les bornes supérieures Q/P/F, pour chaque groupe de discontinuités, ont été calculées en ajoutant à la moyenne 2 écarts-types (Moy+2\*Ecart-Type). L'étude s'est concentrée sur l'analyse des segments magnétiques et spectrométriques ainsi que sur l'analyse des linéaments. Il n'a pas été effectué de test sur les regroupements linéaires. Les paramètres, pour chaque famille, sont listés dans le tableau 9.

	paramètre	Nbre de classes	Borne inférieure	Borne supérieure	Intervalle	Nombre de discontinuités renseignées
Magnétisme	Azimut	18	0	180	10	401
	Q/P/F	18	0	0.978	0.05433	
СТ	Azimut	18	0	180	10	407
	Q/P/F	18	0	0.861	0.04783	
Linéaments	Azimut	18	0	180	10	285
	Q/P/F	18	0	1.033	0.05738	

Tableau 9 - Paramètres employés pour l'étude Léon

Comme pour l'étude sur l'ensemble de la Bretagne, un seul exemple sera développé avec figures associées. Les résultats de classification seront visualisés de la même manière que pour l'étude statistique sur la Bretagne. L'exemple développé sera celui des discontinuités (segments) spectrométriques issues de l'analyse du Comptage total (CT).

# 7.2.1. Statistiques de répartition des paramètres Q/P/F et azimut associés aux segments CT (spectrométrie)

Pour le paramètre Q/P/F, l'histogramme (cf. figure 32) montre une croissance brutale des effectifs lorsque le paramètre croit vers les modes situés autour des classes 1 et 2.



Figure 32 - Histogramme de Q/P/F des segments CT

On observe ensuite un effet « palier » pour les classes 2 à 4 puis une décroissance très nette des effectifs lorsque le paramètre croit au delà du mode situé autour de la classe 5.



Figure 33 - Histogrammes de l'azimut des segments CT

L'histogramme des azimuts des discontinuités non-renseignées par un Q/P/F (cf. figure 33) ou celui des azimuts des discontinuités renseignées par un Q/P/F (cf. figure 33) ont globalement une allure similaire. Les distributions sont régulières autour d'un mode dominant situé vers N80°; cependant, le maximum semble plus marqué pour les discontinuités renseignées où il semble, de plus, apparaître un second pic situé aux alentours de N130°. Les distributions, à l'opposé de ce qui est observé pour la Bretagne, semble moins suivre une loi gaussienne mais plutôt une loi bimodale.

#### 7.2.2. Distribution différentielle groupée de Q/P/F

L'analyse par secteur angulaire d'azimut a été menée, ainsi que l'établissement des distributions différentielles des Q/P/F. Les classes de Q/P/F ont ensuite été regroupées en 4 ensembles. A la différence de ce qui a été effectué pour l'étude des discontinuités en 27 classes sur la Bretagne, mais de la même manière que ce qui a été fait pour l'analyse en 18 classes, les populations n'ont pas été regroupées par effectifs comparables mais en fonction des seuils (au plus proche) définis par l'histogramme des Q/P du Léon (cf. figure 31 et tableau 8). Les limites définies sont donc les suivantes pour les discontinuités CT :

Groupe 1 : Q/P/F < 0.0957 (voisin de 0.1) = Classes statistiques 0 et 1

Groupe 2 : 0.0957 < Q/P/F < 0.1913 (voisin de 0.2) = Classes statistiques 2 et 3

Groupe 3 : 0.1913 < Q/P/F < 0.3827 (voisin de 0.4) = Classes statistiques 4 à 7

Groupe 4 : Q/P/F > 0.3827 = Classes statistiques 8 à 17.

La figure 34 montre deux exemples de résultats obtenus pour les segments CT, l'un où le groupe 1 est bien représenté (classe d'azimuts à priori défavorables pour l'implantation de forages), l'autre ou le groupe 4 est bien représenté (classe d'azimut à



priori favorables pour l'implantation de forages).



Un index de favorabilité (IF) a ensuite été calculé. La formulation est identique à celle des études précédentes :

 $IF = (-1 \times Ec1) + (1 \times Ec2) + (2 \times Ec3) + (3 \times Ec4)$ 

avec Eci = Ecart normalisé du groupe i.

Le graphe obtenu (figure 35) montre, pour les segments CT, des directions favorables entre N160° et N10°, N30° à N40° et N130° à N150°. Les directions à priori les plus défavorables se situent entre N20° et N30°, ainsi qu'entre N100° et N110°. Moins bien marquées, d'autres directions défavorables semblent s'individualiser entre N50° et N110°.



Figure 35 - Index de favorabilité des segments "CT" pour la Zone "Léon"

# 7.2.3. Résultats pour les linéaments topographiques et les segments magnétiques

L'étude statistique a été menée de la même manière sur les linéaments et sur les segments issus de l'analyse automatique des gradients du magnétisme. Pour les linéaments et les segments magnétiques, lors du regroupement, des bornes identiques à celles des segments spectrométriques ont été utilisées.

Pour les linéaments, le calcul de l'index de favorabilité reporté en fonction des classes d'azimut (figure 36) montre une Classe 0 (N0° à N10°) très favorable et une Classe 8 (N80° à N90°) favorable.



Figure 36 - Index de favorabilité des linéaments pour la Zone "Léon"

Les Classes 7 (N70° à 80°), 10 (N100° à N110°) et surtout 9 (N90° à N100°) semblent être plutôt défavorables à très défavorables. Les autres classes présentent des index compris entre -27 et +27, ce qui traduit des fluctuations faibles et peu représentatives.

Pour les segments magnétiques, le graphe de l'index de favorabilité (figure 37) montre des variations globales moins importantes que pour les segments spectrométriques et les linéaments. Cependant des index positifs entre N10° et N30° soulignent des directions plutôt plus favorables alors que les index fortement négatifs des directions comprises entre N170° et N0°, N140° à N150°, N100° à N110° indiquent des directions a priori plus défavorables pour l'implantation de forages.



Figure 37 - Index de favorabilité des segments "Mag" pour la Zone "Léon"

Dans l'ensemble, les index de favorabilité pour le Léon présentent des amplitudes de variations plus importantes que ceux pour la Bretagne.

Au niveau du secteur du Léon, on retrouve certains résultats régionaux (par exemple, les linéaments topographiques de direction N0-10° restent très favorables et N90-130° défavorables) mais localement on trouve également des résultats différents voir inversés :

- les linéaments topographiques orientés à N70-80° sont favorables régionalement et sont défavorables localement,
- les discontinuités segments Mag orientées à N0-10° sont favorables régionalement et sont défavorables localement.

Tout ceci montre l'intérêt d'une étude affinée localement.

### 7.3. SYNTHÈSE GRAPHIQUE DE L'ÉTUDE SUR LE LÉON

Comme pour l'étude sur la Bretagne, à partir des résultats précédents, les index de favorabilité ont été organisés en 7 groupes en fonction de leur amplitude (cf. tableau 10). Un code couleur a été associé à chaque classe afin d'obtenir une meilleure visualisation des résultats. Cette classification obtenue pour l'analyse des discontinuités du Léon selon 18 classes est présentée dans le tableau 11.



Tableau 10 - Classification et code couleur des index de favorabilité

Classes Azimuths	CL0 N0-10	CL1 N10-20	CL2 N20-30	CL3 N30-40	CL4 N40-50	CL5 N50-60	CL6 N60-70	CL7 N70-80	CL8 N80-90
Magnétisme	-1	1	1	-1	-1	0	0	1	0
Spectrométrie	2	0	-1	2	0	-1	0	0	0
Linéaments	3	0	1	-1	-1	0	0	-1	2
Classes	CL9	CL10	CL11	CL12	CL13	CL14	CL15	CL16	CL17
Azimuths	N90-100	N100-110	N110-120	N120-130	N130-140	N140-150	N150-160	N160-170	N170-180
Magnétisme	1	-1	0	0	0	-2	0	0	-2
Spectrométrie	0	-2	0	0	1	2	0	2	3
Linéaments	-3	-2	0	0	0	0	0	1	0

Tableau 11 - Résultats finaux pour l'étude sur le Léon en 18 classes

Ces 2 tableaux montrent qu'à l'échelle du Léon et quelque soit le type de discontinuité (topographique, Mag ou CT) la direction N100-110° est systématiquement défavorable et la direction N160-170° est toujours favorable.

Dans une moindre mesure, la direction N40-50° est défavorable et les directions N10-20° et N130-140° sont favorables.

La direction N0-10° semble favorable à proximité des linéaments et des discontinuités CT mais pas des discontinuités Mag. La direction N80-90° semble spécifiquement favorable à proximité des linéaments topographiques et indifférente aux autres méthodes. La direction N90-100° semble spécifiquement défavorable aux linéaments topographiques.

Les autres directions ont été rassemblées dans la catégorie « neutre » car elles semblent soit indifférentes quelque soit la méthode (N60-70°, N110 à 130° et N150-160°), soit favorable et/ou défavorable selon la méthode (exemple : N20-30°, favorable Mag et MNT, défavorable CT).

Ces conclusions seront illustrées sur la figure 44 en fin de chapitre.

Comme pour la Bretagne (cf. chapitre 6), des cartes de représentation de plus ou moins grande favorabilité des discontinuités ont été établies à partir de ces tableaux : linéaments topographiques en figure 38, segments magnétiques en figure 39, et segments spectrométriques en figure 40.



Figure 38 - Favorabilité des linéaments MNT en fonction de leur orientation (secteur du Léon)



Figure 39 - Favorabilité des segments Comptage Total en fonction de leur orientation (Léon)



Figure 40 - Favorabilité des segments Mag en fonction de leur orientation (Léon)

De la même façon, des cartes synthétisant les discontinuités défavorables (figure 41) et les discontinuités favorables (figure 42) ont été réalisées.

Enfin, des zones tampons de 400 mètres ont été dessinées autour des discontinuités, symbolisant a priori leur zone d'impact. La figure de synthèse (figure 43), qui peut tenir lieu de guide sommaire d'implantation des forages, montre ainsi l'ensemble des zones qui ont été étudiées.

On retrouve sur la figure 43 quelques traits structuraux remarquables du Léon. En effet, on distingue 2 familles de directions défavorables. La première, orientée de N90 à 110° correspond à l'orientation du cisaillement nord-armoricain (Sud-Est du secteur). On sait grâce aux études récentes que les failles qui possèdent de telles orientations sont plutôt actuellement en compression, toujours à la suite de la tectonique « alpine ». La seconde famille, d'orientation N40-50° est plus ou moins parallèle au système de failles de l'Elorn (Est du secteur) et au linéament Porspoder-Guissény (Nord du secteur d'étude). Ces failles sont aussi actuellement des failles en compression et il est naturel qu'elles aient plutôt tendance à se fermer et à être ainsi nettement moins productives.

A l'opposé, les structures plus ou moins perpendiculaires aux directions N90-110° tendent plutôt à s'ouvrir actuellement et les directions N0 à 20° (voire N160-170°) apparaissent donc comme des directions favorables. Le cas des structures N130-140° (perpendiculaires aux directions N40-50°) est un peu plus complexe : ces orientations semblent favorables ici, mais on sait qu'à une échelle plus régionale, on est assez proche des directions qui ont tendance à se fermer (voir chapitre 6). C'est éventuellement la conséquence de phénomènes plus localisés, propres au Léon, et c'est d'ailleurs une des raisons qui incite le développement du raisonnement sur des domaines plus restreints.



Figure 41 - Représentation des discontinuités favorables à l'implantation de forages d'eau (secteur du Léon)

(synthèse des 3 méthodes)



Figure 42 - Représentation des discontinuités défavorables à l'implantation de forages d'eau (secteur du Léon)

(synthèse des 3 méthodes)



Figure 43 - Représentation des secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau (secteur du Léon)

95

La figure 44 suivante a été réalisée à partir des conclusions portant sur le tableau 11, en début de chapitre 7.3.

Elle permet de visualiser les résultats obtenus en terme de directions favorables/défavorables (toutes méthodes confondues : Magnétisme, Spectrométrie et Linéaments MNT) à l'implantation de forages d'eau.



Figure 44 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables dans le Léon

En comparant cette figure à la figure 30 (rosace sur la Bretagne), on remarque que :

- la direction N70-80°, favorable régionalement, disparaît localement sur le Léon,
- la direction N40-50°, favorable régionalement, est défavorable localement,
- la direction N160-170°, indifférente régionalement, apparaît très favorable sur le Léon.

## 8. Conclusion

Ce rapport constitue un état d'avancement de la 3<sup>ème</sup> année du projet SILURES Bretagne. Il se focalise sur la phase d'interprétation des données de géophysique aéroportée (aéromagnétiques et spectrométriques).

Le travail réalisé a permis, à partir des données brutes mesurées, de tracer des discontinuités structurales grâce à un outil automatique développé dans le cadre d'un programme de recherche du BRGM. Ces discontinuités ont ensuite été corrélées avec les résultats des forages d'eau (débit obtenu rapporté à la profondeur) pour mettre en évidence des directions de discontinuités favorables ou défavorables à l'implantation de forages d'eau.

Les cartes de synthèse présentées dans ce rapport concernent toute la région Bretagne puis un zoom sur le secteur occidental du Léon.

En raison de l'échelle de travail, il a été choisi d'utiliser des données régionales pour le projet SILURES Bretagne (1/250 000) et des données détaillées pour le projet SILURES Bassins versants (1/50 000).

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne, le travail d'interprétation des données se finalisera au cours de la 4<sup>ème</sup> année du projet (interprétation des données de forages et des hydrogrammes des rivières). Il sera suivi d'une organisation et d'un archivage des données, puis d'un travail de réalisation et édition de cartographie de synthèse en année 5.

## 9. Bibliographie

BLAKELY R.J. and SIMPSON R.W. (1986) - Locating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies - Geophysics, 51, 1494-1498

CASTAING C. and DEBEGLIA N. (1992) - A new method for combining gravimetric and geological data - Tectonophysics, 204, 151-162

CLINE A.K. (1974) - « Scalar- and Planar- Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension » - Communications of the ACM v 17 n 4 p. 218-223

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 de Ploërmel (Morbihan) - BRGM/RP-50583-FR, 41 p., 19 fig., 1 tabl.

B. MOUGIN, A. CARN, N. DEBEGLIA, J. PERRIN et E. THOMAS avec la collaboration de J-P. JEGOU (2004) - SILURES Bretagne - Rapport d'avancement de l'année 2 - BRGM/RP-52825-FR - 62 p., 15 tabl., 23 fig., 3 ann.

THOMAS E., MOUGIN B., DEBEGLIA N., PERRIN J. (2002) – Apport des levés géophysiques aéroportés pour 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.