



RAPSODI
Recherche d'Aquifères Profonds
Dans le SOcle du Département
De l'Ille- et-Vilaine
Rapport provisoire 2006

BRGM/RP-54877-FR

septembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2006 : 06EAUUY01

Anne Carn et Eric Thomas



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1.CONTEXTE | 6 |
| 2. CONCEPT ACTUEL SUR LES AQUIFERES DE SOCLE..... | 7 |
| 3. LE PROJET RAPSODI SUR LES AQUIFERES PROFONDS (tranche supérieure à 60-70 m)..... | 8 |
| 3.1. DETERMINATION DE L'ECHANTILLON DES FORAGES « FRACTURÉS » CONNUS..... | 9 |
| 3.1.1.Les informations sur les forages existants..... | 9 |
| 3.1.2.Détermination de l'échantillon des forages considérés comme « fracturés » | 10 |
| 3.2. DETERMINATION DES ENSEMBLES GEOLOGIQUES LES PLUS FAVORABLES | 11 |
| 3.3. VALORISATION DES DONNES AEROMAGNÉTISME ET DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT) | 15 |
| 3.3.1.Le magnétisme aéroporté | 16 |
| 3.3.2.Le Modèle Numérique de Terrain : MNT | 23 |
| 3.4. VALORISATION DE L'ETUDE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES | 30 |
| 3.4.1.Objectif..... | 31 |
| 3.4.2.Photographies utilisées | 31 |
| 4.SYNTHESE ET CONCLUSIONS | 33 |

Liste des illustrations

FIGURES

| | |
|---|-----------|
| FIGURE 1 : SCHEMA CONCEPTUEL DU DOMAINE DE SOCLE | 8 |
| FIGURE 2 : GEOLOGIE ET LOCALISATION DES FORAGES SELECTIONNES POUR L'ETUDE..... | 12 |
| FIGURE 3 : PROFONDEURS ET DEBITS DES FORAGES DES DEUX SELECTIONS | 15 |
| FIGURE 4 : ROSACES DE DIRECTION DES DISCONTINUITES MAGNETIQUES PAR SECTEUR.... | 18 |
| FIGURE 5 : PRINCIPE DE SELECTION DES DISCONTINUITES MAGNETIQUES (ET DES LINEAMENTS)..... | 19 |
| FIGURE 6 : REPARTITION ET STATISTIQUES : FORAGES ET DISCONTINUITES MAGNETIQUE | 20 |
| FIGURE 7 : DEMI ROSACES DE FREQUENCE DES DISCONTINUITES ASSOCIEES AUX FORAGES ET REPARTITION DES DEBITS..... | 21 |
| FIGURE 8 : DISCONTINUITES MAGNETIQUES FAVORABLES..... | 23 |
| FIGURE 9 : LINEAMENTS ISSUS DU TRAITEMENT MANUEL DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN..... | 24 |
| FIGURE 10 : REPARTITION ET STATISTIQUES : FORAGES ET LINEAMENTS | 26 |
| FIGURE 11 : DEMI ROSACE DE FREQUENCE DES LINEAMENTS ASSOCIEES AUX FORAGES ET REPARTITION DES DEBITS..... | 27 |
| FIGURE 12 : LINEAMENTS FAVORABLES..... | 28 |
| FIGURE 13 : ENSEMBLE DES ZONES TAMPONS DES DISCONTINUITES FAVORABLES (MAGNETISME ET MNT)..... | 29 |
| FIGURE 14 : INTERSECTIONS DES ZONES FAVORABLES : MAXIMUM DE FAVORABILITE | 30 |
| FIGURE 15 : EVOLUTION DU DEBIT MOYEN DES FORAGES EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES FAILLES..... | 33 |

TABLEAUX

| | |
|--|-----------|
| TABLEAU 1 : COUPE DEBIT PROFONDEUR DU FORAGE N°BSS : 02453X0055..... | 9 |
| TABLEAU 2 : COUPE DEBIT PROFONDEUR DU FORAGE N°BSS : 02077X0153..... | 10 |
| TABLEAU 3 : RESULTATS DES FORAGES DE LA SELECTION INITIALE | 13 |
| TABLEAU 4 : RESULTATS DES FORAGES DE LA SELECTION FINALE..... | 14 |
| TABLEAU 5 : EVOLUTION DES DEBITS- PROFONDEURS EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES LINEAMENTS | 32 |

1.CONTEXTE

L'alimentation en eau potable de la Bretagne est principalement assurée, à hauteur de 80 % de ses besoins, à partir d'eaux de surface et les dernières années (années de sécheresse) ont fait apparaître des situations nouvelles de déficit en eau, aggravées par la présence de teneurs non négligeables en nitrates et pesticides. Le reste des besoins est essentiellement satisfait par des puits peu profonds et des forages d'une profondeur moyenne de l'ordre de 50 m (entre 20 et 100 m).

Quelques forages « profonds », supérieurs à 100 m, implantés « au hasard », ont été réalisés, en Bretagne, à l'initiative de foreurs et de promoteurs privés. Les résultats obtenus apparaissent très encourageants :

- les débits instantanés atteignent fréquemment 25 m³/h, voire parfois 50 m³/h, et surtout paraissent augmenter progressivement avec la profondeur, notamment lorsque celle-ci se situe entre 150 et 300 m ;
- la qualité des eaux extraites semble satisfaisante, particulièrement en ce qui concerne les nitrates dont la teneur diminue progressivement avec la profondeur (phénomène de dénitrification naturelle), même au-dessous d'une profondeur de 150 m.

Ces forages sont des indicateurs de possibilité de présence d'aquifères profonds potentiellement exploitables dans le socle breton. Afin de vérifier cette éventualité, ont été programmées, en concertation avec l'Agence de l'eau Loire Bretagne, le Conseil Régional, le Conseil Général de l'Ille et Vilaine et le Syndicat de gestion des Eaux de l'Ille et Vilaine :

- l'identification des processus physiques (nature des structures géologiques et hydrogéologiques favorables) qui sont à l'origine de ces fortes perméabilités afin de mettre au point **une méthodologie permettant d'implanter des forages profonds avec un taux de succès (tant du point de vue qualitatif que quantitatif) économiquement acceptable** ;
- la vérification de l'existence de ressources significatives et durables en eau profonde dans le socle breton, en termes de quantité (s'assurer que des débits significatifs pourront y être tenus à long terme), et de qualité (s'assurer que les eaux sont de bonne qualité et le resteront également à long terme, en particulier du point de vue des polluants d'origine agricole et des métaux lourds) ;
- une réflexion dès à présent sur la façon de protéger les ressources de demain.

Cette méthode, développée en Bretagne a, par ailleurs, vocation à être généralisée dans d'autres régions de socle.

Si des réserves en eau de bonne qualité étaient démontrées à une profondeur supérieure à 200 m en Bretagne, de nouvelles perspectives s'ouvriraient pour l'alimentation en eau potable de cette région. Une telle ressource complémentaire à débit élevé et dénitrifiée naturellement lors de son transfert au travers des formations géologiques du socle serait précieuse, en particulier pour les zones à fort taux de nitrates ou pesticides et pour les zones actuellement réputées pauvres en eaux souterraines (entre 20 et 100 m de profondeur). L'état de nos connaissances du sous-sol armoricain nous permet un optimisme raisonnable.

2. CONCEPT ACTUEL SUR LES AQUIFERES DE SOCLE

Dans le cadre de ces opérations de Service public, le BRGM a entamé en 2001 la réalisation du projet SILURES (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eau Souterraine) avec le partenariat de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, du MEDD, de la Région Bretagne, des départements des Côtes d'Armor, du Finistère et du Morbihan, rejoints en 2006 par le département d'Ille-et-Vilaine. Ce projet propose, entre autres, la création d'un Système d'Information sur les eaux souterraines, l'un au niveau de la Bretagne (SILURES Bretagne), l'autre au niveau des bassins versants (SILURES Bassins versants).

Cette étude est basée sur un modèle de répartition de la porosité au sein des formations géologiques du Massif armoricain¹. Un profil-type des premières dizaines de mètres du sous-sol a été conceptualisé ; il comprend différents horizons (cf. Fig.1) :

Sous les niveaux à sédiments résiduels et les niveaux à altérites meubles (arènes, argiles), le modèle distingue très clairement un domaine de socle où coexistent des fissures horizontales résultantes de l'altération (hydratation) de certains minéraux, notamment de la biotite, et des fractures « verticales » profondes (failles) générées par les contraintes tectoniques. En dessous de ce niveau, (front d'altération), les roches ne sont plus ou très peu altérées : les fissures horizontales tendent à s'espacer puis à disparaître. En revanche, les structures tectoniques persistent car elles se propagent sur des épaisseurs bien plus considérables : plusieurs kilomètres pour les plus importantes d'entre elles. Le profil d'altération tend à s'enfoncer un peu (quelques dizaines de mètres) sous le niveau fissuré le long de ces structures verticales car elles constituent un drain privilégié pour les eaux d'infiltration.

Le projet SILURES a pour objet d'établir des cartes des altérites et du milieu fissuré (tranche de 40 à 60 m d'épaisseur sous les altérites) et des cartes piézométriques à partir des données de sondages de la BSS et des levés aéromagnétiques et

¹ R. WYNS. Brgm (1999).

géophysiques récents. L'objectif principal est d'établir un modèle de fonctionnement des aquifères les plus répandus constitués de la zone altérée et de la zone fissurée, dans le but d'appréhender la vitesse de renouvellement de l'eau de la nappe. Cette approche doit également permettre à terme, de délimiter des zones productives de bonne qualité et la définition de secteurs à protéger, préférentiellement dans les bassins-versants. Cependant, SILURES ne prend pas en compte les zones de fractures tectoniques qui, on le sait depuis longtemps, constituent des drains privilégiés : les forages qui y sont implantés permettent fréquemment une production d'eau avec des débits importants. Ce sont ces structures qui seront principalement étudiées dans le projet « RAPSODI ».

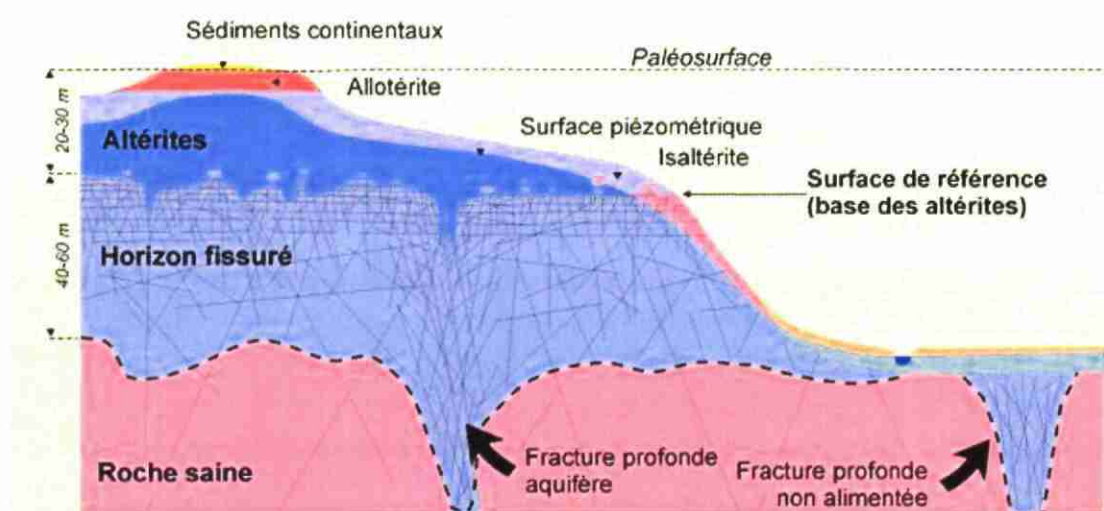


Figure 1 : Schéma conceptuel du domaine de socle

3. LE PROJET RAPSODI SUR LES AQUIFERES PROFONDS (tranche supérieure à 60-70 m)

Le projet RAPSODI vient en complément de SILURES car il porte sur la zone sous-jacente à la zone fissurée, c'est-à-dire la zone fracturée. Dans certains secteurs du socle, les événements tectoniques ont créé des couloirs affectés de fracturation profonde dont la trace sub-rectiligne en surface est parfois pluri-kilométriques mais dont l'extension verticale est encore actuellement mal définie (de quelques mètres à plusieurs kilomètres) ; ce sont ces zones qui sont recherchées dans le cadre de RAPSODI jusqu'à 300 m de profondeur. Cette profondeur n'a encore jamais été atteinte dans le socle de l'Ille et Vilaine, les approches pour déterminer les zones à

priori favorables à l'implantation de forages profonds utiliseront un échantillon constitué des forages connus ayant été catalogués comme indicateurs de fracturation profonde. A partir de cet échantillon, l'influence de la géologie sera analysée, puis trois méthodes de reconnaissance des domaines faillés seront testées afin de déterminer des axes de fracturation à priori favorables à l'obtention de bons débits en profondeur. Ces trois méthodes utiliseront les données des levés aéromagnétiques, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et les résultats de l'analyse des photographies aériennes

3.1. DETERMINATION DE L'ECHANTILLON DES FORAGES « FRACTURÉS » CONNUS

3.1.1. Les informations sur les forages existants

Au titre de l'article 132 du code minier, le BRGM reçoit des renseignements sur les forages réalisés par les entreprises. La qualité des données est variable selon celles-ci. Ont été exploités les forages correctement localisés pour lesquels étaient donnés au moins des couples de débits -profondeurs avec éventuellement une coupe géologique foreur. Cela a permis de repérer les forages recoupant la zone fissurée (jusqu'à de l'ordre de 60-80 m de profondeur) ou la zone fracturée, ou, comme dans certains cas, d'abord la zone fissurée, puis la zone fracturée sous-jacente. L'attribution du caractère « fracturé » s'appuie sur la profondeur de la première arrivée d'eau, supérieure à 40 m, et/ou sur l'espacement entre deux arrivées d'eau successives, au moins 30 m.

Un forage peut atteindre directement la zone considérée comme fracturée sans traverser de zone fissurée, comme dans l'exemple suivant où le forage recoupe une zone fracturée qui démarre à 85 m de profondeur :

Exemple : n°BSS : 02453X0055

| Profondeur des arrivées d'eau | Débit cumulé (m3/h) |
|-------------------------------|---------------------|
| 17 | humidité |
| 85 | 1ère eau |
| 100 | 2.4 |
| 127 | 3.6 |
| 130 | 9 |
| 136 | 18 |
| 139 | 36 |
| 142 | 46 |
| 145 | 52 |
| 147 | 55 |

Tableau 1 : coupe débit profondeur du forage n°BSS : 02453X0055

Dans cet autre exemple, le forage recoupe, sous une épaisseur d'altérites de 30 m, la zone fissurée jusqu'à 85 m de profondeur : la première arrivée d'eau est à moins de 40 m de profondeur et les arrivées d'eau sont régulières jusqu'à la profondeur de 85 m. De 85 à 136 m, les arrivées d'eau sont minimales puis, à partir de 136m, le débit cumulé augmente très régulièrement jusqu'en fin de forage. Ceci traduit vraisemblablement la traversée d'une fracture profonde, celle-ci pouvant se poursuivre au-delà de la profondeur atteinte par le forage.

Exemple : n° BSS : 02077X0153

| Profondeur des arrivées d'eau | Débit cumulé (m3/h) |
|-------------------------------|----------------------|
| 30 | 1 ^{ère} eau |
| 40 | 1.4 |
| 52 | 2.4 |
| 64 | 4.8 |
| 70 | 6.1 |
| 85 | 7.2 |
| 136 | 8.5 |
| 148 | 14.4 |
| 175 | 16 |
| 184 | 21 |
| 193 | 23 |
| 202 | 25 |

Tableau 2 : coupe débit profondeur du forage n°BSS : 02077X0153

3.1.2. Détermination de l'échantillon des forages considérés comme « fracturés »

Les travaux ne concernent que le département de l'Ille et Vilaine, mais, afin d'améliorer les données statistiques, la zone sélectionnée pour l'échantillon des forages existants analysés a été élargie à la partie est des Côtes d'Armor et à la partie est du Morbihan, les structures géologiques ne tenant pas compte des limites administratives.

Dans la zone géographique déterminée, la localisation, le débit à la foration et la profondeur sont connus pour 5344 forages. Pour l'échantillon final, indicateur de zones fracturées productrices, n'ont été conservés que les forages de plus de 10 m³/h, et recoupant la zone de fracturation profonde, c'est-à-dire les forages dont la profondeur est supérieure à 70 m pour les ouvrages classés comme « fracturé » et supérieure à 60 m sous l'altération pour les ouvrages classés comme « fissurés ». Il reste alors 522 forages qui vont être utilisés pour les tests statistiques.

3.2. DETERMINATION DES ENSEMBLES GEOLOGIQUES LES PLUS FAVORABLES

Les fonds géologiques, au 1/50000^{ème} ne sont pas tous disponibles sous forme informatique et papier ; il a fallu dans certains cas, utiliser les cartes papier au 1/80000^{ème} qui sont plus anciennes. Une homogénéisation des données a été nécessaire dans certains secteurs. A chaque forage a été attribuée une formation géologique en fonction de sa localisation. Le nombre de formations géologiques différentes étant très important, celles-ci ont été regroupées (critère lithologiques et « ressemblance » tectonique), dans la mesure du possible, selon dix grands ensembles géologiques ; certains groupes peu représentatifs du fait du faible nombre de forages recensés ont été éliminés (ce qui représente 451 forages) ceci afin de pouvoir réaliser une approche statistique comparative entre les résultats de l'ensemble des forages de la zone d'étude et les forages de la sélection (les forages sélectionnés sont reportés sur la figure 2).

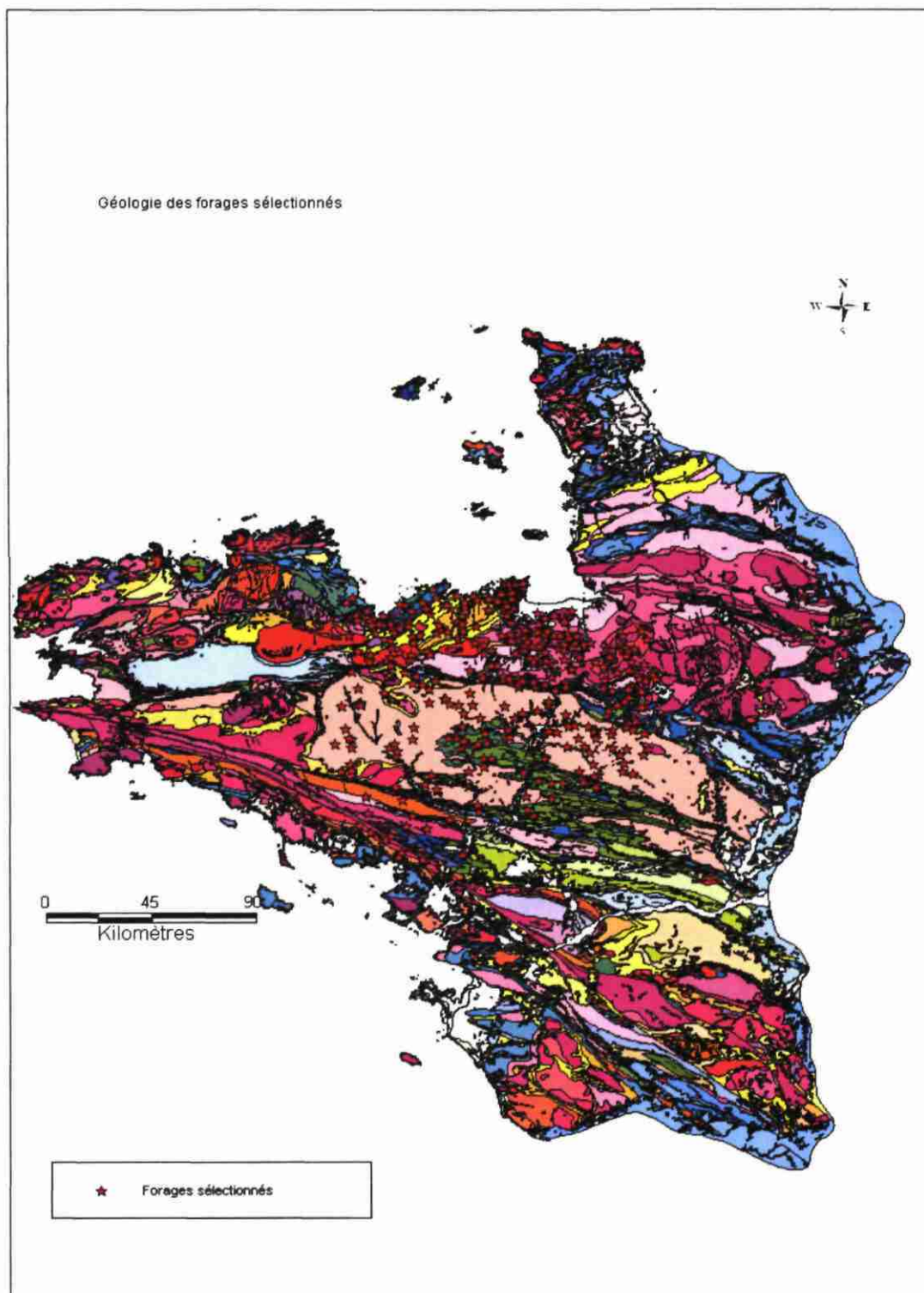


Figure 2 : Géologie et localisation des forages sélectionnés pour l'étude

Les résultats présentés ci-dessous concernent la totalité des forages de la zone étudiée (sélection dite « initiale »). Pour chaque groupe géologique ont été indiqués le débit moyen, la profondeur moyenne, ainsi que les extrêmes des débits et profondeurs afin de mettre en avant la (les) formation(s) géologique(s) la (les) plus productive(s).

| groupe | sélection initiale : l'ensemble des forages de la zone | | | | | | |
|-----------------------------|--|--------|--------|------|------|------|------|
| | effectif | Qmoyen | Pmoyen | Qmin | Qmax | Pmin | Pmax |
| Gneiss Nord | 482 | 13,5 | 68,15 | 0 | 180 | 20 | 202 |
| Diorite Nord | 74 | 13,32 | 86 | 0,1 | 60 | 10 | 178 |
| Cornéennes | 296 | 11,77 | 61,21 | 0 | 160 | 19 | 225 |
| Granite Cadomien Nord | 559 | 11,2 | 71,02 | 0 | 155 | 13 | 178 |
| Grès et Quartzites Primaire | 69 | 10,14 | 71,82 | 0,3 | 60 | 34 | 196 |
| Micaschistes et Gneiss | 509 | 9,5 | 92,64 | 0 | 170 | 17 | 205 |
| Schistes et Grès Primaire | 374 | 8,24 | 64,44 | 0 | 150 | 10 | 162 |
| Schistes et Grès Briovérien | 2038 | 8,04 | 57,09 | 0 | 100 | 6 | 260 |
| Schistes Primaire | 229 | 7,65 | 61,57 | 0 | 36 | 11 | 199 |
| Granite Hercynien | 574 | 5,5 | 68,12 | 0 | 115 | 10 | 244 |
| | 5204 | 9,9 | 70,2 | 0 | 180 | 6 | 260 |

Tableau 3 : Résultats des forages de la sélection initiale

Sur la totalité des forages de la zone étudiée, le débit moyen est de 9,9 m³/h pour une profondeur moyenne de 70,2 m.

Dans la majorité des ensembles géologiques (7 sur 10), il est possible de rencontrer des débits importants, supérieurs à 100 m³/h. Deux ensembles sont caractérisés par des débits extrêmes à 60 m³/h et seulement l'un d'entre eux a des débits extrêmes modérés, autour de 40 m³/h.

Le classement des ensembles géologiques en fonction du débit moyen montre que l'ensemble des « Gneiss Nord » constituent l'entité géologique la plus intéressante : Q moy = 13,5 m³/h ; ce sont également les ensembles où l'on trouve le débit extrême le plus élevé : 180 m³/h. L'ensemble des « Diorites Nord » se placent en second, Q moy = 13,3 m³/h pour des forages significativement plus profonds, P moy = 86 m, et le débit extrême n'atteint que 60 m³/h. Viennent ensuite les ensembles « Cornéennes » « Granites Cadomien Nord » avec des débits moyens autour de 11 m³/h et des débits extrêmes intéressants, supérieurs à 150 m³/h. L'ensemble des « Grès et Quartzites Primaire » a un débit moyen 10,1 m³/h et un débit extrême de 60 m³/h. L'ensemble des « Micaschistes et Gneiss » est légèrement en dessous, Q moy = 9,5 m³/h mais le débit extrême atteint 170 m³/h. Les ensembles « Schistes et Grès Primaire » et « Schistes et Grès Briovérien » se situent autour de 8 m³/h alors que l'ensemble des « Schistes Primaire » a un débit moyen légèrement inférieur, Q moy = 7,6 m³/h.

L'ensemble des « Granites Hercynien » apparaît comme l'ensemble le moins performant avec seulement 5,5 m³/h de débit moyen.

Le même type de démarche a été réalisé sur l'échantillon des forages « fracturés » (sélection finale : Q>10 m³/h et P>60-70m)

Sélection finale : forages fracturés

| groupe | effectif | Qmoyen | Pmoyen | Qmin | Qmax | Pmin | Pmax |
|-----------------------------|----------|--------|--------|------|------|------|------|
| Cornéennes | 57 | 29,9 | 93 | 10 | 160 | 62 | 225 |
| Gneiss Nord | 65 | 24,5 | 91,95 | 10 | 65 | 61 | 166 |
| Schistes et Grès Primaire | 39 | 24,1 | 96,57 | 10 | 150 | 62 | 162 |
| Granite Cadomien Nord | 93 | 21,7 | 110,8 | 10 | 126 | 10 | 165 |
| Schistes et Grès Briovérien | 135 | 20,49 | 82,42 | 10 | 55 | 64 | 160 |
| Grès et quartzites Primaire | 16 | 20,41 | 102,4 | 10 | 60 | 70 | 131 |
| Granite Hercynien | 27 | 19,6 | 97,59 | 10 | 115 | 64 | 175 |
| Micaschiste et Gneiss | 54 | 19,21 | 116,05 | 10 | 170 | 61 | 205 |
| Schistes Primaire | 12 | 17,59 | 98,5 | 11 | 27 | 70 | 199 |
| Diorite Nord | 9 | 14,16 | 93,215 | 10 | 22 | 76 | 103 |
| | 507 | 21,17 | 98,25 | 10 | 170 | 10 | 225 |

Tableau 4 : Résultats des forages de la sélection finale

Du fait des critères de sélection, les débits et profondeurs moyens augmentent automatiquement, atteignant 21,1 m³/h et 98 m.

Le classement évolue drastiquement : l'ensemble des « Cornéennes » se place en tête ; l'ensemble des « Gneiss Nord » se situe en seconde position mais le débit maximal est retombé à 65 m³/h. L'ensemble « Granite Cadomien Nord » reste en quatrième position. Les ensembles « Schistes et Grès Primaire » et « Schistes et Grès Briovérien » ainsi que l'ensemble des « Granites Hercynien » se placent beaucoup mieux que précédemment alors que l'ensemble des « Diorites Nord » rétrograde en dernière position.

Il faudra s'appuyer sur ces résultats pour guider le choix de l'implantation des futurs ouvrages.

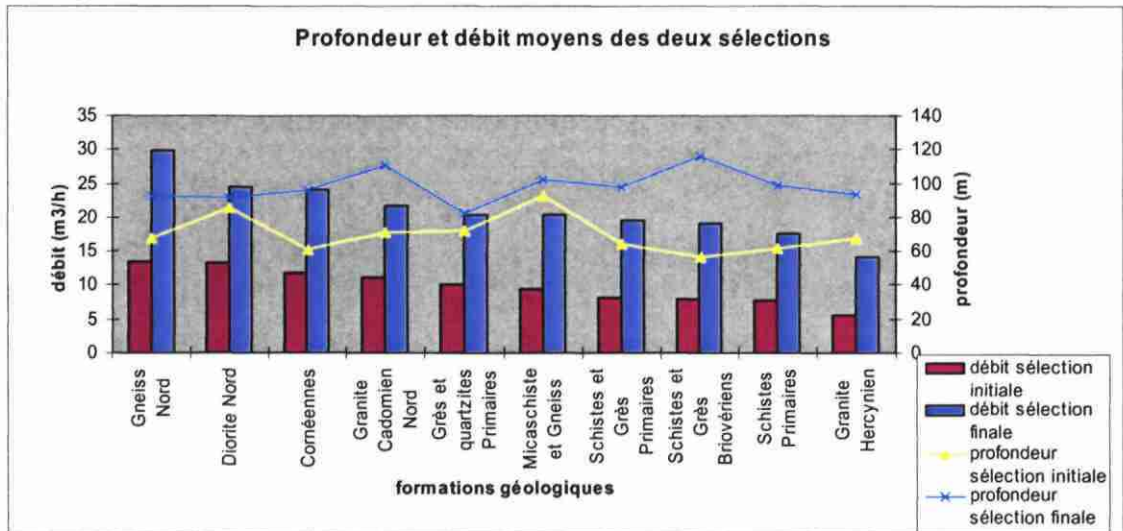


Figure 3 : Profondeurs et débits des forages des deux sélections

3.3. VALORISATION DES DONNÉES AÉROMAGNÉTISME ET DU MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN (MNT)

Le projet RAPSODI bénéficie du travail déjà effectué dans le cadre de l'opération SILURES qui a mis en évidence que les données du magnétisme aéroporté pouvaient servir notamment dans la détermination des accidents profonds (plusieurs centaines de mètres) à très profonds (plusieurs Km). Par ailleurs, il a été démontré que ces informations sont complémentaires avec celles issues du Modèle Numérique de Terrain : MNT de l'I.G.N. pour la détermination d'accidents ou discontinuités profondes. La radiométrie spectrale (méthode géophysique basée sur l'analyse des teneurs et concentration en uranium, thorium et potassium) n'a pas été utilisée car les informations obtenues ne concernent qu'une tranche de terrain très largement inférieure à 50 m. Les résultats issus du traitement automatique des données aéromagnétiques et des données fournies par le MNT (cf. rapport BRGM/RP-53621-FR) ont été adaptés pour l'échantillon sélectionné des forages profonds.

3.3.1. Le magnétisme aéroporté

3.3.1.1. Données existantes

Une campagne de lever aéromagnétique a été effectuée sur la baie de Saint-Brieuc et la région de Saint-Malo en 1992, par la 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 suivant « Massif Armoricaïn », principalement du fait d'une altitude de vol en moyenne un peu plus élevée, ce secteur n'a pas été re-survolé en 1998.

De mi-juillet à fin octobre 1998, le BRGM a conduit une campagne géophysique aéroportée sur le reste du Massif armoricaïn (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 Armoricaïn » 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 précisé par GPS différentiel complété par les enregistrements d'un baro-altimètre et d'un altimètre radar.

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 subies 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 Armoricaïn », 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.

Les discontinuités magnétiques sont des structures courbes ou rectilignes obtenues par tracé des gradients maximum de la grille 125m * 125m du champ magnétique réduit au pôle. Ces gradients sont indéniablement liés aux grandes fractures affectant le socle (généralement riches en minéraux ferro-magnésiens = qui donnent l'aimantation) mais peuvent aussi être la signature d'autres structures comme des corps filoniens non nécessairement associés à des zones de failles ou des limites entre formations géologiques à aimantation très distincte. Ces gradients peuvent signaler des structures très profondes (plusieurs centaines de mètres voire plusieurs kilomètres) non forcément affleurantes : on a encore beaucoup de difficulté à connaître la profondeur exacte d'une source magnétique ; il existe quelques méthodes dont « la recherche des sources d'Euler » mais qui offrent des possibilités multiples et non fiables. Lors calcul du tracé automatique, de nombreux paramètres garnissent les champs de la table attributaire des discontinuités : longueur, nombres de segments, orientation moyenne, orientation globale etc.... L'orientation globale est choisie par la suite pour le calcul des rosaces de direction.

Pour l'analyse des discontinuités magnétiques, le secteur d'étude a été divisé en quatre parties qui sont connues pour être structurellement assez différentes.

Orientation des discontinuités (5155 tracés) : Les demi-rosaces de direction (rosaces rapportées sur 0 – 180°, fig. 3) montrent une distinction nette entre le Nord et le Sud.

Dans la partie méridionale, ce sont des directions structurales particulièrement bien connues sur le Massif armoricain qui prédominent avec les directions N90° - N130°. Les discontinuités sont globalement parallèles aux grands cisaillements hercyniens (≈ -300 Ma) et pourraient, pour un grand nombre d'entre elles, être la signature de répliques cassantes de ces grandes failles crustales.

Dans la partie septentrionale, on observe une dispersion plus importante des discontinuités. Le secteur Nord-Est montre une répartition plus symétrique des directions avec des maxima observés autour de N90° plus ou moins 30°. Ceci s'explique aussi par le canevas de failles régionales : dans ce secteur, le cisaillement nord-armoricain change de direction pour s'orienter environ dans la direction N90°. Le Secteur Nord-Ouest enfin montre une dispersion des orientations avec moins d'individus dans les grandes familles citées ci-dessus mais une population plus importante dans les directions avoisinant N50°- N90° et N130° - N160° en liaison avec le schéma tectonique régional où se surimposent aux directions hercyniennes les anciennes directions liées à l'orogène cadomien (≈ -600 Ma)

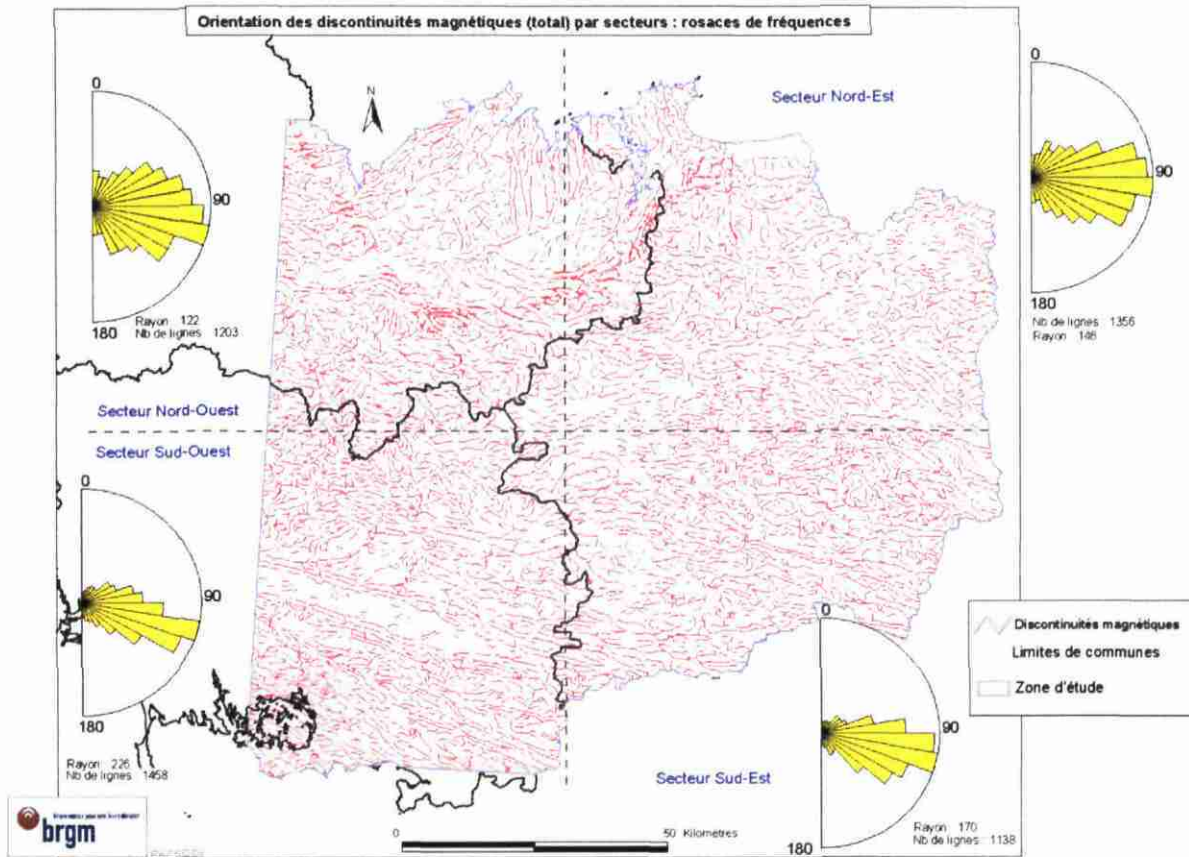


Figure 4 : Rosaces de direction des discontinuités magnétiques par secteur

Traitement des données – sélection des discontinuités favorables

Afin de déterminer les orientations les plus favorables pour la recherche en eau profonde, les discontinuités ont été triées selon un simple critère : la présence dans leur voisinage immédiat d'un ou plusieurs forages répondant aux critères de sélection définis précédemment (cf. chapitre 3.1.2). L'opération est effectuée sous SIG (logiciel Arcmap de Arcgis © et le module SYNARC © développé par le BRGM). Autour de chaque discontinuité est dessinée une zone tampon de 500m de rayon : c'est approximativement la distance d'influence d'une faille sur son environnement immédiat. Les deux sets de données (forages sélectionnés et zones tampons) sont ensuite superposés et l'on ne conserve que les discontinuités dont les zones tampons sont associées à un ou plusieurs forages (Fig. 4). Cette méthode de sélection sera aussi employée pour les linéaments issus du traitement du modèle numérique de terrain. Les forages « renseignants » sont aussi sélectionnés afin de permettre une comparaison avec l'ensemble des forages « fracturés » (cf. Chapitre 3.2).

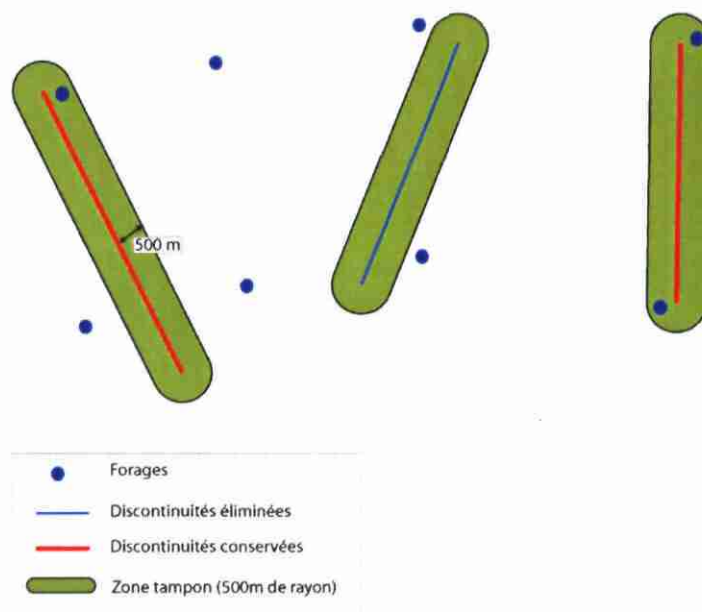


Figure 5 : Principe de sélection des discontinuités magnétiques (et des linéaments)

Résultats pour les forages : 400 forages sur les 521 forages « fracturés » sont conservés à l'issue de la sélection par zones tampons (76,77% des forages). Leur répartition spatiale (Fig. 5) semble homogène par rapport à la répartition spatiale des 521 forages « fracturés ». Les statistiques sur les débits associés aux forages renseignant montrent principalement une moyenne plus élevée de presque 1.4 point (24,12 contre 22,67 m³/h) : les forages à proximité des discontinuités magnétiques sont donc, en moyenne, un peu plus productifs, ceci tendrait à valider en première approximation l'association forages productifs – discontinuité magnétique (couloir drainant). De plus, les débits extrêmes les plus forts sont observés pour l'ensemble des forages renseignant (170 m³/h contre 130 m³/h). Les statistiques sur la profondeur des ouvrages ne montrent pas de variation réellement significative : les forages conservés sont en moyenne plus profonds de 5m que les forages exclus et les forages les plus profonds sont conservés dans l'ensemble des forages renseignant ce qui tend à valider, encore une fois, la pertinence de l'association forages productifs et discontinuités magnétiques.

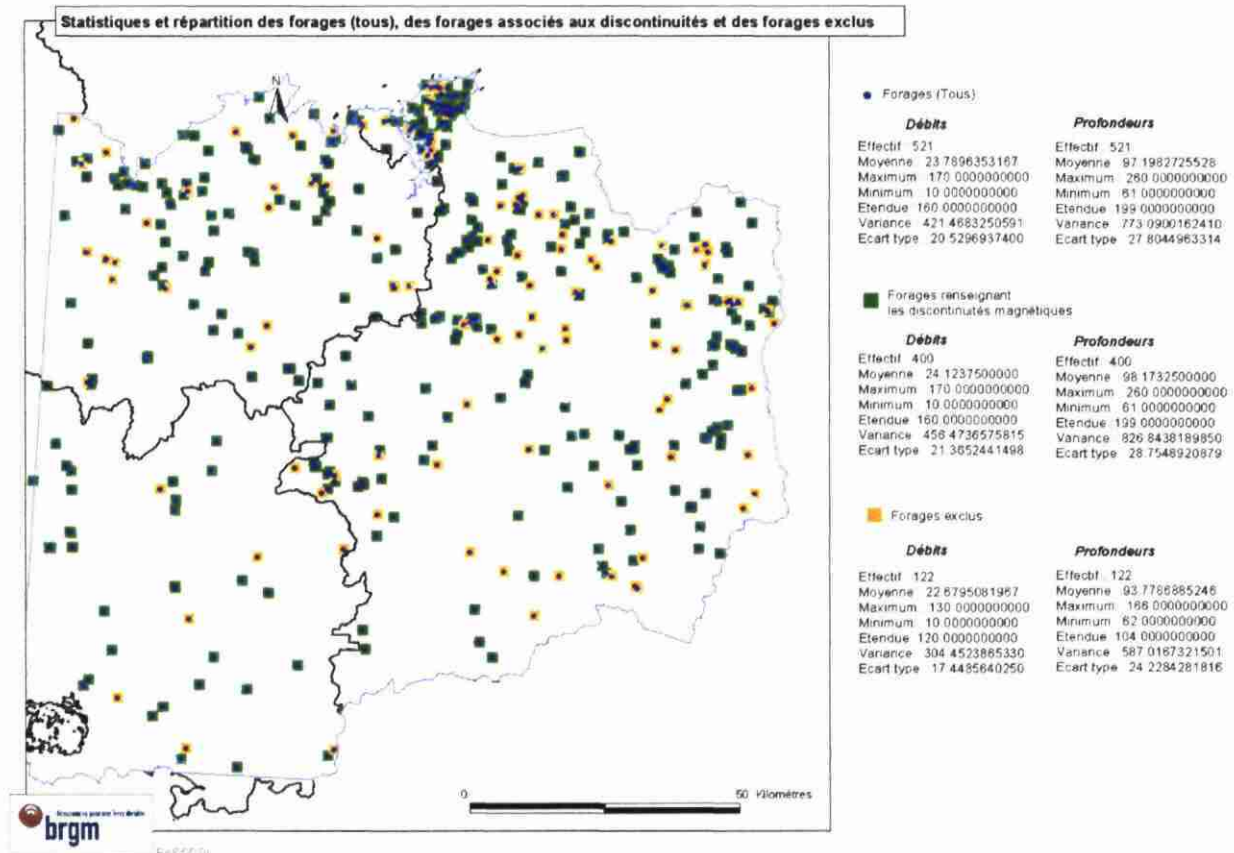


Figure 6 : Répartition et statistiques : forages et discontinuités magnétiques

Orientations des discontinuités magnétiques sélectionnées :

Comme pour l'ensemble des discontinuités magnétiques, des demi rosaces de fréquences ont été construites pour les discontinuités renseignées (380 individus, soit 7,4% de la population d'origine) associées à des forages dans leur zone d'influence (Fig.6). Les résultats obtenus par secteurs sont assez variables, ce qui traduit bien les différences de style structural. Le secteur Sud-Ouest est caractérisé par une demi rosace très dissymétrique avec des orientations principales variant de N110° à N130° soulignant la famille de failles parallèle au cisaillement sud-armoricain. La demi rosace de fréquence du secteur Sud-est reste aussi relativement dissymétrique avec une population principale selon des directions N90° - N110°, parallèles aux grandes structures cassantes connues dans ce secteur (faille Malestroit – Angers et faille de St-Marcel). Le secteur Nord-Est présente une demi rosace beaucoup plus symétrique avec une population principale de direction N90°- N100°, parallèle à la trace majeure du cisaillement nord-armoricain et des populations satellites orientées N70° - N90° et N100° - N120°, respectivement parallèles aux directions structurales cadomiennes (région de St-Malo) et à la virgation d'une des branches du cisaillement nord-armoricain aux abords de Vitré. On peut noter qu'une population N160°-N170° s'individualise assez bien ; elle est caractérisée par un nombre assez réduit de

discontinuités mais l'examen de la longueur des tracés montre que ce sont les individus les plus continus (plusieurs kilomètres). Enfin, dans le secteur Nord-Ouest, la demi rosace montre des populations de discontinuités avec des directions très variables : on retrouve globalement les directions Est – Ouest (N80° à N110°) mais les directions cadomiennes (N60° – N70°) sont très clairement distinguées (régions de Lamballe et d'Erquy), ainsi que localement des directions N140° - N160°, parallèle au faisceau de faille de Quessoy-Nort Sur Erdre.

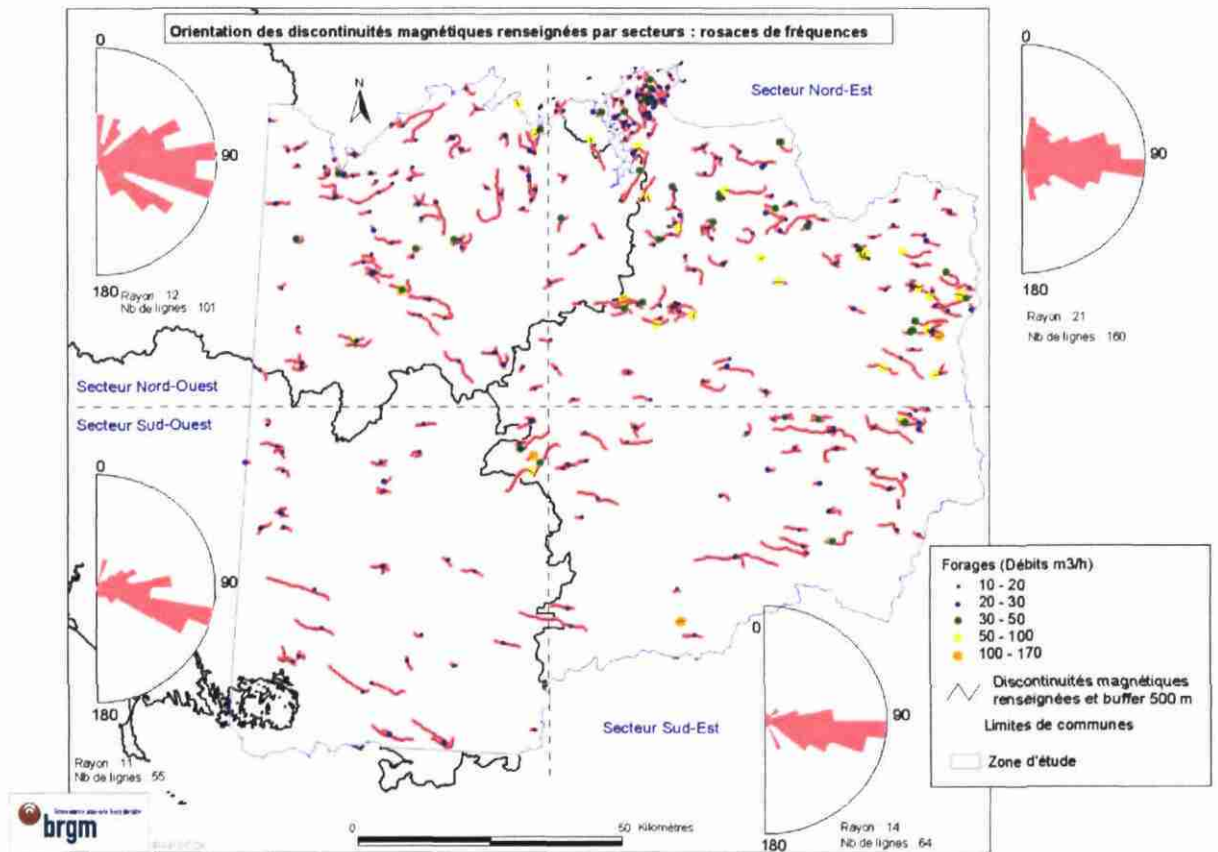


Figure 7 : Demi rosaces de fréquence des discontinuités associées aux forages et répartition des débits

Les débits les plus importants (Fig. 6) sont globalement observés pour les forages localisés à proximité de la famille de discontinuités dominantes pour les trois secteurs Sud-est, Nord-Est et Nord-Ouest. Localement, dans la région de Saint Malo, il est à noter qu'un grand nombre de hauts débits est associé aux forages liés à la famille N160° - N170° qui correspond à un ensemble de corps filoniens doléritiques.

Dans le secteur Sud-Ouest, les débits les plus importants sont associés à des forages se localisant à proximité d'une famille de discontinuités orientée N40° – N50° assez peu représentée sur la demie rosace de fréquence. Cette direction structurale

particulière est connue sur le Massif armoricain et correspond globalement à la direction conjuguée de grandes failles orientées N140° - N160° que le magnétisme ne met pas en évidence mais que le modèle numérique de terrain (cf. 3.3.2.) souligne particulièrement bien.

Choix des directions favorables : à l'issue de l'analyse précédente, il apparaît que certaines grandes familles de directions de discontinuités magnétiques semblent particulièrement plus favorables à l'obtention de forts débits pour les forages localisés à proximité immédiate. Ces directions ont été répertoriées et le critère de sélection a été ensuite appliqué à l'ensemble des discontinuités magnétiques (Fig. 3). On obtient ainsi pour toute la zone d'étude (Fig. 7) une carte dite de « favorabilité ». Il s'agit d'une carte de probabilité : elle traduit simplement le fait que l'on a statistiquement plus de chance d'obtenir de hauts débits si l'on place un forage à proximité d'une de ces discontinuités. Elle ne traduit en aucun cas l'assurance d'obtenir de hauts débits. Les populations de discontinuités ont été classées selon deux critères : le nombre d'individus représentés et la moyenne des débits des forages proches. Six classes de directions ont ainsi été conservées avec une classe de direction N100° - N110° la plus importante en nombre d'individus. Un code couleur a été employé afin de souligner particulièrement le critère de favorabilité. Ainsi, par exemple, la classe de direction N100° - N110° est jugée comme étant la plus favorable alors que la classe N70° - N80° semble être de favorabilité moyenne (moyenne +) mais supérieure à celle de la classe N60° - N70° (moyenne -). Les autres directions sont, soit mal renseignées, soit moins performantes.

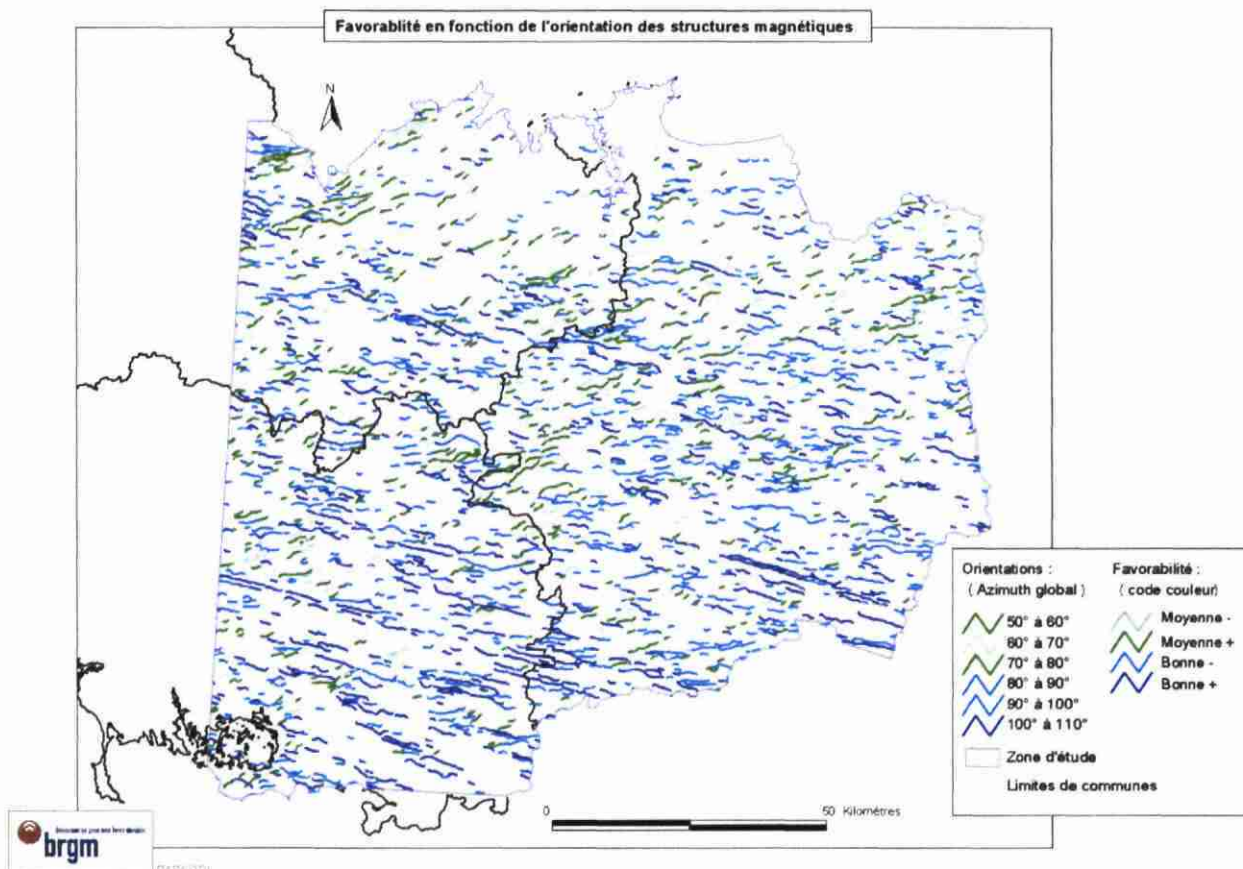


Figure 8 : Discontinuités magnétiques favorables

3.3.2. Le Modèle Numérique de Terrain : MNT

Le modèle numérique de terrain (MNT) produit par l'IGN renseigne l'altitude du sol sur chaque maille de 50 X 50 m sur la Bretagne. Il s'agit d'une interpolation statistique des courbes de niveaux figurant sur les cartes au 1/50.000. Les linéaments sont des structures plus ou moins rectilignes le plus souvent mises en évidence par un ombrage du modèle numérique de terrain dans plusieurs directions et inclinaisons. Ils correspondent donc évidemment à des structures affleurantes mais sont aussi les témoins superficiels de structures (failles) se prolongeant vraisemblablement beaucoup plus profondément. Il s'agit ici d'un tracé manuel ; l'analyse automatique étant, pour les gradients d'altitude, moins performante (mise en évidence de paliers...) que pour les gradients magnétiques. Dans la mesure du possible, les bordures de vallées encaissées, qui se traduisent sur le MNT par des structures rectilignes bien marquées (« artefact rectiligne »), n'ont pas été tracées lorsqu'elles ne semblaient pas être associées à une structure faillée (connaissance géologique locale ou régionale). Le calcul de l'orientation des linéaments obtenus est effectué par module Synarc© (BRGM) sous le logiciel SIG Arcview©.

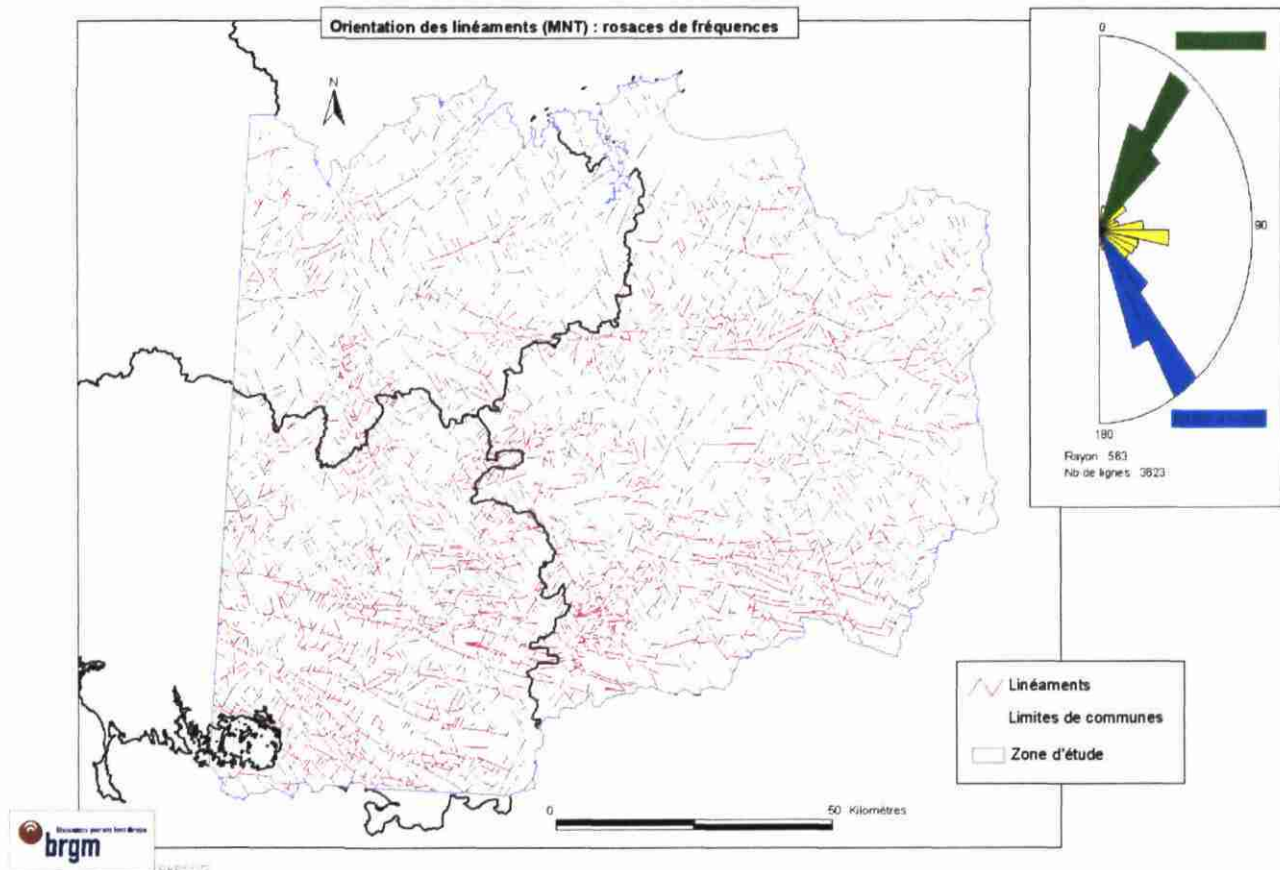


Figure 9 : Linéaments issus du traitement manuel du modèle numérique de terrain

Orientations des linéaments : 3623 tracés ont été réalisés ; ils sont notablement plus longs que les tracés automatiques des discontinuités magnétiques car le dessin manuel a tendance à s'affranchir des petites interruptions de gradients pour proposer des structures plus continues à l'échelle locale ou régionale. Comme pour les discontinuités magnétiques, une demi-rosace de fréquence a été construite afin de déterminer les orientations principales des structures affleurantes. La demi-rosace obtenue (Fig. 8) est significativement différentes de celles concernant les discontinuités magnétiques. On retrouve les populations de structures orientées N90° - N110° mais elles sont en nombre très inférieur aux deux populations N20° - N50° et N130° - N160°. La population N90° - N110° correspond à des accidents cassants parallèles au Cisaillement sud-armoricain (faille Malestroit – Angers, faille de St-Marcel) aussi mis en évidence par le tracé des discontinuités magnétiques. Les deux autres familles concernent des structures parallèles à de grandes failles dites « tardives » qui se sont formées à la fin de l'orogénèse hercynienne (vraisemblablement vers -290 Ma) lors du réajustement gravitaire de la chaîne. Ces structures sont donc sans doute plus jeunes que les structures mises en évidence par le lever aéromagnétique et ont joué tout au

long des 200 derniers millions d'années, lors de l'ouverture de l'Atlantique nord (-180 Ma), lors de la compression pyrénéenne (-70 Ma), lors de l'ouverture des fossés de Limagne et du Rhin (- 30 Ma) et sont toujours actives aujourd'hui (compression alpine – ce sont actuellement sur ces failles que se localisent les principaux séismes) : leurs talus sont donc pour la plupart visibles dans le paysage.

Traitement des données – sélection des linéaments favorables

La méthode d'association forages – structures a été appliquée de la même façon que pour les discontinuités magnétiques. 213 lignes sont sélectionnées par la méthode ce qui correspond à peine à 5.8% de la population d'origine.

Résultats pour les forages : 236 forages (45,3% de l'ensemble des forages « fracturés ») se trouvent à proximité (zone tampon de 500 m) d'un linéament (Fig. 9) ; ce pourcentage plus faible par rapport à celui concernant les discontinuités magnétiques s'expliquant simplement par une densité (et un nombre) de lignes moins importante. Les forages associés aux discontinuités ont une moyenne de débits un peu supérieure à celle des forages exclus mais cela n'est pas très significatif.

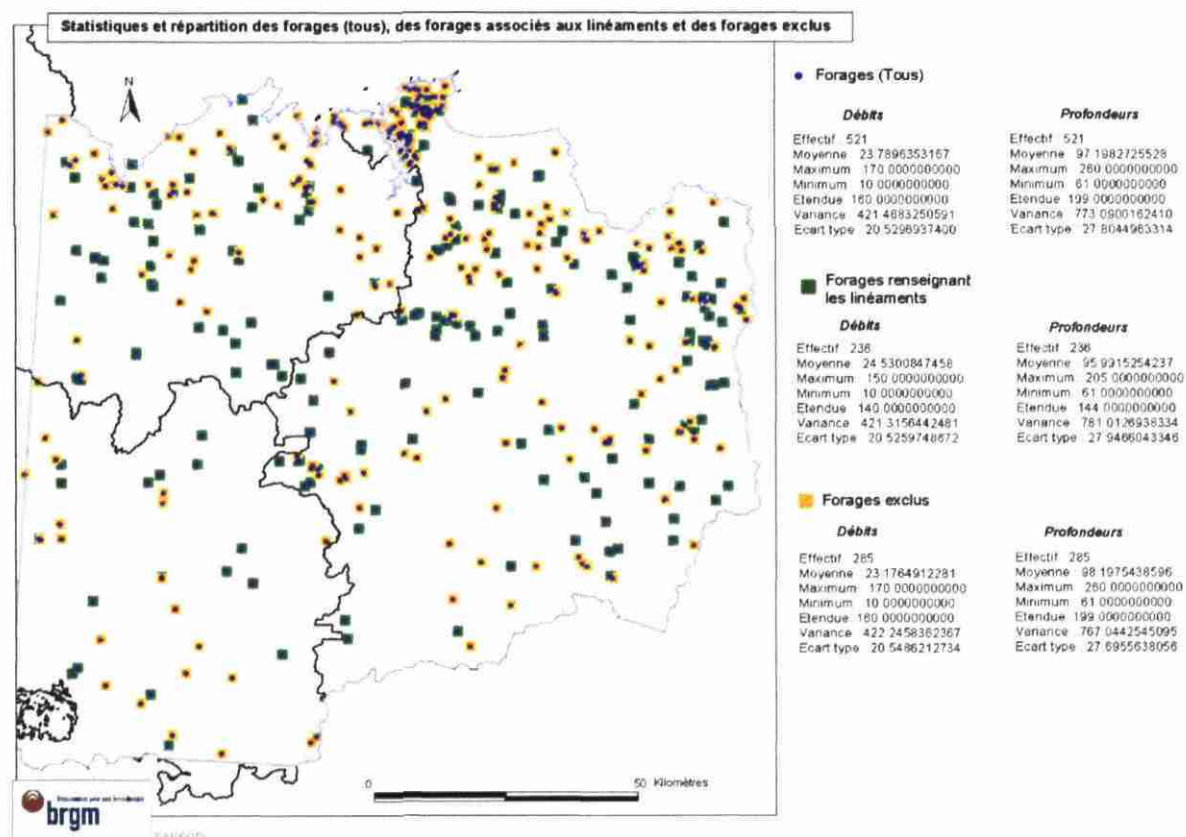


Figure 10 : Répartition et statistiques : forages et linéaments

Orientations des discontinuités magnétiques sélectionnées :

La demi rosace d'orientation (Fig. 10) des linéaments sélectionnés est très similaire à celle de l'ensemble des linéaments. Cependant, la famille N20° à N50° est moins représentée ici. De même, les directions proches de N°90 sont très peu nombreuses.

Si l'on détaille la carte, on observe que les forages fort débits (>30 m3/h) sont assez systématiquement associés à des linéaments d'orientation N130°-N160° qui semble donc être la famille la plus intéressante. Cependant, localement, les très forts débits peuvent être observés sur la famille N20° - N50°. Il y a au sein de chaque famille quelques petites variations : ainsi, par exemple, dans la famille N130° - N160°, les directions N130° - N140° semblent moins liées à des forages très productifs alors qu'en revanche, les directions N140° - N150° apparaissent significativement meilleures.

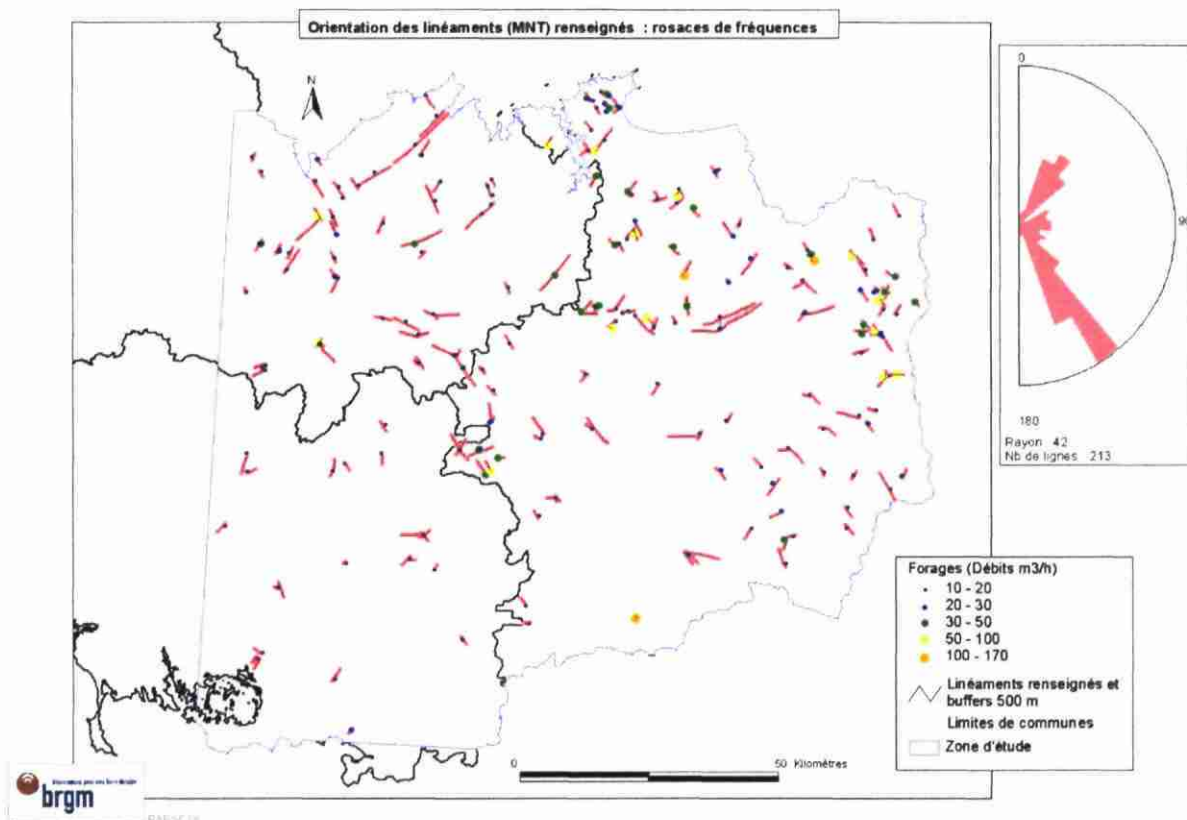


Figure 11 : Demi rosace de fréquence des linéaments associées aux forages et répartition des débits

Choix des directions favorables : une opération identique à celle menée pour les discontinuités magnétiques est réalisée pour les linéaments. Les directions les plus favorables ont été reconnues pour les linéaments auxquels sont associés des forages productifs ; une sélection sur l'ensemble de la population de linéaments sur réalisée (Fig. 11). Les deux grandes familles de linéaments (N20° – N50° et N130° - 160°) sont conservées. Le code est similaire à celui utilisé pour les discontinuités magnétiques.

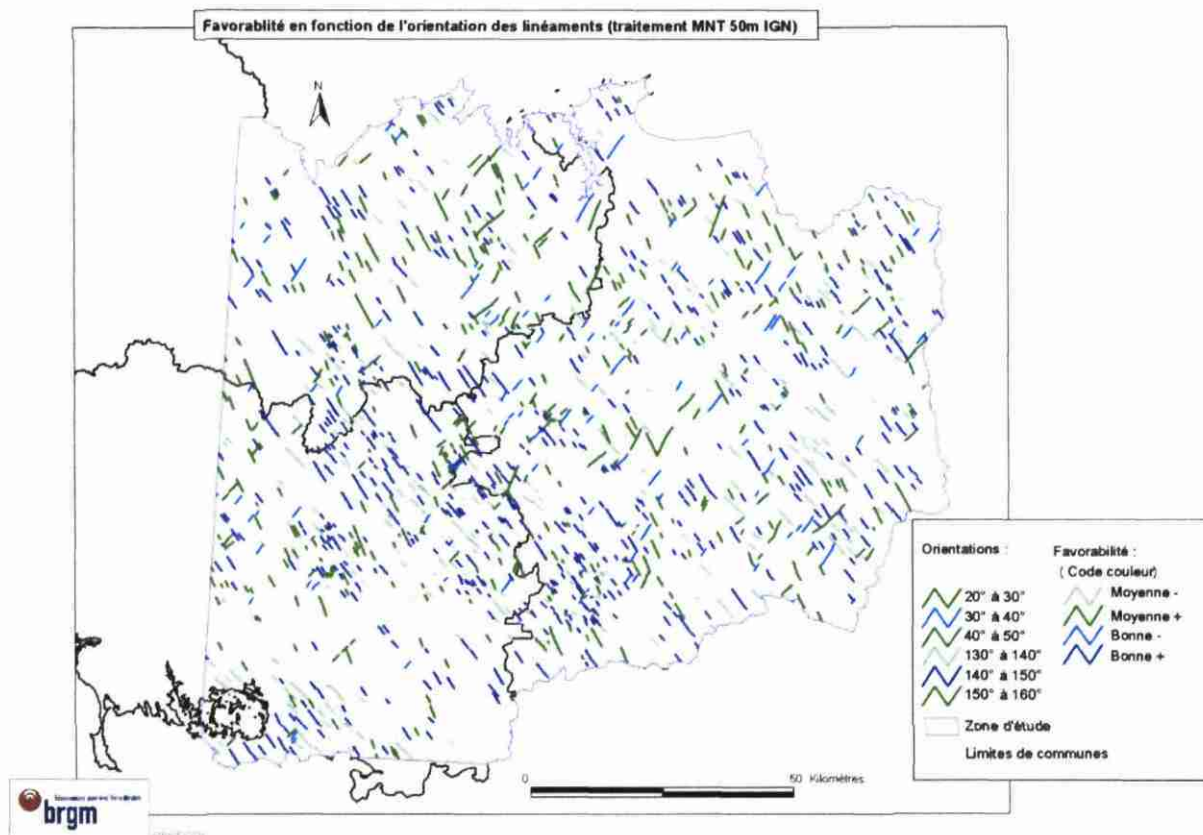


Figure 12 : Linéaments favorables

Synthèse des deux méthodes

Les orientations favorables ont été déterminées pour les discontinuités magnétiques d'une part (cf. chapitre 3.3.1) et pour les linéaments construits à partir du modèle numérique de terrain (cf. chapitre 3.3.2). Les deux cartes (Fig. 7 et Fig. 11) ont ensuite été superposées sur un même document (Fig. 12), chaque ligne (magnétisme ou linéament) étant représenté par sa zone tampon. La carte obtenue est assez singulière : comme cela pouvait être prévisible à la suite des études individuelles, il ne ressort pas vraiment de tendance commune entre les gradients magnétiques et les gradients topographiques. L'explication de ce phénomène n'est pas très évidente ; on a vu plus haut que le magnétisme signalait des failles pouvant être très profondes et anciennes (liées aux orogènes cadomien (-600 Ma) et hercynien (-300 Ma)) alors que le modèle numérique de terrain signalait plutôt (mais non nécessairement) des failles plus superficielles, plus jeunes, ayant joué tout au long de l'histoire depuis 300 Ma et étant toujours actives actuellement. Il y a donc manifestement une différence de comportement entre les deux systèmes que l'on ne sait, pour l'heure, clairement expliquer.

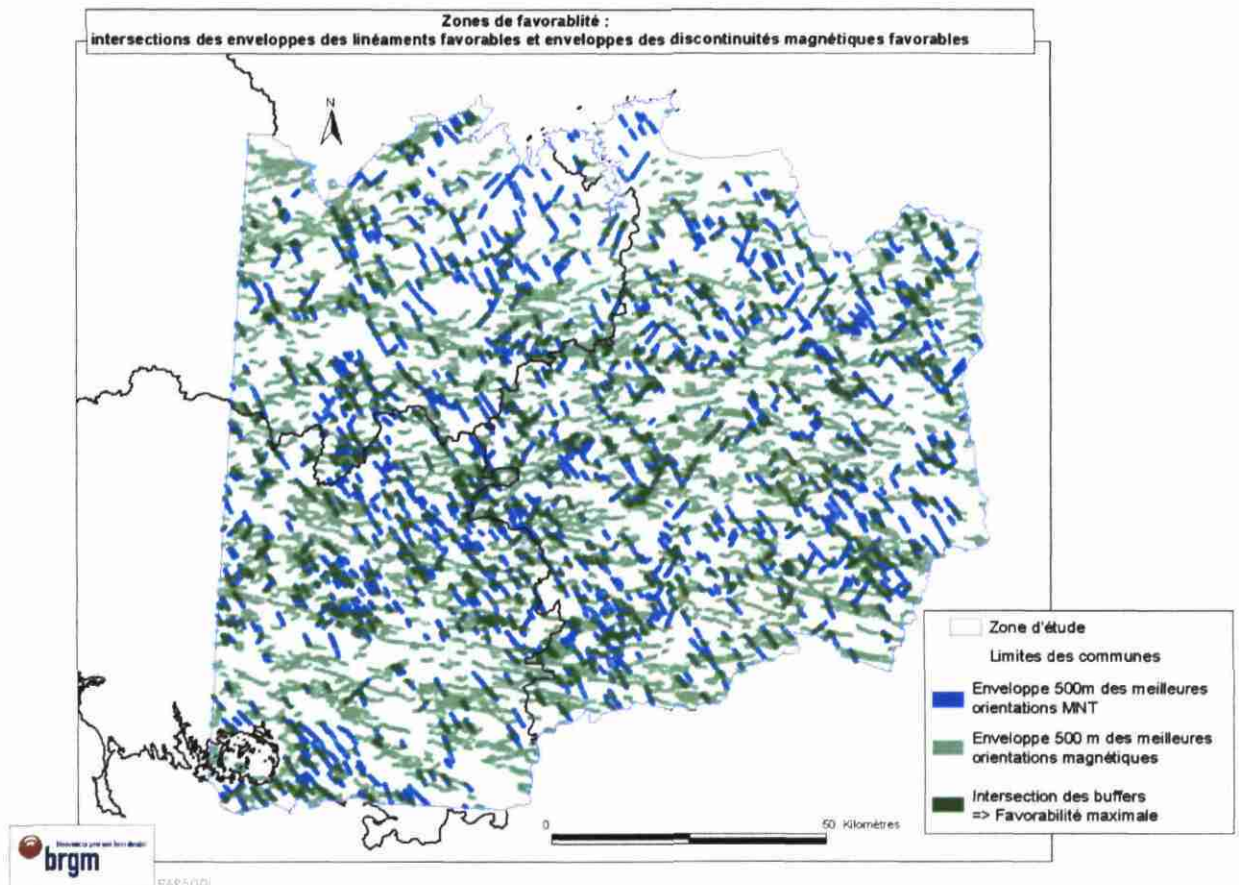


Figure 13 : Ensemble des zones tampons des discontinuités favorables (magnétisme et MNT)

Détermination des domaines de favorabilité maximale : les zones tampons des deux ensembles favorables (discontinuités magnétiques favorables et linéaments favorables) s'intersectent en certains points (Fig. 13) : se sont les zones dites de « favorabilité maximale » : c'est au sein de ces domaines qu'il conviendra de définir les sites pour l'implantation des forages pour la recherche d'eau à grande profondeur. Encore une fois, il s'agit de probabilités : il faut évidemment coupler ce premier résultat avec les résultats d'autres méthodes (étude des photographies aériennes, cf. ci-dessous) et une campagne de reconnaissance sur le terrain.

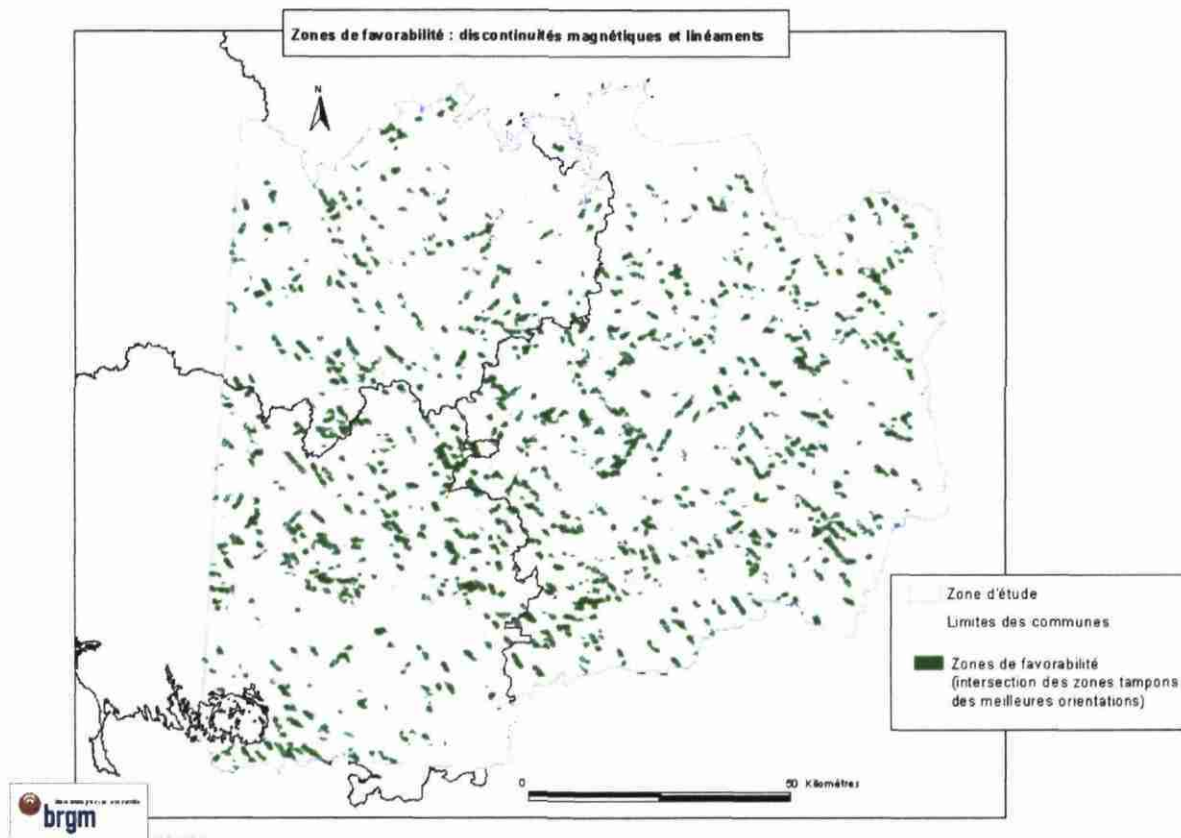


Figure 14 : Intersections des zones favorables : maximum de favorabilité

3.4. VALORISATION DE L'ETUDE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

La photographie aérienne est à la base de toutes les cartes détaillées modernes. Il s'agit de couvrir de vastes zones de territoire avec des photographies prises d'avion avec un axe vertical. Elle est utilisée dans le domaine des Systemes d'information géographique (S.I.G.), on parle alors d'ortho photographie.

Les avions sont spécifiques à ce genre de mission, avec une trappe pour les chambres photographiques. Un pilotage précis est nécessaire pour garder une altitude constante et une route rectiligne. En France, l'Institut Géographique National est spécialisé dans ce travail

L'observation des photolinéaments se fait grâce à la technique de la stéréoscopie.

Elle correspond à un ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes. Elle se base sur le fait que la perception humaine du relief se forme dans le cerveau lorsqu'il reconstitue une seule

image à partir de la perception des deux images planes et différentes provenant de chaque œil.

L'observation en relief est naturelle, c'est l'image "plate" qui demande un effort d'interprétation car elle n'est qu'une projection perspective de l'espace dans un plan.

L'image en relief restitue chaque plan à sa place dans l'espace, les dimensions et la forme de chaque objet sous réserve qu'il n'y ait pas d'effet de maquette ni de distorsion en profondeur.

3.4.1.Objectif

La finalité de l'examen des photographies aériennes est de représenter, grâce au recul fourni par l'altitude des prises de vues et en utilisant la vision stéréoscopique (restituant le relief) des discontinuités de paysage, morphologie, alignement de structures ... susceptibles de correspondre à l'expression en surface des zones fracturées en profondeur. Ces discontinuités sont généralement linéaire, d'où le terme « photolinéaments ».

Malgré l'expérience de l'observateur, certains linéaments identifiés sont dus à des alignements de structures (talus, anciens chemins...). Par ailleurs, la présence d'un linéament ne garantit pas systématiquement une productivité des forages car les failles peuvent être en compression ou la zone fracturée est très altérée et argileuse, il faut alors soit traverser cette altération, soit se décaler par rapport à l'accident pour recouper des fractures ouvertes et propres.

3.4.2.Photographies utilisées

Les photographies utilisées datent pour la plupart de 1952 ou de 1963, elles sont en noir et blanc. L'avantage de ces photographies anciennes est un bâti et des infrastructures routières beaucoup moins denses, ce qui permet une meilleure observation du sol et une localisation des failles plus précise.

L'observation des photolinéaments se fait grâce à la technique de la stéréoscopie.

Elle correspond à un ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes. Elle se base sur le fait que la perception humaine du relief se forme dans le cerveau lorsqu'il reconstitue une seule image à partir de la perception des deux images planes et différentes provenant de chaque œil.

L'observation en relief est naturelle, c'est l'image "plate" qui demande un effort d'interprétation car elle n'est qu'une projection perspective de l'espace dans un plan.

L'image en relief restitue chaque plan à sa place dans l'espace, les dimensions et la forme de chaque objet sous réserve qu'il n'y ait pas d'effet de maquette ni de distorsion en profondeur.

Il n'existe pas une cartographie de l'ensemble des linéaments du Massif Armoricaïn, il n'est donc pas possible d'analyser leur distribution à l'échelle de la zone étudiée.

Tous les forages « fracturés » ont donc été pointés sur les photographies et les failles localisées à proximité identifiées et repérées par rapport au nord géographique.

Les forages qui ont été pris en compte se trouvent dans une bande de 400 mètres de chaque côté de la faille. Un forage localisé au croisement de deux linéaments est comptabilisé deux fois, une fois pour chaque orientation de linéament. Les moyennes des débits et profondeurs ont été calculées pour chaque faisceau de 10 ° de large en faisant évoluer l'orientation de 10 ° en 10 °

| Orientation du Linéament | Effectif forages | Qmoy | Pmoy |
|--------------------------|------------------|-------|--------|
| 1 10 | 26 | 24,54 | 98,04 |
| 11 20 | 39 | 29,81 | 102,69 |
| 21 30 | 40 | 19,19 | 93,43 |
| 31 40 | 19 | 29,65 | 117,21 |
| 41 50 | 16 | 26,88 | 108,88 |
| 51 60 | 35 | 32,39 | 101,89 |
| 61 70 | 43 | 29,62 | 94,05 |
| 71 80 | 34 | 27,19 | 92,85 |
| 81 90 | 21 | 21,10 | 103,52 |
| 91 100 | 20 | 19,05 | 96,25 |
| 101 110 | 17 | 15,02 | 98,18 |
| 111 120 | 30 | 21,01 | 95,47 |
| 121 130 | 31 | 21,38 | 104,39 |
| 131 140 | 29 | 24,99 | 96,03 |
| 141 150 | 29 | 28,37 | 92,31 |
| 150 160 | 41 | 28,63 | 100,17 |
| 161 170 | 29 | 22,52 | 92,76 |
| 171 180 | 13 | 22,98 | 85,00 |

Tableau 5 : Evolution des débits- profondeurs en fonction de l'orientation des linéaments

Les orientations des photolinéaments qui apparaissent les plus favorables sont : 11-20°, 31-40°, 141-150° alors que les plus défavorables sont situés entre 91 et 110° ; Ces résultats sont proches de ceux obtenus avec le MNT.

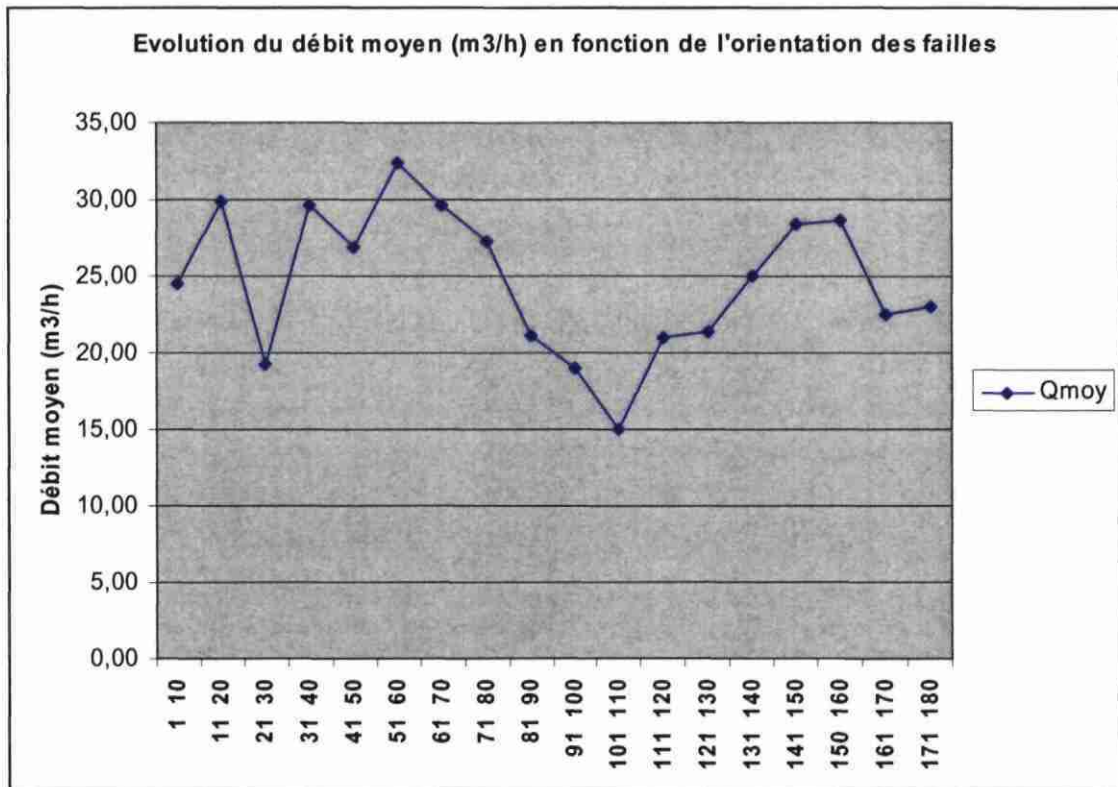


Figure 15 : Evolution du débit moyen des forages en fonction de l'orientation des failles

4.SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Le projet RAPSODI comporte une première étape d'identification de zones favorables à la présence d'eau souterraine en grande profondeur, dans le socle dans le département d'Ille-et-Vilaine et qui est l'objet du présent rapport. La seconde étape consistera en la réalisation de six forages à une profondeur de 300 m, encore jamais atteinte dans ce département, afin de vérifier les résultats de la première étape. Un certain nombre d'ouvrages connus laissent suggérer une forte interdépendance entre fracturation profonde et production d'eau.

Il s'agit ici d'une étude très préliminaire tendant à mettre en évidence l'existence de nouvelles ressources en eau, pérennes en quantité et en qualité.

En l'absence de données fiables sur ces milieux profonds, plusieurs approches statistiques indirectes ont été conduites sur une population constituée d'un échantillon de forages connus, pouvant être considérés comme indicateurs de fracturations

profondes, afin de définir des indices pour la localisation des futurs ouvrages. Pour ce faire nous sommes basés sur :

- Une approche hydrogéologique classique qui a conduit à une hiérarchisation des ensembles géologiques. Les plus favorables sont les Cornéennes puis les Gneiss Nord, les formations sédimentaires primaires ou Briovériennes (alternance de schistes et de grès ou uniquement constituées de grès et quartzites). Viennent ensuite les Granites d'âge cadomien, les Granites hercyniens et les alternances Micaschistes et Gneiss. Les schistes semblent moins intéressants et les Diorites sont en fin de classement.
- Une approche géophysique (magnétisme aéroporté) qui donne des informations sur les anomalies magnétiques du sous sol représentatives des structures géologiques locales pour des profondeurs encore mal déterminées. L'orientation des discontinuités est la signature de la direction des grands cisaillements et accidents tectoniques anciens du socle (orogénèses cadomienne et hercynienne) et de limites entre formations géologiques. Les zones déterminées comme les plus favorables à l'obtention de bons débits dans l'Ille et Vilaine (secteurs nord-est et sud est) se situent à proximité d'anomalies N90-110°, ce sont également les plus représentées. Localement d'autres orientations se distinguent.
- Une approche géomorphologique (modèle numérique de terrain) qui renseigne sur l'altitude du sol et permet de mettre en évidence des structures superficielles plus ou moins rectilignes, témoins potentiels de failles sous jacentes post hercyniennes. Deux populations de direction ressortent clairement : N20-50° et N130-160°, elles correspondent aussi aux directions les plus performantes.
- Une approche géologico-géographique (étude des photographies aériennes) qui permet de confirmer les orientations trouvées par le MNT : N10-40°, N140-160°.

Les procédés « d'imagerie indirecte » du socle breton apportent des informations différentes, le magnétisme aéroporté distingue des structures majoritairement N90-110° qui peuvent donner de forts débits. Celles-ci sont très peu soulignées par le MNT qui fait ressortir des directions N20-50° et N130-160° ; Quant aux photographies aériennes, les résultats sont proches de ceux du MNT.

Ce sont toutes des approches à partir de la surface, avec donc une forte imprécision sur la profondeur des structures mises en évidence.

La difficulté, à ce stade de l'étude, est de choisir l'approche la plus pertinente.

Le MNT et les photographies aériennes soulignent des accidents qui peuvent être profonds mais dont l'influence s'exprime jusqu'à la surface. Il peut sembler moins aléatoire de s'appuyer sur leurs résultats statistiques et de privilégier les orientations N20-50° et N130-160°. Il reste cependant une incertitude quant à l'inclinaison des

accidents tectoniques et par suite, sur le choix de l'emplacement pour l'implantation des forages à leur proximité, afin de recouper les accidents en profondeur.

Le magnétisme aéroporté distingue des structures souterraines de direction majoritairement N90-110° qui s'expriment généralement peu en surface et dont la profondeur et le pendage sont mal appréhendés. Sur certains forages associés à ces structures, de forts débits peuvent être observés, c'est pourquoi ces orientations ne sont pas à écarter.

Il n'est prévu que six forages pour tester toutes ces hypothèses et plusieurs options peuvent être retenues :

- Soit on privilégie une seule méthode (MNT + Linéament ou géophysique) pour réaliser les 6 ouvrages ;
- Soit on croise toutes les approches et on choisit de faire deux forages sur les structures MNT-photographies aériennes, deux sur les structures du magnétisme magnétique et deux sur des secteurs conjuguant les deux critères en tenant compte en même temps du critère géologique;
- Soit on réalise les 6 forages systématiquement sur des secteurs conjuguant les deux critères pour bénéficier des 2 types de structures souterraines en privilégiant ensuite le critère géologique.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Service environnement industriel et procédés
innovants**
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 33
(0)2 38 64 34 34

**Service géologique de Bretagne
Atalante Beaulieu**
2 rue de Jouanet
35700 RENNES

Tél. 02.99.84.26.70.