Document public

Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère)

Rapport final

BRGM/RP-52656-FR
novembre 2003

Conseil Général Finistère
Penn-ar-Bed

Communauté urbaine Brest

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère)

Rapport final

BRGM/RP-52656-FR
novembre 2003

Étude réalisée dans le cadre des opérations de
Service public du BRGM 03EAUC70

B. MOUGIN
E. THOMAS, R. WYNS, R. BLANCHIN et F. MATHIEU

BRGM
12. JAN. 2004
CARTOTHEQUE

Conseil Général Finistère Penn-ar-Bed

Communauté urbaine Brest

Mots clés : roches altérées, milieu fissuré, résonance magnétique nucléaire, cartographie, modélisation, rade de Brest, Finistère

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : B. MOUGIN, E. THOMAS, R. WYNS, R. BLANCHIN et F. MATHIEU (2003) - Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - Rapport final - BRGM/RP-52656-FR - 54 p., 7 tab., 16 fig., 2 ann., 13 pl.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

Synthèse **8**

1. Déroulement du projet **9**

1.1. Contexte et objectif du projet 9

1.2. Rappel des résultats acquis 9

1.3. Conditions de réalisation 9

2. Contexte géologique et géomorphologique **12**

2.1. Géologie du substratum 12

2.2. Géologie de la surface et géomorphologie 14

2.3. Modèle conceptuel des aquifères de socle 15

3. Campagnes de sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) **20**

3.1. Contexte géologique 20

3.2. Méthodes et moyens 22

3.2.1. La résonance magnétique protonique (RMP) 22
3.2.2. Moyens mis en œuvre 31

3.3. Travaux réalisés 32

3.3.1. Acquisition des mesures 32
3.3.2. Volume des travaux 33

3.4. Traitement et analyse des données 35

3.4.1. Qualité des mesures 35
3.4.2. Matrice pour l'inversion 36
3.4.3. Inversions automatiques 37

4. Modélisation géométrique des interfaces 38

4.1. Méthodologie mise en œuvre 38

4.2. Modélisation de la surface piézométrique.....39

4.2.1. Récupération des données piézométriques 39
4.2.2. Modélisation.....40

4.3. Modélisation de la base des altérites et de l'épaisseur des altérites en place.....42

4.4. Modélisation de la base de l'horizon fissuré supérieur et inférieur 43

4.5. Calcul de l'épaisseur des horizons situés en zone saturée.....43

5. Calcul de la réserve en eau souterraine 45

5.1. Synthèse des mesures RMP 45

5.2. Calcul de la carte de la réserve en eau souterraine.....47

5.3. Discussion et commentaires.....48

6. Utilisations des cartes 51

6.1. Utilisation des cartes pour la recherche des eaux souterraines en vue de leur exploitation.....51

6.1.1. Mise en évidence de zones favorables 51
6.1.2. Recommandations 51

6.2. Utilisation des cartes pour la protection des eaux souterraines et des eaux de surface 52

Conclusion 53

Bibliographie 54

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Localisation et contextes géologiques des sondages RMP

Tabl. 2 - Paramètres du modèle

Tabl. 3 - Principales caractéristiques des sondages RMP

Tabl. 4 - Répartition des mesures piézométriques

Tabl. 5 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP

Tabl. 6 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique

Tabl. 7 - Répartition de la réserve en eau souterraine par carte géologique

Liste des figures

Fig. 1 - Localisation du secteur d'étude de la rade de Brest

Fig. 2 - Carte géologique de la zone d'étude

Fig. 3 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

Fig. 4 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité

Fig. 5 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.

Fig. 6 - Principe de mesure RMP

Fig. 7 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental

Fig. 8 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site

Fig. 9 - Schéma, en fonction du temps, d'une séquence émission/réception

Fig. 10 - Résultats d'inversion des données théoriques

Fig. 11 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie

Fig. 12 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP

Fig. 13 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine

Fig. 14 - Principe de modélisation de la surface piézométrique

Fig. 15 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes

Fig. 16 - Précipitations efficaces moyennes annuelles (1946-1976)

Liste des annexes

Ann. 1 - Données et résultats d'interprétation des sondages RMP - Inversion automatique en quarante couches

Ann. 2 - Planches A3

Liste des planches A3

Pl. 1 - Géologie et implantation des sondages RMP

Pl. 2 - Altitude de la surface piézométrique

Pl. 3 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique

Pl. 4 - Altitude de la surface de base des altérites

Pl. 5 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites

Pl. 6 - Epaisseur des altérites en place

Pl. 7 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol

Pl. 8 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération

Pl. 9 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites

Pl. 10 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur

Pl. 11 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur

Pl. 12 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération

Pl. 13 - Répartition de la lame d'eau totale au sein des formations géologiques

Synthèse

Une cartographie quantitative de la réserve en eau souterraine a été réalisée sur le bassin versant de la Rade de Brest (environ 1 600 km² sur trois cartes géologiques et demi : Brest, Le Faou, Huelgoat, et Landerneau Sud).

L'étude a été réalisée dans le cadre du contrat de baie de la rade de Brest, sous maîtrise d'ouvrage du Conseil Général du Finistère et avec la participation financière de la Communauté Urbaine de Brest, du Conseil Général, de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et du BRGM, dans le cadre de ces opérations de Service Public.

Cette étude est basée sur un nouveau concept d'aquifères de socle développé depuis 1997 au BRGM : dans les domaines de socle altéré, l'essentiel des eaux souterraines est contenu dans un aquifère stratiforme multicouches, épais de 50 à 100 m en moyenne, induit par les modifications des propriétés physiques des roches au cours de l'altération supergène.

La géométrie des différents horizons de ce multicouche a été modélisée à partir des données de forages et des observations de surface (affleurements), en utilisant les méthodes de géostatistique (krigeage). La modélisation de la piézométrie a permis de calculer l'épaisseur de chaque couche située en zone saturée.
Une campagne de 29 sondages de Résonance Magnétique Protonique (dont 26 interprétables) a permis de calculer les teneurs en eau moyennes de chaque couche de l'aquifère pour chacune des principales formations géologiques, et de calculer ensuite la lame d'eau contenue dans l'aquifère d'altération (en moyenne égale à 0,298m).

L'aquifère du secteur d'étude, d'une puissance de 25 à 35 m en moyenne, se subdivise en 3 couches superposées, dont les teneurs en eau décroissent généralement du haut vers le bas : les altérites meubles, l'horizon fissuré supérieur, et l'horizon fissuré inférieur. A lui seul, l'ensemble de l'horizon fissuré totalise environ 94 % de la réserve en eau souterraine de la zone d'étude.
La réserve totale d'eau souterraine représenterait environ 393 millions de m^3, soit un peu plus d'une année d'infiltration moyenne (exactement 1 an et 2 mois).

La réserve d'eau souterraine est répartie principalement au Nord du secteur (sur la demi-carte de Landerneau) où elle met davantage de temps à se constituer par rapport au reste de la zone d'étude (1 an et 4 mois).

La répartition des réserves en eau souterraine (teneur en eau et épaisseur d'aquifère) et la perméabilité relative de l'horizon fissuré des formations géologiques font apparaître trois zones d'intérêt pour la recherche d'eau souterraine : le Granite de Kersaint grossier et les Micaschistes du Conquet, au nord de la zone d'étude, et les Schistes et Calcaires de l'Armorique, au centre.

Les cartes réalisées permettent de visualiser la répartition spatiale des volumes d'eau souterraine contenue dans les réservoirs de subsurface (0 à 100 m de profondeur). Elles constituent un type nouveau de données utilisables :

- pour l'exploration des eaux souterraines en vue de leur exploitation par forage,
- par les politiques de protection des eaux souterraines et de surface.

1. Déroulement du projet

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF DU PROJET

La présente étude a été réalisée dans le cadre du contrat de baie de la rade de Brest, sous maîtrise d'ouvrage du Conseil Général du Finistère et avec la participation financière de la Communauté Urbaine de Brest, du Conseil Général, de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et du BRGM, dans le cadre de ces opérations de Service Public.

Le but du projet est d'appréhender l'altération de surface et le milieu fissuré profond (par différentes représentations cartographiques) pour quantifier la porosité des différents réservoirs et d'en déduire les volumes d'eau souterrains stockés.

Le secteur d'étude a été défini en accord avec les partenaires et il porte sur les cartes géologiques au 1/50 000 : Brest à l'Ouest, Le Faou au Centre, Huelgoat à l'Est, et Landerneau (partie Sud) au Nord de la zone ; soit donc sur une superficie terrestre d'environ 1 600 km² (cf. figure 1). Il prend en compte la majeure partie du bassin versant de la rade de Brest.

1.2. RAPPEL DES RESULTATS ACQUIS

Le rapport de fin de phase 1 de ce projet (BRGM/RP-51031-FR) a permis de réaliser :

- une carte géologique synthétique à 1/250 000,
- un relevé des affleurements apportant des informations sur la géométrie des réservoirs aquifères (milieux altérés et fissurés),
- une étude statistique des ressources en eau souterraine, à partir des données de forages d'eau disponibles, pour caractériser l'intérêt hydrogéologique des formations géologiques.

Afin d'aller plus loin dans l'évaluation de cette ressource, la seconde phase a été engagée avec pour objectif de cartographier la réserve en eau souterraine présente dans les formations géologiques de la rade de Brest. Cette cartographie s'appuie sur un nouveau modèle conceptuel des aquifères de socle cristallin obtenu dans le cadre de projets de Recherche du BRGM depuis 1997.

1.3. CONDITIONS DE REALISATION

Afin de réaliser un modèle géométrique des aquifères de socle et de la surface piézométrique, les données de forages ont été collectées et compilées.

Ces données de forage ont fourni l'altitude du contact altérites/milieu fissuré sur environ 450 points, et l'altitude de la surface piézométrique sur 193 points.

Elles ont été complétées par deux études de terrain (septembre 1999 et août 2002) destinées à déterminer l'altitude de la base des altérites sur la zone d'étude ; ces études de terrain ont permis d'ajouter 6060 points de calage supplémentaires du contact altérites/milieu fissuré aux données de forages (cf. chapitre 4.3.).

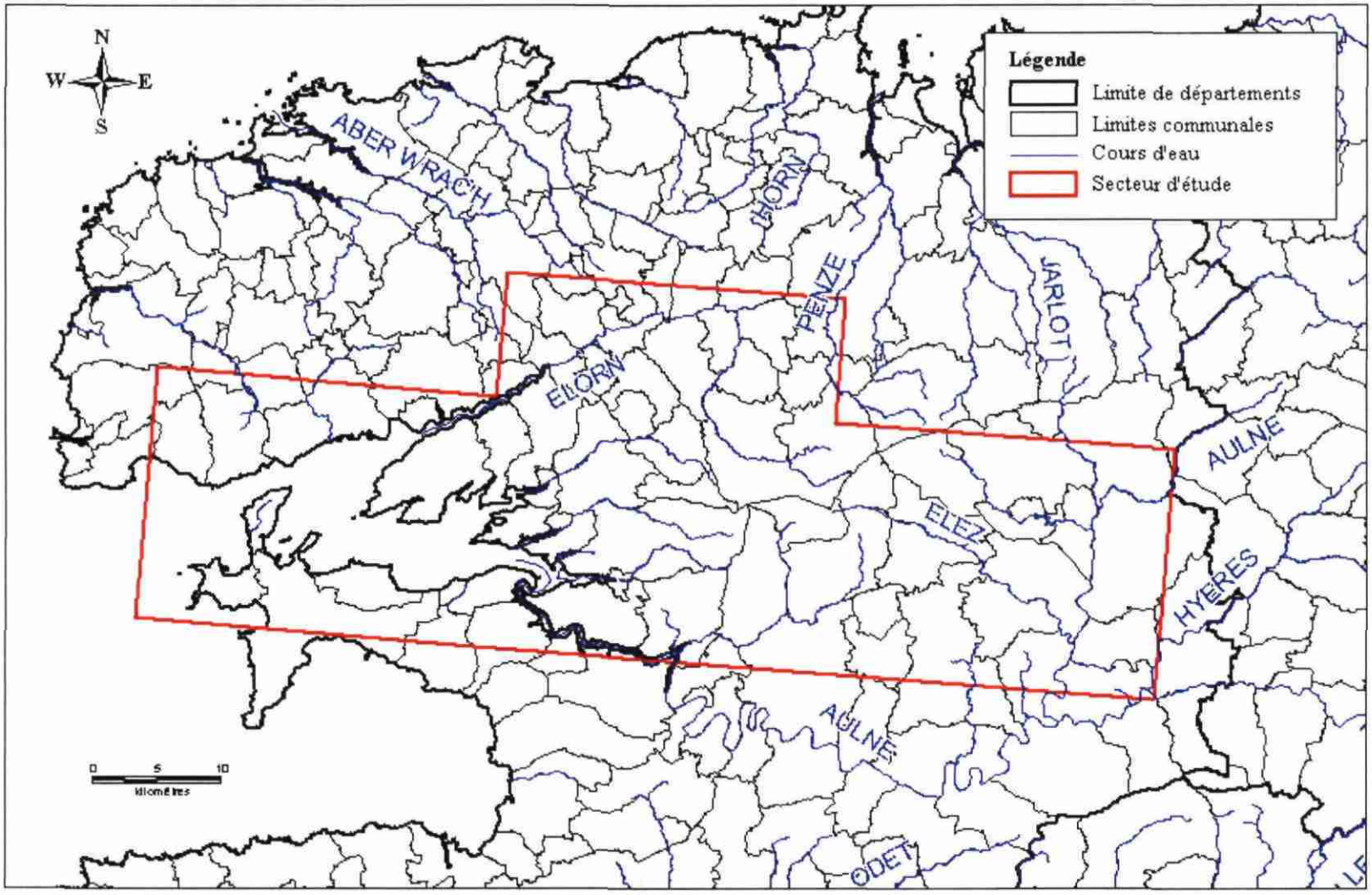


Fig. 1 - Localisation du secteur d'étude de la rade de Brest

29 sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés (21 RMP du 24 janvier au 7 février 2002, puis 8 RMP du 12 au 18 février 2003). 26 sondages ont fourni des résultats utilisables afin de déterminer les profils verticaux de teneurs en eau sur les différents faciès lithologiques représentatifs de la zone d'étude. Les résultats de ces mesures géophysiques sont présentés dans le chapitre 3.

La modélisation spatiale de la géométrie des aquifères, de la piézométrie et de la lame d'eau stockée a été réalisée dans l'environnement ArcView version 3.1 d'ESRI, en utilisant un modèle de grille à la maille de 100 m. Les données géométriques de topographie proviennent du MNT de l'IGN à la maille de 100 m. Le tracé du réseau hydrographique pérenne est issu de la BD Carthage (version 2.4 de juin 2000).

Ce rapport fait l'état d'avancement de la dernière année du projet qui a permis :

- de réaliser des sondages RMP,
- de modélisation la géométrie des réservoirs aquifères,
- de reconstituer la piézométrie du secteur,
- de cartographier les volumes d'eau souterraine,
- de synthétiser l'ensemble des travaux dans ce rapport.

Ces points sont développés ci-dessous.

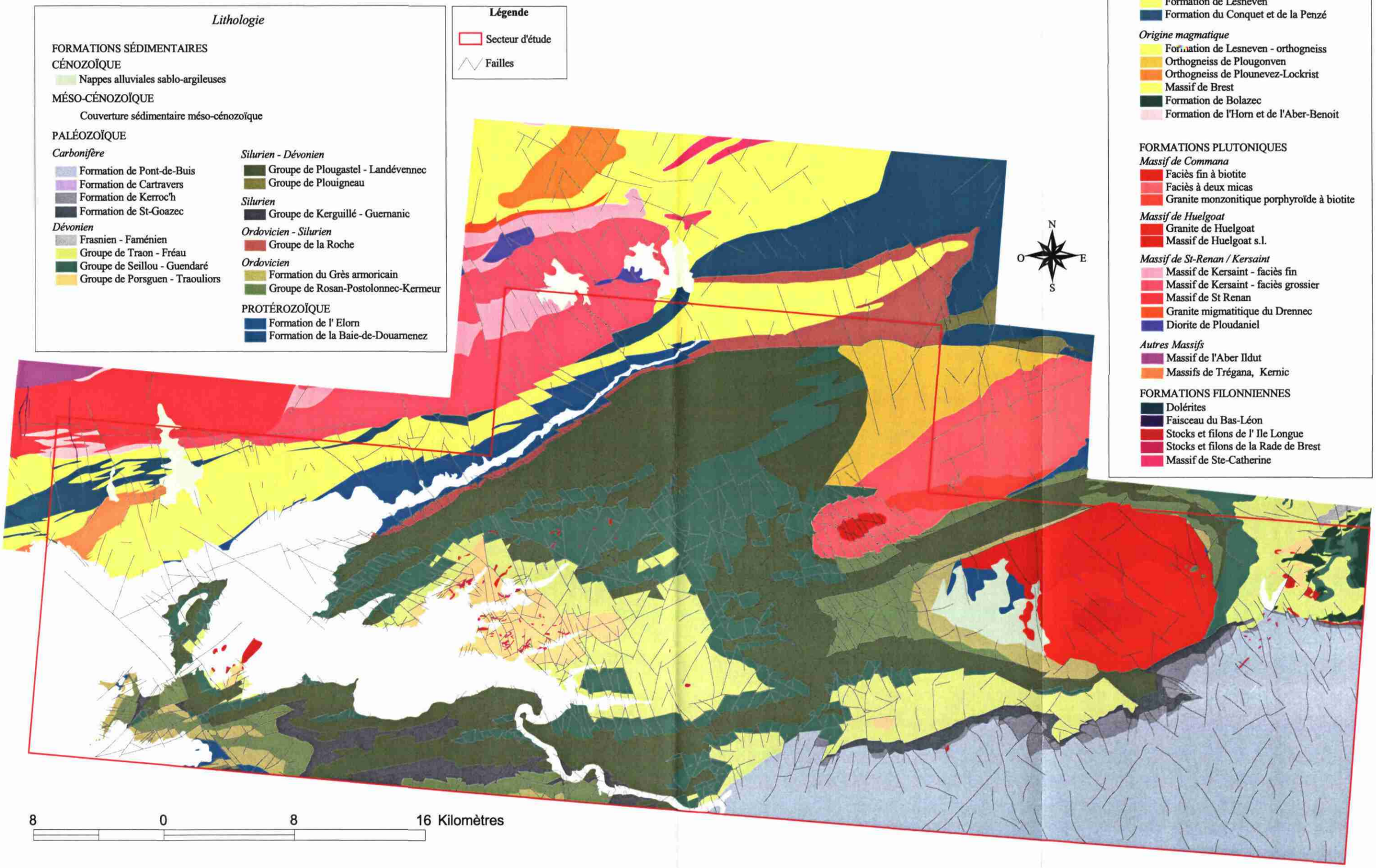
2. Contexte géologique et géomorphologique

2.1. GEOLOGIE DU SUBSTRATUM

Les formations géologiques constituant le substratum sont formées de roches plutoniques et métamorphiques mises en place au cours du Paléozoïque, antérieurement à 300 millions d'années. La carte géologique du substratum de la zone d'étude est présentée sur la figure 2. Cette carte est une compilation des coupures au 1/50 000 existantes (Brest, Le Faou, Huelgoat, Plabennec) et de la carte au 1/80 000 (actualisée) de Landerneau. Par rapport à la carte au 1/250 000 et aux anciennes cartes au 1/80 000, certains noms de formations ont pu évoluer dans cette nouvelle version mais restent cohérents avec les noms présentés dans le rapport de fin de phase 1 (BRGM/RP-51031-FR). Ainsi : le « Groupe de Plougastel - Landévennec » correspond aux « Schistes et Quartzites de Plougastel », le « Groupe de Seillou - Guendaré » à celui des « Schistes et Calcaires de l'Armorique » ; la « Formation du Conquet et de la Penzé » est l'équivalent des « Micaschistes du Conquet » et la « Formation de Pont-de-Buis » est synonyme du « Bassin carbonifère de Châteaulin ».

Le secteur d'étude est caractérisé par deux domaines géologiques bien distincts. Au nord de l'Elorn se localisent la grande majorité des roches plutoniques (granite de St-Renan, granite de Kersaint) et des roches fortement métamorphiques d'origine magmatique (gneiss de Brest pro parte, gneiss orthodérivés de Lesneven et orthogneiss de Plougonven) et d'origine sédimentaire (Micaschistes de la Formation du Conquet et de la Penzée, paragneiss de Lesneven). Au sud, en revanche, les formations plutoniques (Massif de Commana, Massif de Huelgoat) sont très circonscrits au sein d'un vaste ensemble de roches sédimentaires d'âge anté-Carbonifère. Ces roches sédimentaires, très peu métamorphiques, s'agencent en de vastes systèmes de synclinaux et d'anticlinaux où les influences structurales (érosion différentielle due à la résistance particulière de certaines lithologies, tectonique) ont permis la création de lignes de crêtes à relief accentué. Cet ensemble de roches est constitué à la base de quartzites ordoviciennes (Formation du Grès armoricain) qui passent aux alternances de schistes, grès et calcaires rassemblées au sein du Groupe de Rosan-Postolonnec-Kermeur. Le Silurien est caractérisé par des schistes noirs et rares quartzites du Groupe de Kerguillé-Guernanic. Les roches du Dévonien occupent un vaste domaine depuis la Presqu'île de Crozon jusqu'aux abords des Monts-d'Arrée. La série débute par les alternances de schistes, quartzites et grès du Groupe de Plougastel-Landevennec qui constitue l'ossature des zones de hauteurs. Au-dessus, stratigraphiquement, se positionnent le Groupe de Seillou-Guendaré caractérisé par des alternances de bancs d'argilites, de silstones et de bancs de calcaires micritiques bien développés (Formation des Schistes et Calcaires de l'Armorique) puis le Groupe de Traon-Fréau composé d'argilites et de grès qui vient clore la succession dévonienne.

Enfin, la Formation de Pont-de-Buis d'âge carbonifère, composée d'alternances de schistes (argilites noires) et grès surmontant des niveaux volcano-sédimentaires (Formation de Kerroc'h, de St-Goazec) achève la sédimentation paléozoïque. Ces terrains sont en discordance stratigraphique sur les niveaux antérieurs.



(d'après les cartes géologiques à 1/50.000 de Brest, Le Faou, Huelgoat et Plabennec; la carte géologique au 1/80.000 de Landerneau, BRGM)

Fig. 2 - Carte géologique de la zone d'étude

2.2. GEOLOGIE DE LA SURFACE ET GEOMORPHOLOGIE

La région étudiée est morphologiquement complexe et l'élaboration des reliefs témoigne de l'action conjuguée des déformations tectoniques, des érosions différentielles, des phases successives d'aplanissement continental et d'abrasion marine. La topographie accidentée, qui montre des altitudes qui varient de 0 m à plus de 382 m (Roc Trévezel) dans les Monts-d'Arrée, est caractérisée par de vastes domaines de replats limités en général par des zones à forte pente et par des vallées très encaissées (Elorn, Aulne, Douffine...) où les dépôts alluviaux sont très restreints.

Au nord de l'Elorn et de la rade de Brest, le Pays de Léon est formé d'un vaste plateau qui s'incline vers le nord jusque dans la région des Abers. Les altitudes les plus fortes restent néanmoins modérées avec deux points culminants : un point à 140 m immédiatement à l'ouest de St-Renan et un point à 130 m localisé dans les alentours de St-Divy. Ce plateau se prolonge vers l'Est en direction de Landivisiau puis se raccorde sans discontinuités importantes aux plateaux situés au sud de Morlaix. La limite méridionale du plateau du Léon est une zone complexe : très marquées dans la région de Brest (falaises), les différences d'altitudes s'atténuent vers Landivisiau où le plateau semble se raccorder aux replats situés au sud de l'Elorn. Cette architecture pourrait être rattachée aux effets d'une tectonique récente avec des mouvements en ciseau articulés sur le faisceau de failles de l'Elorn dans la région de Landerneau-Landivisiau.

Au sud de l'Elorn, la partie occidentale du vaste synclinorium dévonien montre une organisation en système de replats étagés disséqués dont l'altitude moyenne croit régulièrement jusqu'au piémont nord-occidental de l'Arrée. Ces replats sont des lambeaux de surfaces d'érosion qui se sont constituées postérieurement à l'édification de la chaîne hercynienne (environ 300 Ma), au cours des ères mésozoïque et cénozoïque, par érosion chimique ou mécanique. Elles ont été affectées à plusieurs reprise par des altérations supergènes, notamment au cours du Tertiaire où des profils de plusieurs dizaines de mètres de puissance ont pu se développer aux dépens des roches du substratum. Sur l'ensemble du secteur étudié, ces altérites ont été décapées par l'érosion de telle sorte qu'il ne reste aujourd'hui, au mieux, que la partie inférieure des profils.

La plus haute et vraisemblablement la plus ancienne de ces surfaces se situe sur les siltstones et quartzites ordoviciens des Monts-d'Arrée. L'absence, dans ce secteur, de formations superficielles (altérites, formations méso-cénozoïques) empêche une datation fiable de cette surface résiduelle. Depuis cette surface haute, plusieurs autres niveaux d'aplanissement s'étagent graduellement vers la presqu'île de Crozon et la mer. Plus au sud, de l'autre coté du Menez-Hom (hors secteur d'étude), les replats sont rattachés à la surface du Menez-Hom (correspondant à la haute-surface des Mont-d'Arrée décrite plus haut), à la surface de Ste-Marie du Menez-Hom, à la surface éocène, à la surface de Ste-Anne puis à une surface située altimétriquement aux alentours de 30-40 m. De telles distinctions, en l'absence d'observations plus poussées dans notre secteur d'étude, restent délicates excepté pour la partie léonarde où le vaste plateau doucement incliné vers le nord peut être éventuellement rattaché à la surface d'âge éocène (présence de silicifications du type Grès ladères).

Les levers cartographiques ont montré que la ou les surfaces les plus hautes ne portent pas d'altérites. Au nord et au nord-ouest des Monts-d'Arrée, les lambeaux de surfaces aplanies d'altitude inférieure (Plateau de Dirinon – Tréflénevez – La Martyre, zone de Commana – Sizun) portent encore localement des formations superficielles (argiles sur schistes, sables argileux sur grès, sables sur les Grès de Landevennec). Les contacts souvent francs avec les zones de roches saines traduisent la présence soit d'anciens accidents cassants orientées principalement NE-SW (parallèles au système de l'Elorn) et de failles orientées N140-150 - direction structurale ubiquiste sur le Massif armoricain – ayant été réactivés dans les périodes récentes (post Éocène, Plio-Pléistocène...), soit de variations lithologiques brutales (présence de quartzites résistantes). Le cœur de la presqu'île de Crozon présente une morphologie plane avec des altitudes variant entre 60 et 75 m. Excepté au sud-ouest de Landévennec (présence de grès et quartzites), le secteur est dépourvu de couverture d'altérite. Ceci traduit vraisemblablement un décapage par un ou plusieurs épisodes d'abrasion marine. De la même façon, la bordure littorale (Daoulas, l'Hôpital-Camfrout, Le Faou) présente une morphologie de basse côte où les incursions marines successives ont décapé les formations issues de l'altération des roches.

Les altérites sont en revanche beaucoup plus nombreuses et mieux préservées sur le plateau léonard. L'altération des granites de St-Renan et de Kersaint donnent des formations de sables grossiers plus ou moins cohésifs, celle des Micaschistes donnant des altérites sablo-argileuses.

Au sud et au sud-est des Monts d'Arrée, les altérites des schistes et grès du bassin carbonifère de Châteaulin situées sur les bassins versants de l'Aulne et de la Douffine ont été presque toutes décapées. Seuls ont été préservées des replats en interfluve de faibles étendues situés à des cotes altimétriques fluctuant entre 130 et 150 m.

2.3. MODELE CONCEPTUEL DES AQUIFERES DE SOCLE

Dans les socles anciens comme le Massif armoricain, les roches, généralement métamorphiques ou intrusives, sont massives et imperméables. La présence éventuelle d'eau souterraine dépend des modifications physiques subies par ces massifs rocheux postérieurement à leur formation, et notamment de la fracturation et de l'altération.

La fracturation d'origine tectonique favorise la circulation des eaux lorsque ces fractures sont ouvertes. C'est le cas des couloirs de fracturation souvent subverticaux, dont le degré d'ouverture est lié d'une part à leur mécanisme de formation, et d'autre part à leur orientation par rapport au champ de contraintes actuel.

L'altération météorique a eu pour effet de développer une couverture meuble plus ou moins poreuse en fonction de la minéralogie de la roche mère, et, sous cette couverture meuble, une fissuration intense permettant le drainage des formations meubles sus-jacentes.

Les zones où préexistaient des réseaux de fracture d'origine tectonique permettant la circulation de l'eau ont constitué, par la multiplication des surfaces de contact entre eau et roche, des lieux privilégiés où l'action de l'altération a été décuplée. Cette addition de phénomènes (fracturation tectonique, altération et fissuration) a

particulièrement fragilisé les lieux où elle s'appliquait, conduisant à la formation de couloirs fracturés et fissurés où l'altération a pénétré plus profondément. Ces couloirs constituent des drains privilégiés pour l'eau souterraine, alimentés par les horizons altérés et fissurés plus superficiels. Comme ils constituent des zones de faiblesse, ils ont été fréquemment empruntés par l'érosion lors du creusement des vallées, et se présentent dans le paysage actuel sous la forme de dépressions allongées gouvernant souvent les écoulements visibles en surface (thalwegs, vallées).

Dans cette étude, seules l'altération et la fissuration qui en découle ont été prises en compte : elles concernent globalement des surfaces et des volumes incomparablement plus importants que les couloirs fracturés qui sont, eux, des systèmes locaux, dont chacun peut être un cas particulier et dont l'étude relève de méthodes différentes.

Les manteaux d'altération épais (plusieurs dizaines de mètres) ont été élaborés lors de longues périodes d'émersion sous des climats chauds et humides analogues aux climats de la zone intertropicale actuelle. Les périodes les plus favorables ont été le Crétacé inférieur ainsi que le début du Tertiaire (Paléocène à Eocène supérieur), d'une durée de 20 à 35 millions d'années chacune. La période récente (Miocène à Quaternaire) n'a donné que des altérations d'épaisseur négligeable par rapport aux altérations antérieures : en référence aux données acquises en Anjou et dans la région nantaise, on peut estimer que celles-ci ne dépassent pas quelques décimètres à quelques mètres, car la surface d'érosion qui supporte les dépôts marins miocènes et pliocènes de ces régions n'est pas altérée.

L'élaboration des manteaux d'altération suppose lors de leur formation un paysage aplani et en relief, de façon à ce que l'érosion soit incapable d'évacuer les altérites au fur et à mesure de leur formation (pente faible), et que le front d'altération puisse progresser rapidement vers le bas (écart altimétrique entre sol et niveau de base). A l'échelle régionale, pour une lithologie homogène donnée, la base des altérites est globalement parallèle à l'ancienne surface topographique. Dans le détail cependant (échelle hectométrique), cette surface de base peut s'approfondir de manière considérable le long de certains couloirs de fracturation tectonique jouant le rôle de drains préférentiels (augmentation locale de la vitesse d'altération), ou bien se réduire fortement en fonction des hétérogénéités lithologiques.

Un nouveau modèle conceptuel des propriétés physiques des roches en contexte de socle altéré a été élaboré ces dernières années, dans le cadre de projets de Recherche du BRGM. Il est représenté de manière schématique sur la figure 3.

Un profil d'altération type comprend ainsi, de haut en bas, sous les sédiments continentaux pénécontemporains de l'altération, les horizons suivants :

- cuirasse latéritique (0 à quelques m) : rarement préservée, par suite de la troncature du profil par l'érosion ou de sa destruction par évolution vers un latosol (non représentée sur la figure 3) ;

- allotérites (quelques mètres à une dizaine de mètres) : altérite caractérisée par une réduction de volume par rapport à la roche mère initiale ; la texture de la roche mère n'est pas préservée. En contexte schisteux il s'agit d'une argile imperméable ; en contexte granitique, il s'agit d'une arène argileuse à faible perméabilité et faible porosité efficace.

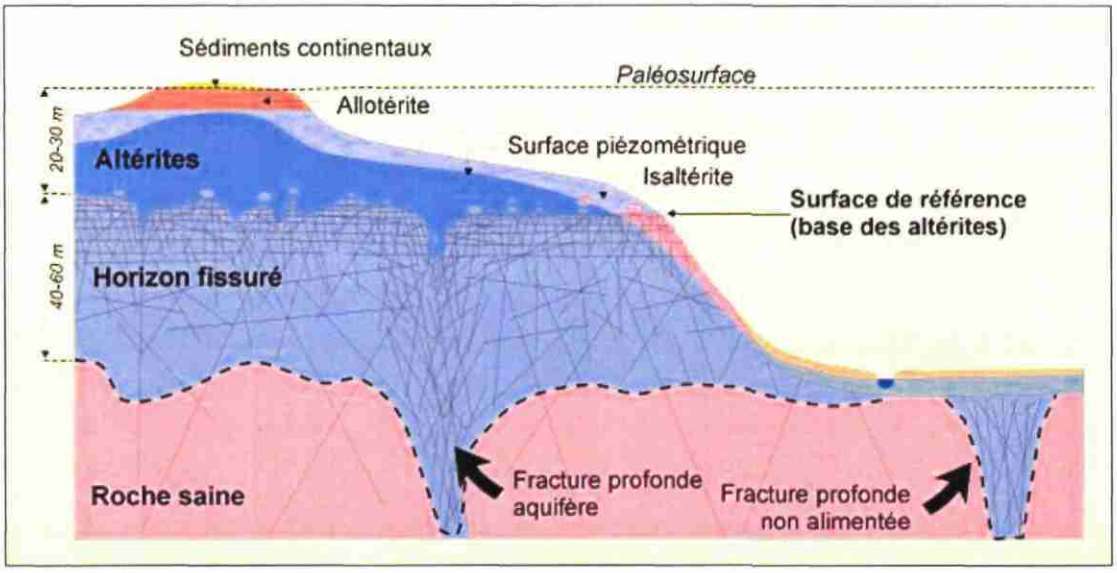


Fig. 3 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

- isaltérites (plusieurs dizaines de mètres) : altérite isovolumique où la texture de la roche initiale est préservée. Les éléments chimiques évacués par dissolution sont remplacés par des vides. Il en résulte une porosité importante, permettant à cet horizon de jouer un rôle capacitif vis à vis des eaux d'infiltration. En contexte schisteux, cet horizon, à dominante silto-argileuse, est faiblement perméable bien que très poreux. En contexte granitique, il correspond à une arène sableuse beaucoup plus perméable. A la base des isaltérites se rencontrent fréquemment des boules granitiques résiduelles, de diamètre souvent plurimétrique. Lorsqu'elles sont en place, elles sont en général isolées dans leur matrice d'arène. Lorsque les arènes ont été évacuées par l'érosion, les boules deviennent affleurantes et peuvent être plus ou moins remaniées sur les versants par gravité.

- zone fissurée (40 à 70 m) : cet horizon, situé dans la partie supérieure du substratum, est caractérisé par une très forte fissuration (figure 4) dont l'intensité décroît vers le bas. Cette fissuration résulte de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes générées par les changements de phase minéralogique, principalement l'hydratation de la biotite, qui se transforme avec augmentation de volume en chlorite, puis vermiculite, avant d'évoluer vers des minéraux argileux. Dans les 15 premiers mètres, la distance moyenne entre fissures est décimétrique et celles-ci sont ouvertes. L'espacement entre fissures (et donc leur probabilité d'interconnexion) diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le profil.

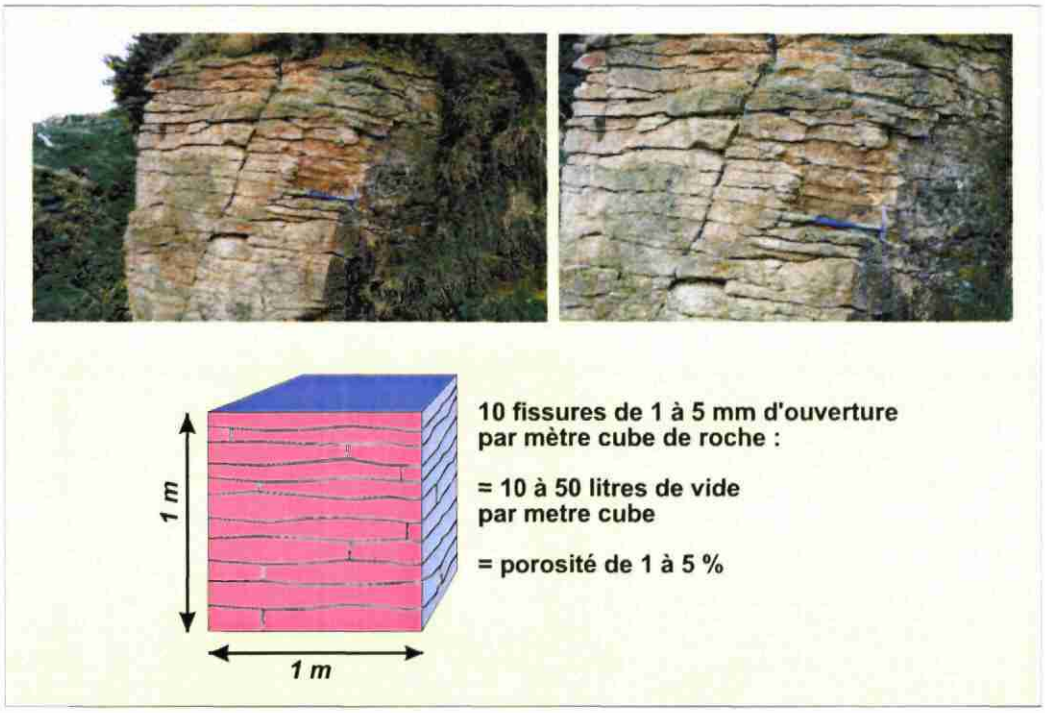


Fig. 4 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité

La partie supérieure de cet horizon fissuré (en moyenne les 15 premiers mètres) constitue un aquifère à perméabilité significative, alimenté par les isaltérites sus-jacentes lorsqu'elles sont conservées. Dans le Massif armoricain, la majorité des puits fermiers sont alimentés par cet aquifère ; une partie des sources de versant se situe également dans cet horizon.

Lorsque la roche-mère est isotrope (cas des granites), cet horizon est caractérisé par une fissuration horizontale caractéristique (figure 4). Cette orientation préférentielle résulte des caractéristiques du déviateur de contraintes généré par l'altération : la dilatation étant impossible dans le sens horizontal, les 2 composantes principales du tenseur ($\sigma 1$ et $\sigma 2$) sont horizontales, tandis que la composante minimale ($\sigma 3$) est verticale ; dans un tel système de contraintes on ouvre principalement des fentes horizontales. Le même phénomène s'applique à la base des arènes, qui présentent un feuilletage horizontal caractéristique : ce feuilletage traduit un resserrement centimétrique à millimétrique entre joints ; cet espacement étant du même ordre de grandeur que celui du grain de la roche, tous les grains sont atteints par l'altération : il s'agit du début de l'arénisation.

Dans la partie inférieure de l'horizon fissuré, la densité de fissures diminue progressivement, de même que la porosité et la perméabilité.

Ce modèle de répartition verticale des porosités et des perméabilités en contexte de socle altéré a été validé dans de nombreuses régions de socle, non seulement en France (Bretagne, Massif central, Vosges) mais dans le Monde (Afrique, Guyane, Inde, Corée du sud).

Ainsi, dans le Finistère nord, une étude précédente (Wyns et al., 2002) a montré que 80% de la réserve en eau souterraine était contenue dans l'horizon fissuré. En Corée, Les données de forage montrent que l'essentiel de la productivité des forages est fourni par l'horizon fissuré (50 à 100 premiers mètres sous la base des altérites) (figure 5).

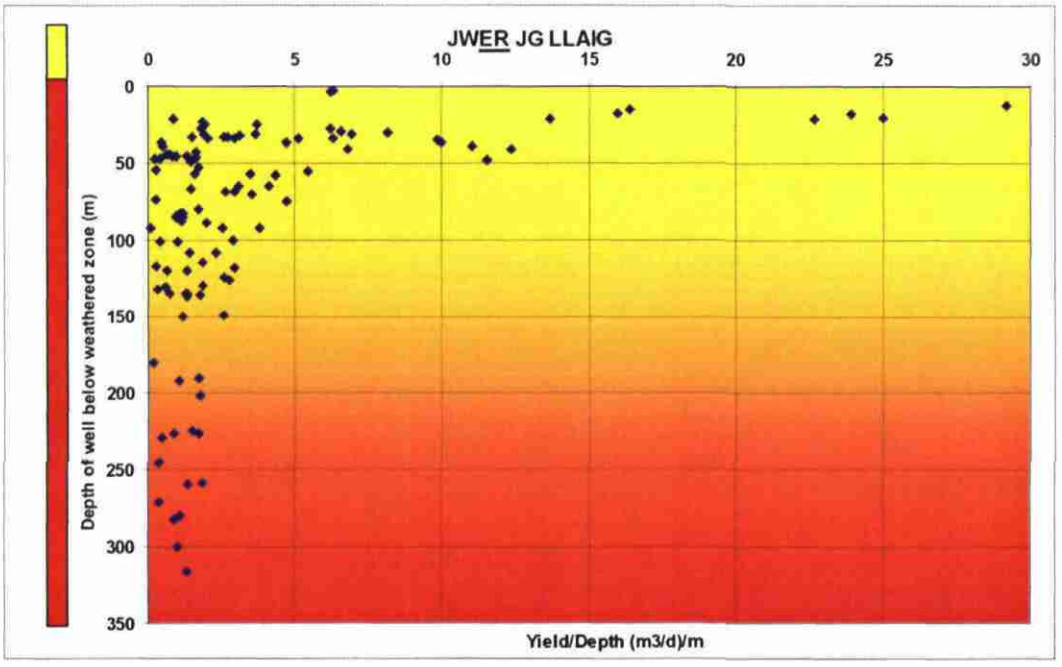


Fig. 5 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.

Ainsi, à la différence du concept classique d'aquifères discontinus de socle contrôlés par des fractures verticales d'origine tectonique, on peut maintenant utiliser un concept d'aquifère continu multicouches contrôlé par l'altération supergène. (Lachassagne et al., 2001) :

- les altérites meubles, à porosité importante et faible perméabilité, ont un rôle d'emmagasinement de l'eau de pluie ;
- l'horizon fissuré, à porosité plus faible mais cependant significative (1 à 5 %) et à perméabilité plus importante (10^{-4} à 10^{-6} m/s) joue un rôle capacitif et transmissif, en collectant et distribuant les eaux issues de l'horizon d'altération sus-jacent.

Ces horizons d'altération sont parallèles, à l'échelle régionale, à la paléosurface contemporaine de l'altération.

3. Campagnes de sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP)

A la demande du Service Géologique Régional Bretagne et dans le cadre du projet « Comportement hydrodynamique des roches altérées à la surface du bassin versant de la rade de Brest », une reconnaissance géophysique par sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) a été effectuée par l'unité ARN/MRS du BRGM, sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère).

L'objectif de ces sondages est de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la frange d'altération surmontant le socle dans différents environnements géologiques.

29 sondages RMP ont été effectués sur l'ensemble de la zone d'étude (cf. planche 1 en annexe 2) lors de 2 campagnes de mesures sur le terrain (21 sondages en janvier 2002, puis 8 en février 2003). Les coordonnées de ces sondages sont données en Lambert II étendu dans le tableau 1.

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le nombre de formations géologiques constituant le substratum du bassin versant de la rade de Brest est relativement important.
Les 12 formations géologiques les plus représentées, du point de vue de leur superficie, ont fait l'objet d'une reconnaissance par RMP ; l'objectif étant d'obtenir au moins 2 sondages RMP sur chaque unité géologique.
Néanmoins, quelques formations géologiques n'ont pas pu être renseignées par des sondages RMP (cf. contours en blanc de la planche 1). En raison de cette absence de renseignement, ces formations ne seront pas valorisées sur les cartes suivantes.

Le contexte géologique présent au niveau de chaque sondage RMP est indiqué dans le tableau 1.

Sondage RMP	X (m)	Y (m)	Z (m)	Contexte géologique
RD01	116823	2409662	93	Granite de Kersaint grossier
RD02	133180	2411016	122	Micaschistes du Conquet
RD03	106009	2401476	85	Gneiss de Brest
RD04	108576	2400527	22	Schistes briovériens de l'Elorn
RD05	120429	2404264	173	Schistes et Quartzites de Plougastel
RD06	102520	2384024	72	Schistes et Quartzites de Plougastel
RD07	124546	2393246	203	Schistes et Quartzites de Plougastel
RD08	134906	2396827	247	Schistes et Quartzites de Plougastel
RD09	115914	2397080	75	Schistes et Calcaires de l'Armorique
RD10	127844	2402071	180	Schistes et Quartzites de Plougastel
RD11	114487	2387672	80	Schistes et Calcaires de l'Armorique
RD12	113928	2388833	42	Groupe de Traon
RD13	143943	2386124	137	Groupe de Traon
RD14	132843	2404642	42	Orthogneiss de Plougonven
RD15	128349	2397099	142	Granite de Commana
RD16	144734	2394365	253	Granite de Huelgoat
RD17	132207	2379471	155	Bassin carbonifère de Chateaulin
RD18	146634	2379881	176	Bassin carbonifère de Chateaulin
RD19	156478	2380168	152	Bassin carbonifère de Chateaulin
RD20	134725	2394270	329	Grès Armoricain
RD21	141362	2398010	362	Schistes et Quartzites de Plougastel
RD22	128921	2413204	123	Micaschistes du Conquet
RD23	118054	2407007	83	Schistes briovériens de l'Elorn
RD24	133689	2392210	317	Grès armoricain
RD25	128089	2398507	122	Schistes et Calcaires de l'Armorique
RD26	136317	2404600	156	Orthogneiss de Plougonven
RD27	139136	2405210	215	Granite de Commana
RD28	144786	2396802	268	Granite de Huelgoat
RD29	135105	2396883	252	Schistes et Quartzites de Plougastel

Tabl. 1 - Localisation et contextes géologiques des sondages RMP (coordonnées en Lambert II étendu)

3.2. METHODES ET MOYENS

3.2.1. La résonance magnétique protonique (RMP)

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structures ou de paramètres physiques qui sont liés à différents facteurs qui ne sont pas eux-mêmes nécessairement liés de façon unique à la présence ou à l'absence d'eau dans le milieu étudié. Ainsi, par exemple, la conductivité électrique (inverse de la résistivité) des roches est proportionnelle à la conductivité électrique du fluide contenu et à une certaine puissance de la porosité, mais elle dépend également largement de la composition minéralogique et en particulier de la teneur en argile.

Contrairement à ces méthodes géophysiques, l'information déduite d'un sondage de résonance magnétique protonique (RMP) est directement liée à l'eau contenue dans le sous-sol.

Dans le cadre d'un accord de collaboration entre ICKC (Russie) et le BRGM, un équipement, nommé « NUMIS », fondé sur ce principe a été développé par IRIS Instruments et commercialisé début 1997.

Principe de la méthode

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique H_0 (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_0 (cf. figure 6).

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre naturel et provoque une précession de ces moments autour de la direction du champ magnétique naturel. Après coupure du champ excitateur, et en retour à l'état d'équilibre initial, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons et mesuré en surface, constituant ainsi la réponse RMP. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante. La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol provenant des molécules d'eau implique ainsi que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

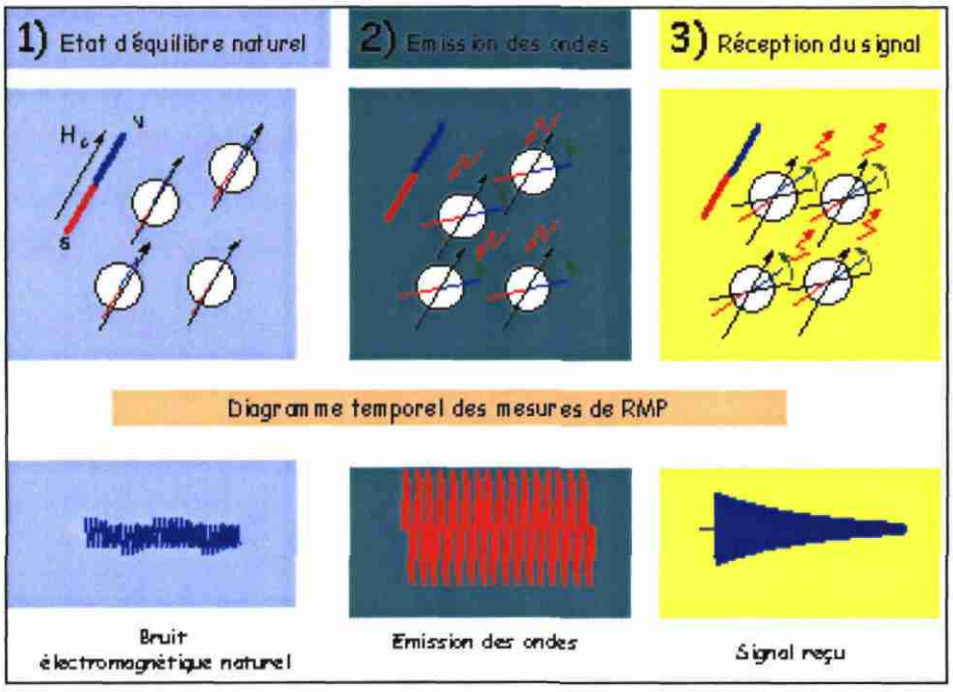


Fig. 6 - Principe de mesure RMP

L'équipement « NUMIS »

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (cf. figure 7).

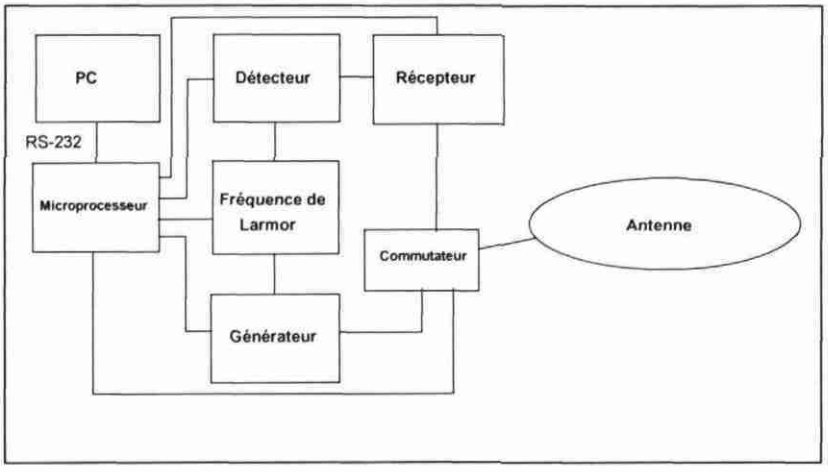


Fig. 7 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 s au maximum. Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 100 kg (cf. figure 8).

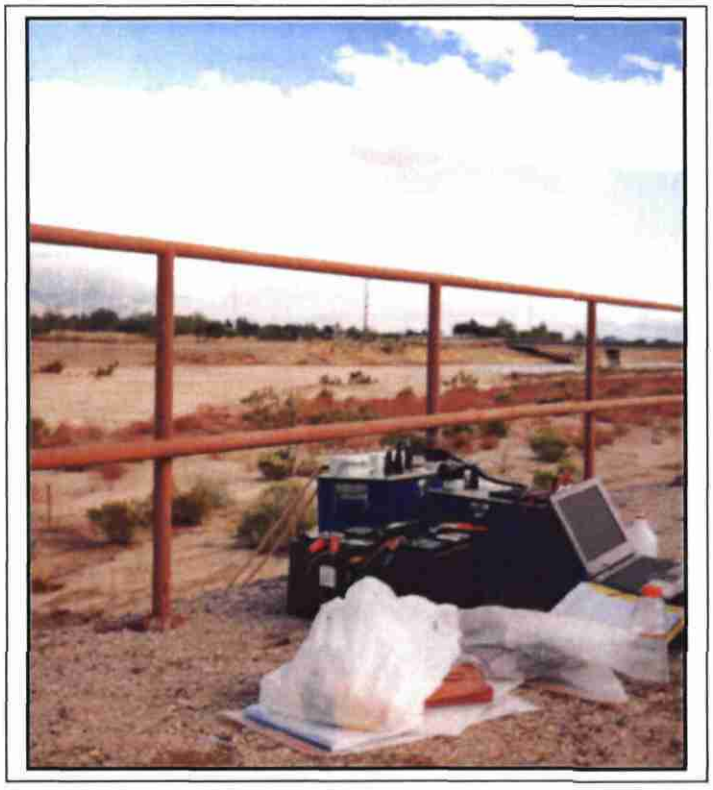


Fig. 8 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site

Le sondage RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne est déployée sur le sol, généralement selon un cercle ayant un diamètre compris entre 20 et 120 m, selon la profondeur des couches aquifères que l'on désire investiguer. Différentes géométries d'antennes sont prévues dans le logiciel d'acquisition de NUMIS, en particulier, l'antenne peut être déployée sous la forme d'un chiffre « huit » afin d'améliorer le rapport signal/bruit (Trushkin et al., 1994). Une impulsion *i(t)* d'un courant alternatif est émise dans la boucle :

$$i(t) = I_0 \cos(\omega_0 \ t), \ \ 0 < t \leq \tau, \qquad (1)$$

Io et τ caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis ω_0 correspond à la fréquence de Larmor, caractéristique des protons placés dans le champ géomagnétique $f_0 = \gamma H_0/2\pi$ avec H_0 l'amplitude du champ géomagnétique et γ le facteur gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique du lieu considéré.

L'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique, qui crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté, après coupure de l'injection de courant, par la même antenne que celle qui est utilisée pour l'émission. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS.

Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé sur la figure 9.

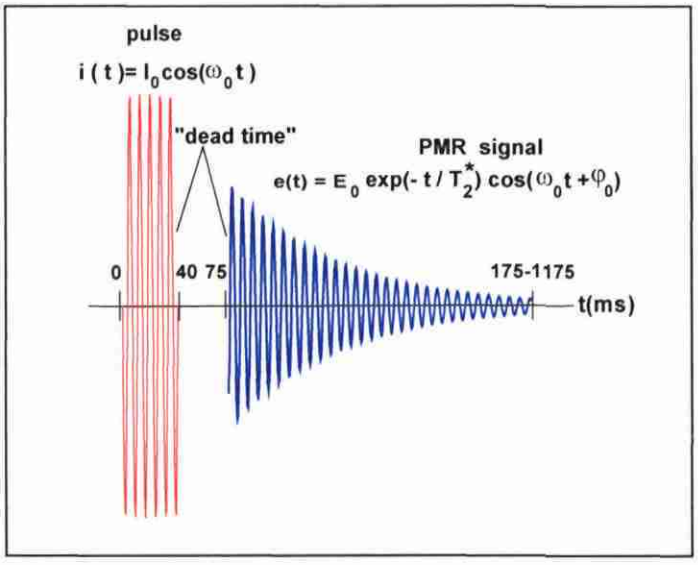


Fig. 9 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception

En oscillant à la fréquence de Larmor, le signal RMP $e(t,q)$ décrit une enveloppe de forme exponentielle décroissante qui dépend du paramètre d'excitation $q = I_0 \tau$

$$e(t,q) = e_0(q)\ \exp(-t / T_2^*)\ \cos(\omega_0\ t + \varphi_0), \qquad (2)$$

avec $e_0(q)$ l'amplitude initiale RMP, T_2^* le temps de relaxation spin-spin, et φ_0 la phase du signal RMP.

En injectant deux pulsations consécutives au lieu d'une seule et mesurant la réponse RMP après chaque pulsation, il est possible de mesurer la constante de relaxation T_1.

$E(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1(q)$ et $\varphi_0(q)$ sont les paramètres mesurés par l'antenne de réception en faisant varier le paramètre d'excitation q ; ce dernier paramètre agissant sur la profondeur d'investigation du sondage. Ces quatre paramètres sont ceux qui sont ensuite interprétés et qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré ; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 4 nV. Différents facteurs peuvent influencer l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko et al., 1998).
Un signal RMP provenant de l'eau contenue dans des argiles a un temps de décroissance ou de relaxation inférieur au délai instrumental et n'est ainsi pas détectable.

Le volume investigué lors d'un sondage est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre. La profondeur d'investigation maximale actuelle, en l'absence de terrains conducteurs, est de l'ordre de 120 m. La profondeur d'investigation est sensiblement diminuée lorsque la conductivité des terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 ohm.m. La durée de réalisation d'un sondage RMP est d'environ deux heures dans des conditions favorables de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

Interprétation des données

Les algorithmes d'inversion des paramètres RMP sont décrits dans la publication Legchenko et al. (1998). Ainsi un signal RMP non-nul est directement lié à la présence d'eau dans le sous-sol. De plus, des informations complémentaires peuvent être obtenues à partir des courbes brutes enregistrées :

- l'inversion des données $E_0(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau. La teneur en eau fournie par RMP peut être définie telle que ci-après. Pour un volume d'investigation V, soit V_W le volume rempli d'eau et V_R le volume de roche ($V = V_W + V_R$). Le volume V_w peut être divisé en deux parties : l'eau soumise à un champ magnétique homogène et appelée eau libre V_{free} et l'eau soumise à un champ magnétique inhomogène, appelée eau liée ; ainsi $V_W = V_{free} + V_{bound}$. Comme les très courts signaux correspondant à l'eau liée ne peuvent pas être mesurés par les équipements RMP disponibles aujourd'hui, la teneur en eau RMP, n est la part du volume investigué occupé par l'eau libre telle que $n = V_{free}/V$. Les deux cas limites sont $n = 0$ pour une roche sèche et $n = 100\,\%$ pour l'eau d'un lac ;
- les constantes de temps de relaxation $T_2^*(q)$ et $T_1(q)$ sont reliés à la taille moyenne des pores des formations aquifères (Shirov et al., 1991) ;
- la phase $\varphi_0(q)$ renseigne sur la distribution des conductivités électriques du sous-sol.
  Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm.m.

Le problème de l'inversion des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion des données théoriques est présenté sur la figure 10.

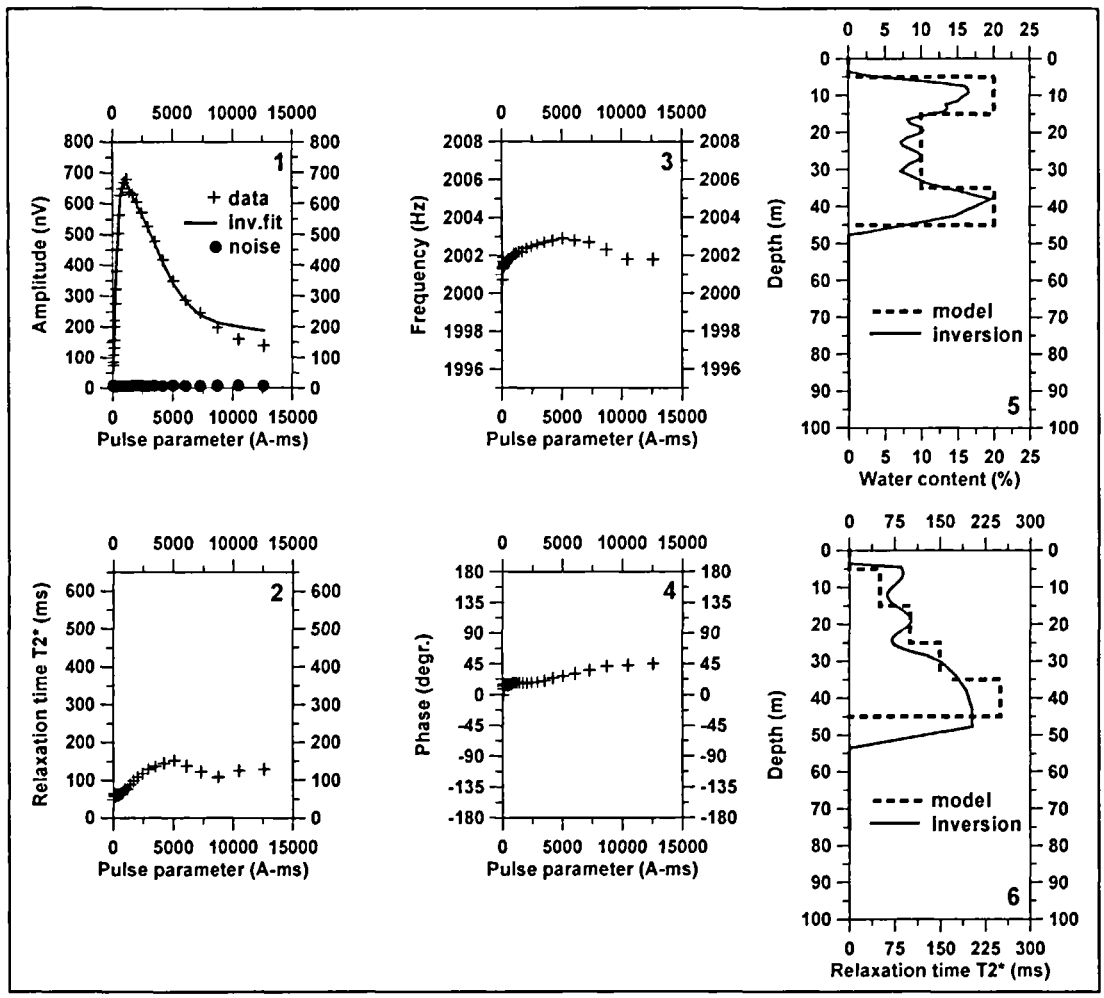


Fig. 10 - Résultats d'inversion des données théoriques

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle (cf. tableau 2) :

Profondeur		Teneur en eau	T_2^*	Larmor frequency
de (m)	à (m)	(%)	(ms)	(Hz)
5	15	20	50	2 000
15	25	10	100	2 001
25	35	10	150	2 002
35	45	20	250	2 003

Tabl. 2 - Paramètres du modèle

La mesure des caractéristiques de relaxation du signal RMP ($T_2^*(q)$ et $T_1(q)$), rend possible l'estimation les paramètres hydrodynamiques des aquifères.

En référence à l'expérience acquise en diagraphies de Résonance Magnétique Nucléaire, la perméabilité pourrait être liée aux paramètres RMP en utilisant la relation empirique :

$$k = C_k \varphi^a (T_1)^b \qquad (3)$$

où k est la perméabilité, φ est la teneur en eau, T_1 est la constante du temps de décroissance, C_k et *a, b* sont des constantes définies empiriquement.

En diagraphies RMN, différentes valeurs *a, b* sont utilisées. Sur la base de mesures réalisées avec l'équipement NUMIS au droit de forages de caractéristiques hydrogéologiques connues, les valeurs *a=1, b=2* ont été retenues.

Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies. La qualité de la relation empirique dépend alors de la qualité de la calibration.

La définition des paramètres empiriques adaptés aux différents environnements est un travail de longue haleine mais déjà dans cette phase initiale de développement, NUMIS peut être utilisé efficacement pour définir les perméabilités des aquifères au moins en valeurs relatives.

La transmissivité est le produit de la perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère.

L'inversion des données RMP mesurées avec l'équipement NUMIS produit les résultats suivants :

1) distribution verticale de la teneur en eau,

2) distribution verticale du temps de décroissance T_2^*,

3) distribution verticale du temps de décroissance T_1,

4) distribution verticale de la perméabilité,

5) distribution verticale de la transmissivité.

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté sur la figure 11.

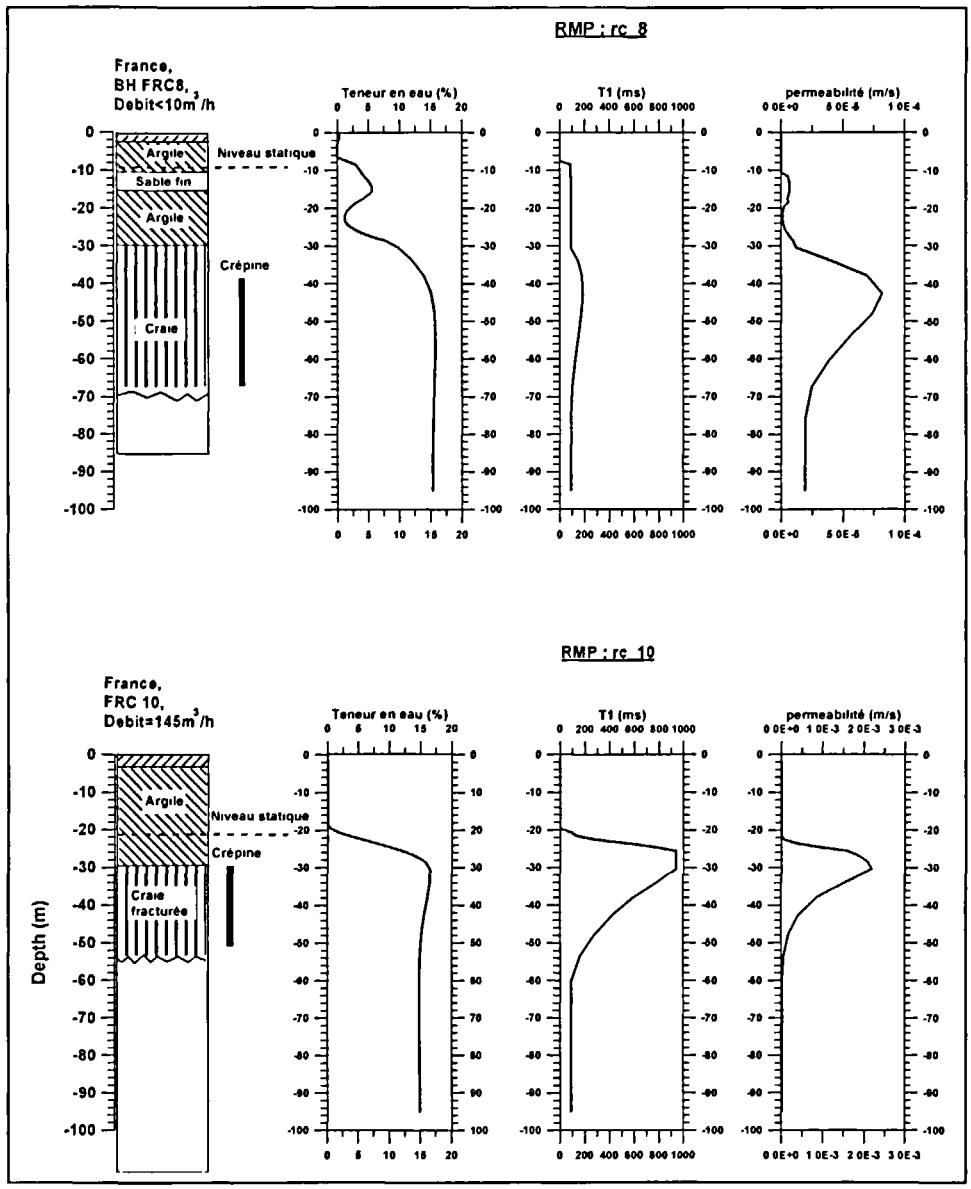


Fig. 11 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie

Présentation des résultats d'un sondage fournis par le système NUMIS

Dans ce rapport (cf. annexe 1), les données et les résultats RMP sont présentés comme sur la figure 12.
En tête de la feuille se trouve des informations générales sur le sondage et les paramètres d'interprétation.

```
Site: RADE DE BREST
Date: 05.02.2002;    Time: 17:38

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd02.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window =  158.6 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   3.82;  EN/IN =   1.72
fitting error: FID1 =  25.67%;  FID2 =  23.75 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-9
```

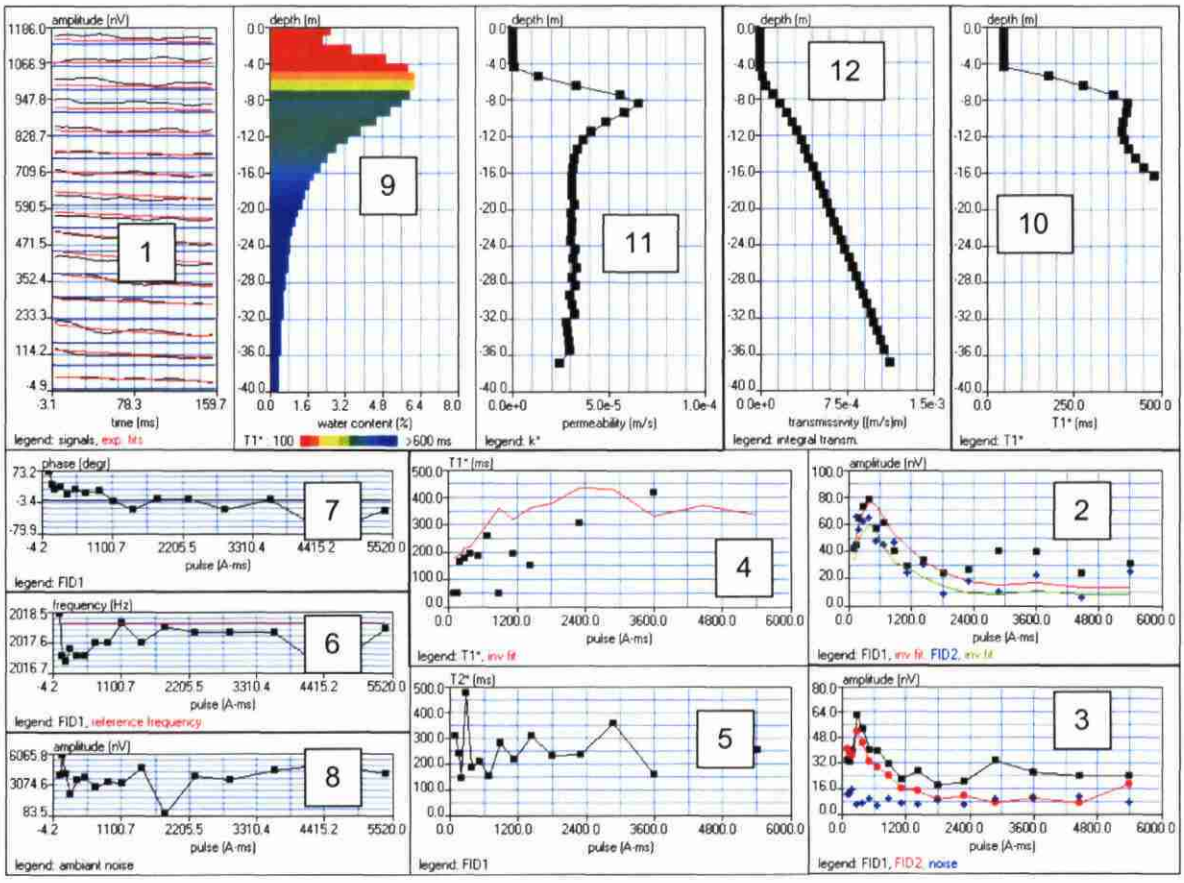


Fig. 12 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP

Les résultats graphiques sont :

1) les signaux RMP $e(t,q)$ enregistrés pour chaque valeur du paramètre d'excitation, q (croissant de bas en haut du graphique) en fonction du temps : t ;

2) les amplitudes initiales des signaux RMP (FID1 et FID2) et l'amplitude moyenne du bruit ambiant en fonction du paramètre d'excitation ;

3) les amplitudes moyennes des signaux RMP (FID1 et FID2) et du bruit en fonction du paramètre d'excitation ;

4) le temps de relaxation, $T_1^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;

5) le temps de relaxation $T_2^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;

6) la fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;

7) la phase du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;

8) le bruit ambiant avant traitement mesuré pour les différents paramètres d'excitation.

9) la distribution verticale de la teneur en eau $w(z)$;

10) la distribution verticale du temps de relaxation $T_1^*(z)$;

11) la distribution verticale de la perméabilité $k_{rmp}(z)$;

12) la distribution verticale de la transmissivité cumulée.

3.2.2. Moyens mis en œuvre

Personnel et calendrier

Les acquisitions sur le terrain ont été effectuées par F. Mathieu et par F. Dupont, géophysiciens de l'unité ARN/MRS du BRGM.

Les sites potentiels ont été implantés sur carte IGN à 1/25 000 suite à la consultation des plans de lignes électriques (hautes, moyennes et basses tension ; aériennes et souterraines) fournies par l'entreprise EDF-GDF.
Le permittage des sites sélectionnés a été réalisé par le SGR/Rennes une quinzaine de jours avant le début de l'opération.

La 1ère campagne de mesures (21 sondages RMP réalisés) s'est déroulée du 24 janvier au 7 février 2002, amené et repli compris, soit un total de 10 jours d'acquisition.

La 2nde campagne de mesures (8 sondages RMP réalisés) s'est déroulée du 12 au 18 février 2003, amené et repli compris, soit un total de 4 jours d'acquisition.

Équipement

- un système RMP IRIS-BRGM NUMIS + ;
- un magnétomètre à proton ;
- 600 m de câble d'injection et de mesure ;
- 2 micro-ordinateurs portables ;
- 2 véhicules.

3.3. TRAVAUX REALISES

3.3.1. Acquisition des mesures

L'expérience acquise lors des précédentes campagnes de mesures en zone de socle a permis d'établir une procédure de travail qui a été suivie pour cette phase d'acquisition.

Cette procédure est la suivante :

- visite du site de mesure prévisionnel et examen des conditions électromagnétiques apparentes (lignes électriques EDF, lignes téléphoniques, gazoducs, clôtures électrifiées, installations agricoles, etc.) ;
- recherche d'un nouveau site, en tenant compte des critères géologiques de sélection, si le site prévisionnel ne convient pas ;
- recherche du propriétaire ou exploitant de la parcelle pour autorisation d'accès et de mesure ;
- recherche des éleveurs entretenant des parcs électrifiés à proximité du site, pour coupure de l'alimentation électrique de ces clôtures, autant que possible ;
- mise en place de la boucle selon une géométrie de 8 carrés de 37,5 m de côté et orientée selon la direction, à priori, la plus favorable ;
- mesure du champ magnétique terrestre ;
- mesure du bruit ambiant (bruit avant stack) et analyse de ce bruit :
  - si celui-ci est relativement stable et se maintient sous la barre des 5 000 nV, le stacking sera efficace, l'acquisition peut donc être réalisée comme indiqué ci-dessous ;
  - si celui-ci est supérieur à 5 000 nV ou s'il est très instable (présence de pics) la boucle est réinstallée selon une direction orthogonale puis, si nécessaire, selon une direction intermédiaire (45). Si le bruit reste supérieur à 5 000 nV ou très instable, le site est abandonné, sinon la mesure est réalisée comme indiquée ci-dessous.

La mesure est d'abord réalisée pour quelques valeurs de pulse afin de vérifier la fréquence de Larmor.

L'acquisition complète du sondage est ensuite lancée avec un nombre de stacks supérieur ou égal à 100 et un maximum de temps d'acquisition de sept heures afin de permettre la mesure de 2 sondages par jour.

Toutes les acquisitions ont été effectuées avec les paramètres suivants :

- boucle en huit carrés de 37,5 m de côté (300 m de câble)
- nombre de pulses : 2 (mesure de T1)
- paramètre d'excitation, q : 1 à 16
- puissance : 60 %
- noise : 240 ms
- P1 : 40 ms

- FID 1 : 240 ms
- D1 : 15 ms
- P2 : 42 ms
- FID 2 : 240 ms
- D2 : 0
- optimisation du stack : oui
- filtre 50 Hz : non, sauf si l'origine du bruit est attribuable au 50 Hz
- nombre de stacks : 100 à 300 (sauf pour le RD21 où seulement 50 stacks ont été effectués du fait d'une panne de Numis).

3.3.2. Volume des travaux

Pendant les 14 jours (10+4) d'intervention sur le terrain, 29 sondages RMP (21+8) ont été réalisés sur l'ensemble de la zone d'étude, ce qui représente un rendement d'environ 2 sondages RMP par jour.

Le tableau 3 présente un récapitulatif des principales caractéristiques de ces 29 sondages RMP.

Sondage RMP	X (m)	Y (m)	Z (m)	Bruit ambiant avant stack (nV)	Nombre de stacks	Rapport signal/bruit après stacks (S/N)	Bruit exter./bruit instr. (EN/IN)	Qualité des mesures	Interprétation
RD01	116823	2409662	93	700/1000	250	1.47	6.38	moyenne	optimiste
RD02	133180	2411016	122	3000/3500	300	3.82	1.72	bonne	quantitative
RD03	106009	2401476	85	300/400	200	1.58	1.41	bonne	quantitative
RD04	108576	2400527	22	650/900	250	1.89	2.66	bonne	quantitative
RD05	120429	2404264	173	3500/5500	200	0.88	8.3	inexploitable	
RD06	102520	2384024	72	150/250	200	2.48	1.55	bonne	quantitative
RD07	124546	2393246	203	250/350	200	1.5	2.63	moyenne	estimative
RD08	134906	2396827	247	900/1200	100	1.18	7.14	inexploitable	
RD09	115914	2397080	75	1200/1800	200	1.34	4.97	moyenne	estimative
RD10	127844	2402071	180	200/250	200	1.44	1.46	bonne	estimative
RD11	114487	2387672	80	300/500	250	1.6	1.72	bonne	quantitative
RD12	113928	2388833	42	250/300	250	1.47	1.55	moyenne	estimative
RD13	143943	2386124	137	130/200	150	2.36	1.41	bonne	quantitative
RD14	132843	2404642	42	3000/4000	250	1.06	3.74	médiocre	optimiste
RD15	128349	2397099	142	3000/4000	250	1.17	3	moyenne	estimative
RD16	144734	2394365	253	300/800	150	2.47	2.79	bonne	quantitative
RD17	132207	2379471	155	850/900	250	1.49	2.72	moyenne	estimative
RD18	146634	2379881	176	300/3000	100	1.14	3.74	médiocre	estimative
RD19	156478	2380168	152	600/1400	150	0.95	7.01	médiocre	optimiste
RD20	134725	2394270	329	180/200	200	2.87	1.25	bonne	quantitative
RD21	141362	2398010	362	190/240	50	1.42	2.19	bonne	quantitative
RD22	128921	2413204	123	500/1000	150	5.72	2.09	bonne	quantitative
RD23	118054	2407007	83	1200/1400	250	1.5	5.1	médiocre	optimiste
RD24	133689	2392210	317	250/350	125	2.05	1.45	moyenne	estimative
RD25	128089	2398507	122	400/500	250	3.4	1.15	bonne	quantitative
RD26	136317	2404600	156	200/350	150	2.29	0.98	bonne	quantitative
RD27	139136	2405210	215	450/750	250	1.24	1.17	médiocre	optimiste
RD28	144786	2396802	268	250/350	300	1.38	1.51	moyenne	estimative
RD29	135105	2396883	252	4500/5000	250	1.26	2.82	inexploitable	

Tabl. 3 - Principales caractéristiques des sondages RMP

3.4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES

3.4.1. Qualité des mesures

Les conditions de bruit électromagnétique, sur l'ensemble de la zone d'étude sont plutôt défavorables et sont essentiellement dues à un habitat dispersé mais dense représenté par des exploitations agricoles qui sont génératrices de bruit (transformateurs, moteurs électriques, clôtures électrifiées).

Dans le cadre de cette étude, il est apparu clairement que la meilleure période de l'année pour les mesures RMP correspond aux mois de janvier et février. Ceci est du à une baisse importante de l'activité des clôtures électriques durant ces deux mois (les troupeaux se trouvant généralement dans les étables). L'influence d'une clôture électrique (qui dépend évidemment de la puissance du générateur et de la superficie de la boucle formée par cette clôture) est sensible dans un rayon de l'ordre d'un kilomètre autour de la station RMP.

Pour estimer la qualité des mesures RMP, les paramètres à prendre en compte sont les suivants :

1) Le niveau de bruit externe après stacking et filtrage est comparé au bruit instrumental de NUMIS qui est de l'ordre de 5 nV.

   EN/IN = external noise / instrumental noise = noise/5.

Si le rapport EN/IN $\approx$ 1, la mesure peut être considérée comme étant de bonne qualité, même si le signal RMP n'a pas été détecté. Dans le cas où le signal RMP est très faible, le nombre de stacks doit être suffisant pour obtenir un rapport EN/IN $\simeq$ 1.

2) Le signal RMP est comparé au bruit après stacking (le bruit observé inclut le bruit externe et le bruit instrumental),

   S/N = signal/noise.

La mesure est considérée comme étant de bonne qualité si S/N > 2 et dans ce cas là, il n'est plus nécessaire d'avoir EN/IN $\simeq$ 1. Dans cette configuration, une <u>interprétation quantitative</u> des mesures RMP est possible.

Si EN/IN $\simeq$ 1 et S/N $\simeq$ 1, l'interprétation quantitative n'est pas possible. Seule une <u>interprétation estimative</u> des caractéristiques hydrodynamiques peut être donnée. Par contre, la qualité peut être considérée comme bonne ou moyenne.

Si EN/IN > 1 et S/N $\leq$ 1, le sondage RMP est considéré comme étant de qualité moyenne ou médiocre. L'amplitude du signal RMP est inférieure au niveau de bruit. L'interprétation permet de donner des valeurs maximales pour les différents paramètres hydrodynamiques. L'<u>interprétation</u> est alors <u>optimiste</u>.

3) La fréquence du signal RMP doit être stable et proche de la fréquence de Larmor donnée par le magnétomètre. La différence peut être de l'ordre de 3 à 4 Hz.

4) La phase du signal RMP doit être stable ou varier de façon progressive.

5) Le temps de relaxation T2 doit être stable ou varier de façon progressive en restant compris entre 50 et 400 ms.

Le tableau 3 présente un récapitulatif des principales caractéristiques des sondages RMP.

Pour les 29 sondages RMP, le rapport EN/IN varie entre 0,98 et 8,3 ; et le rapport S/N oscille entre 0,88 et 5,72.

L'analyse de la qualité des mesures pour les 29 sondages RMP donne la répartition suivante :

- bonne : 13 45 %
- moyenne : 8 28 %
- médiocre : 5 17 %
- inexploitable : 3 10 %.

En ce qui concerne l'interprétation des 26 sondages exploitables la répartition est la suivante :

- interprétation quantitative : 12 46 %
- estimative : 9 35 %
- optimiste : 5 19 %

3.4.2. Matrice pour l'inversion

La matrice utilisée pour l'inversion automatique en quarante couches et pour la modélisation directe possède les caractéristiques suivantes :

- eight square side : 37,5 m ;
- geomagnetic field inclination : 64°;
- Larmor frequency : 2020 Hz ;
- Max. depth : 50 m ;
- Qmax. : 6500 A.ms ;
- Geoelectrical section
  - 0 - 20 m 100 ohm.m ;
  - 20 - 50 m 1000 ohm.m.

La coupe géoélectrique utilisée pour le calcul de cette matrice provient de la synthèse des résultats des sondages électriques (24) effectués, dans un contexte similaire, sur la carte géologique à 1/50 000 de Plabennec.

3.4.3. Inversions automatiques

En raison des conditions de bruit électromagnétique, la profondeur d'investigation réelle est de 50 m.

Les 26 sondages RMP exploitables ont dans un premier temps fait l'objet d'une inversion automatique en quarante couches (cf. annexe 1) avec ajustement manuel au cas par cas. Cet ajustement consiste essentiellement à éliminer certains pulses pour lesquels les valeurs d'amplitude semblent aberrantes et à ne pas tenir compte des mesures à partir du moment où la phase présente un décrochement brutal de l'ordre de 90° (remonté en « queue » de courbe).

Ces inversions automatiques en quarante couches donnent des résultats objectifs au niveau de la distribution verticale des différentes couches aquifères mais ces résultats doivent être confrontés à des données géologiques précises, pour déterminer la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques des différents horizons aquifères en présence.

4. Modélisation géométrique des interfaces

4.1. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

La cartographie quantitative de la réserve en eau souterraine en contexte de socle altéré repose sur le calcul, maille par maille, de l'épaisseur de chaque horizon d'altération situé en zone saturée, couplé à la détermination de la teneur moyenne en eau libre de chacun de ces horizons pour chaque faciès lithologique présent dans la zone d'étude (figure 13).

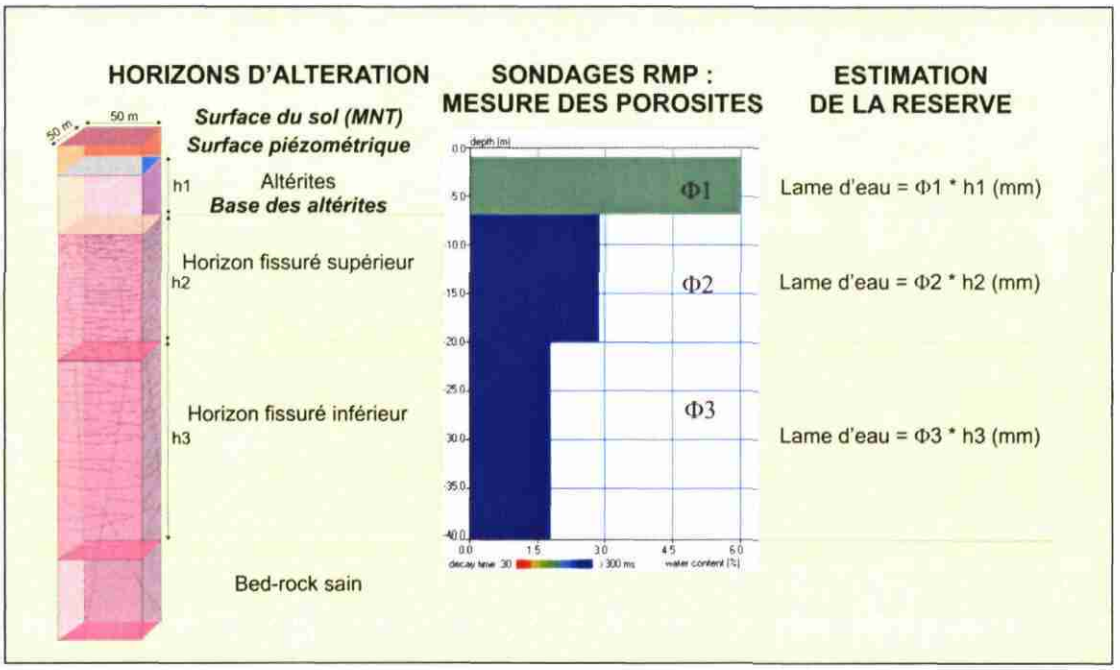


Fig. 13 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine

La première étape du travail consiste donc à déterminer la géométrie des principales interfaces : surface piézométrique, surface de base des altérites, surface de base de l'horizon fissuré supérieur, surface de base de l'horizon fissuré inférieur ; ceci revient à calculer des grilles représentant l'altitude de ces différentes interfaces.

La deuxième étape consiste à calculer l'épaisseur « mouillée » de chaque horizon situé dans la zone saturée, en croisant la piézométrie avec l'altitude des interfaces de ces différents horizons.

La troisième étape consiste à calculer, pour chaque formation géologique, la teneur en eau moyenne de chaque horizon d'altération. Ce calcul nécessite l'interprétation géologique de chaque sondage RMP afin d'identifier la position des interfaces entre horizons d'altération. Le calcul des teneurs en eau moyennes de chaque horizon d'altération pour chaque formation géologique est ensuite réalisé, en pondérant le calcul par la qualité du sondage (rapport signal/bruit).

Enfin, en multipliant l'épaisseur de chaque horizon saturé par la teneur en eau, on obtient l'épaisseur de la lame d'eau contenue dans chaque horizon (altérites, horizon fissuré supérieur, horizon fissuré inférieur), la somme de l'ensemble correspondant à la lame d'eau souterraine totale.

4.2. MODELISATION DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

4.2.1. Récupération des données piézométriques

Suite à une recherche au niveau de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sur les 860 forages du secteur d'étude, 193 mesures de la profondeur du niveau de nappe ont été relevées dans des forages d'eau. Ces niveaux varient entre 0 et 15 m de profondeur.
Ces mesures sont effectuées par des foreurs ou des bureaux d'étude après réalisation de l'ouvrage. Cependant, il arrive parfois que ces mesures soient effectuées trop rapidement avant la mise en équilibre du niveau de nappe ; les mesures sont alors sous-estimées.
L'ensemble de ces 193 points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 8,3 km².

Une campagne de mesures piézométriques a été réalisée du 15 au 19 juillet 2002 afin d'obtenir une meilleure densité d'observation et une répartition plus homogène proche de 50 mesures par carte géologique.

Cette campagne a été préparée une semaine auparavant afin de sélectionner les forages susceptibles de permettre une mesure de la profondeur de la nappe (sélection des communes et repérage des lieux-dits). Malgré le nombre de communes visitées lors de la campagne de juillet 2002, plusieurs facteurs n'ont pas permis la mesure de la profondeur de la nappe : absence ou changement du propriétaire de l'ouvrage, enfouissement du forage, forage équipé avec une pompe, forages abandonnés, niveau influencé par un pompage récent.

Néanmoins, lors de cette campagne 39 mesures ont été effectuées selon la répartition détaillée dans le tableau 4 par secteurs correspondant aux différentes cartes géologiques.
Les niveaux relevés varient entre 0,4 et 13,3 m de profondeur.

Nombre de mesures piézométriques	Landerneau	Brest	Le Faou	Huelgoat
Avant campagne (193)	39	39	23	92
Campagne (39)	5	11	23	0
Après campagne (232)	44	50	46	92

Tabl. 4 – Répartition des mesures piézométriques

L'ensemble de ces 232 points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 6,9 km².

4.2.2. Modélisation

En l'absence de carte piézométrique sur la zone d'étude, l'altitude du toit de la nappe a été modélisée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et des mesures de la profondeur du niveau de nappe en forage. Le MNT au pas de 100 m provient de l'Institut Géographique National.

La méthode mise en œuvre a été mise au point et validée pour les contextes de socle altéré (Wyns et al., 2002) ; son principe est rappelé ci-dessous (figure 14).

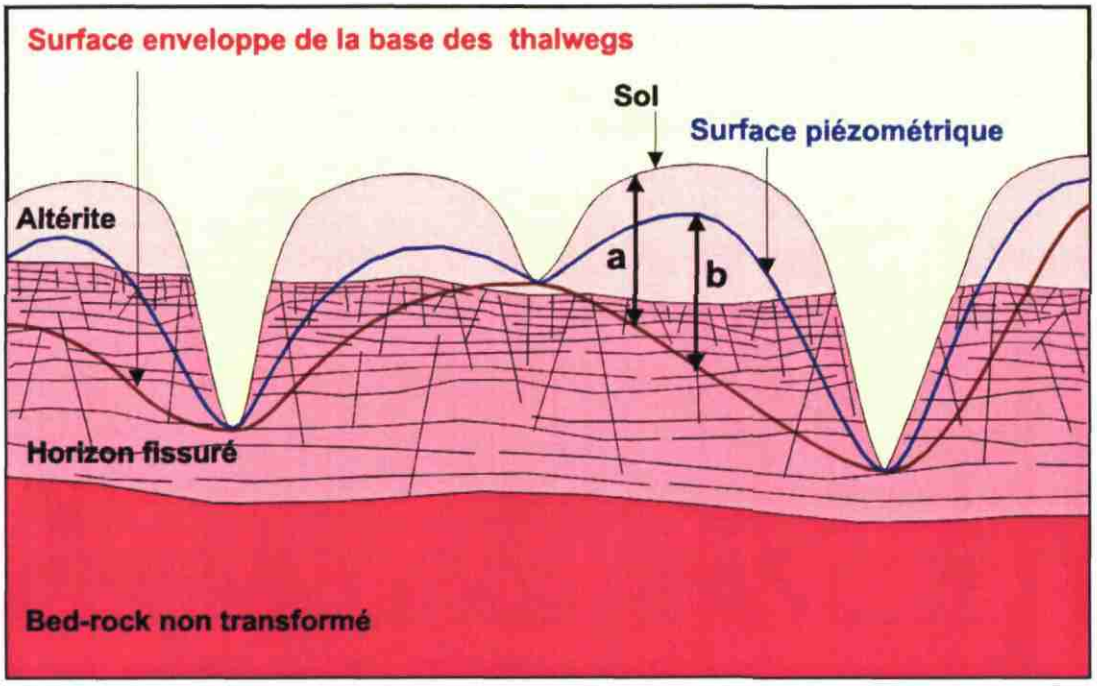


Fig. 14 - Principe de modélisation de la surface piézométrique

En contexte de nappe libre où les débits d'étiage des rivières sont fournis par la nappe, on peut considérer que les rivières pérennes représentent des zones d'affleurement de la surface piézométrique. Les rivières représentant les exutoires de la nappe, la surface piézométrique remonte donc sous les plateaux lorsque l'on s'écarte des vallées. La surface piézométrique est donc toujours comprise entre la surface topographique et la surface enveloppe des rivières pérennes (ou enveloppe de la base des thalwegs).
Une corrélation linéaire relie d'une part la dénivellation entre l'altitude du sol et celle de la surface-enveloppe des rivières (« a » sur la figure 14), et d'autre part la dénivellation entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la surface-enveloppe des rivières (« b » sur la figure 14). L'équation de cette droite permet de calculer en tout point l'altitude de la surface piézométrique à partir de l'altitude du sol et de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.

La surface-enveloppe des rivières pérennes a été obtenue de la manière suivante :

- à partir du réseau hydrographique pérenne issu de la BD Carthage, échantillonnage d'un point tous les 50 m linéaires,

- croisement du semis de points avec le MNT pour obtenir l'altitude des points représentatifs du réseau hydrographique pérenne,
- étude géostatistique et krigeage de l'altitude de ce semis de points : on obtient une grille représentant l'altitude de la surface-enveloppe du réseau hydrographique pérenne.

L'écart-type de krigeage, représentant l'incertitude maximale sur la variable calculée, est compris pour la zone d'étude entre 1 et 20,12 m, avec une moyenne de 7,92 m.

La surface du sol nous est fournie par le MNT.

Sur la grille englobant la zone d'étude, 232 mesures piézométriques ont été utilisées (39 points provenant de la campagne piézométrique et 193 de la consultation BSS).
Pour chacun de ces points, on a calculé par croisement avec les grilles correspondantes l'altitude du sol et l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes, de manière à calculer les paramètres « a » (Zsol-Zrivières) et « b » (Zpiézométrie -Zrivières).

Une première représentation des 232 couples de variables a et b sur un diagramme binaire a montré que 22 points s'éloignaient de la droite b=f(a).

Plusieurs raisons expliquent ce comportement éloigné de la majorité des points validés :

- points à abscisse négative : points pour lesquels la surface enveloppe des rivières calculée se situe au dessus de la surface topographique, ce qui n'est pas possible ; les incertitudes de krigeage de la surface de base des rivières sont probablement à l'origine de ce phénomène ;
- points à ordonnée trop importante : points situés dans les vallées pour lesquels la correspondance entre le niveau piézométrique et le niveau de la base des thalwegs n'est pas bonne ;
- points à ordonnée trop faible : points influencés par des pompages (les niveaux piézométriques sont alors inférieurs à ce qu'ils devraient être).

Après élimination des valeurs aberrantes (22 mesures), 210 mesures piézométriques ont pu été utilisées (39 points provenant de la campagne piézométrique et 171 de la consultation BSS).
Le report des 210 couples de variables a et b sur un diagramme binaire (figure 15) a permis de calculer l'équation suivante :

$$\boxed{b = 0.9703 * a - 5,7382}$$

Cette équation permet de calculer directement l'altitude de la surface piézométrique à partir du MNT et de la grille de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes. L'ordonnée à l'origine négative (-5,74 m) représente l'encaissement moyen des rivières par rapport à leurs berges (une altitude moyenne est affectée à la maille de 100 m située au niveau de la rivière).

La carte de l'altitude de la surface piézométrique est représentée sur la planche 2. L'écart-type de krigeage de la surface-enveloppe des rivières pérennes, qui représente l'essentiel de l'incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique, est représenté sur la planche 3.

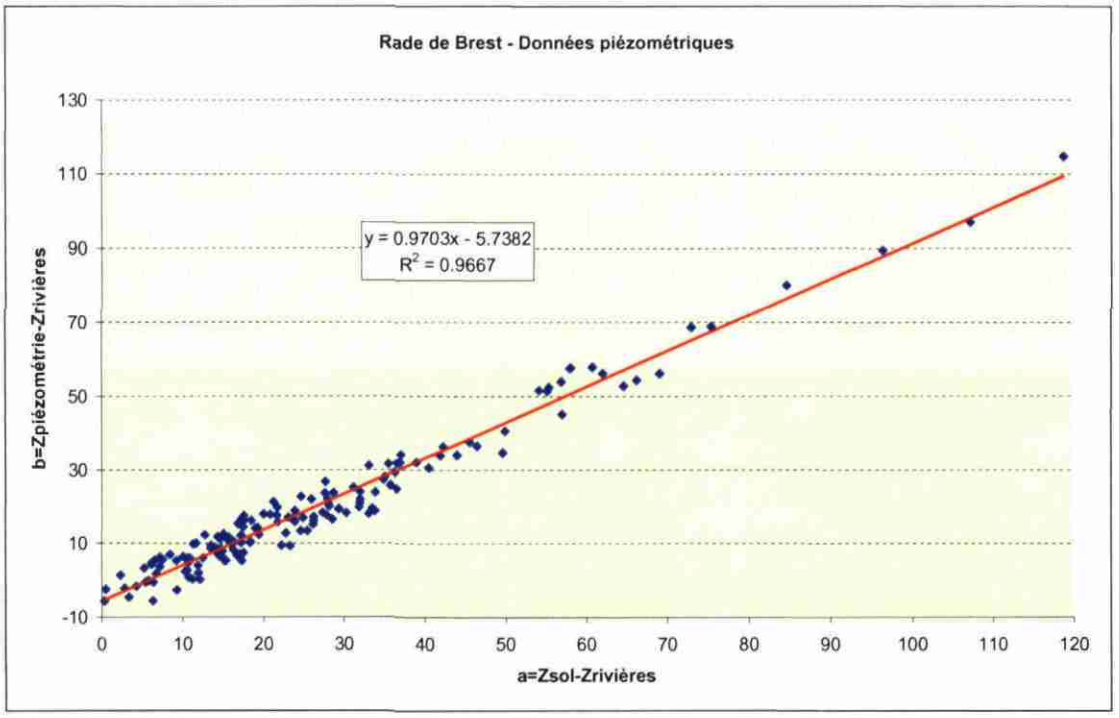


Fig. 15 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes

4.3. MODELISATION DE LA BASE DES ALTERITES ET DE L'EPAISSEUR DES ALTERITES EN PLACE

La surface de base des altérites a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de 6510 points d'observation de l'interface altérites/milieu fissuré. Ces points proviennent :

- de données des 450 forages recensés dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et qui ont recoupé la base des altérites,
- d'observations des affleurements présents sur la zone d'étude (2060 points),
- du repérage sur le terrain du contact altérites/milieu fissuré (digitalisation des contours et création de 4000 points).

L'acquisition des 6060 derniers points s'est déroulée lors de deux campagnes de terrain, en septembre 1999 et août 2002. L'ensemble des 6510 points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 0,25 km².

L'écart-type de krigeage varie entre 1,2 et 34,7 m avec une moyenne de 6 m.
L'altitude de la surface obtenue est représentée sur la planche 4.
L'incertitude (écart-type de krigeage) sur l'altitude de cette surface est représentée sur la planche 5.

La carte de l'extension et de l'épaisseur des altérites en place a été réalisée par différence entre le MNT et l'altitude de la base des altérites.
Elle est représentée sur la planche 6.
L'épaisseur des altérites varie entre 0 et 49,7 m, avec une moyenne de 2,2 m (la plupart des altérites ayant moins de 12 mètres d'épaisseur).

Le secteur Nord-Est de la carte d'Huelgoat, géologiquement complexe, n'a pas pu être renseigné en raison d'un nombre insuffisant de points d'observation. Cette faible densité de données entraînait une erreur de krigeage trop importante.

4.4. MODELISATION DE LA BASE DE L'HORIZON FISSURE SUPERIEUR ET INFERIEUR

Par ses propriétés hydromécaniques (porosité, perméabilité), l'horizon fissuré peut être divisé en deux parties. Toutefois, la base de ces compartiments correspondant à des limites probabilistes (la base de l'horizon fissuré inférieur correspond au seuil de percolation dans la théorie de la percolation), leur altitude ne peut faire l'objet de mesure directe par forage ou par observation visuelle. L'épaisseur de ces deux compartiments a donc été déduite des mesures de Résonance Magnétique Protonique.
Pour une lithologie donnée, on peut considérer que l'épaisseur moyenne de chacun des deux compartiments de l'horizon fissuré ne varie pas sensiblement à l'échelle de la zone étudiée.
Les épaisseurs moyennes pour chaque lithologie ont été calculées (tableau 5) à partir des résultats d'inversion des 26 sondages RMP du secteur d'étude.
Les sondages RMP déjà réalisés dans le cadre d'autres études sur les mêmes formations géologiques ont également été utilisés pour calculer ces épaisseurs :

- 6 sondages provenant du secteur de Plabennec (PLB), 4 caractérisant le granite de Kersaint grossier et 2 pour les gneiss de Brest,
- 2 sondages effectués sur le bassin versant de l'Horn (HR), au Nord du Finistère, pour caractériser les Micaschistes du Conquet,
- 2 sondages réalisés sur le bassin versant du Yar (YA), au Nord-Ouest des Côtes d'Armor, pour caractériser les orthogneiss de Plougonven.

L'horizon fissuré supérieur, caractérisé par une porosité et une perméabilité maximales, présente une épaisseur moyenne comprise entre 9,25 et 21 m ; ces valeurs sont conformes aux résultats obtenus dans d'autres régions sur des lithologies comparables (Wyns et al., 2002).
Les épaisseurs obtenues pour l'horizon fissuré inférieur varient entre 25,33 et 34,5 m ; elles correspondent à des valeurs approximatives, en raison de la diminution progressive vers le bas de la teneur en eau de cet horizon et donc de la diminution du rapport signal/bruit des sondages géophysiques.

Une carte de la profondeur de la base de l'horizon fissuré inférieur par rapport à la surface du sol est présentée sur la planche 7 : elle représente la profondeur approximative du mur de l'aquifère d'altération. Les valeurs varient entre 0 et 93,5 m, avec une moyenne de 32,6 m.

4.5. CALCUL DE L'EPAISSEUR DES HORIZONS SITUES EN ZONE SATUREE

L'extension et l'épaisseur de la partie saturée de chacun des 3 horizons d'altération (altérites, horizon fissuré supérieur, et horizon fissuré inférieur) ont été obtenues par croisement des différentes interfaces avec la surface piézométrique.
La somme de l'ensemble, représentant l'épaisseur saturée de l'aquifère d'altération, est représentée sur la planche 8. Cette épaisseur varie entre 0 et 87,5 m, avec une moyenne de 26,8 m.

		EPAISSEURS	
Géologie	**Sondage**	**Horizon fissuré supérieur**	**Horizon fissuré inférieur**
Granite de Kersaint grossier	RD01	13.00	33.00
	PLB07	13.00	30.00
	PLB10	14.00	30.00
	PLB12	16.00	30.00
	PLB34	16.00	27.00
Moyenne		***14.40***	***30.00***
Micaschistes du Conquet	HR03	10.00	30.00
	HR04	11.00	35.00
	RD02	10.00	35.00
	RD22	6.00	34.00
Moyenne		***9.25***	***33.50***
Gneiss de Brest	PLB35	14.00	32.00
	PLB36	13.00	28.00
	RD03	16.00	29.00
Moyenne		***14.33***	***29.67***
Schistes briovériens de l'Elorn	RD04	16 (ns)	30.00
	RD23	16.00	30.00
Moyenne		***16.00***	***30.00***
Schistes et Quartzites de Plougastel	RD06	16 (ns)	26.00
	RD07	19 (ns)	26.00
	RD10	20.00	24.00
	RD21	18 (ns)	29.00
Moyenne		***20.00***	***26.25***
Schistes et Calcaires de l'Armorique	RD09	21.00	26.00
	RD25	21.00	21.00
	RD11	19 (ns)	29.00
Moyenne		***21.00***	***25.33***
Groupe de Traon	RD12	19.00	31.00
	RD13	16.00	28.00
Moyenne		***17.50***	***29.50***
Orthogneiss de Plougonven	YA01	16 (ns)	30.00
	YA02	18.00	26.00
	RD26	15.00	30.00
	RD14	18.00	29.00
Moyenne		***17.00***	***28.75***
Granite de Commana	RD15	17.00	30.00
	RD27	15 (ns)	34.00
Moyenne		***17.00***	***32.00***
Granite de Huelgoat	RD16	18.00	28.00
	RD28	12 (ns)	37.00
Moyenne		***18.00***	***32.50***
Bassin carbonifère de Chateaulin	RD17	21.00	26.00
	RD18	14 (ns)	36.00
	RD19	17.00	30.00
Moyenne		***19.00***	***30.67***
Grès armoricain	RD20	10 (ns)	40.00
	RD24	14.00	29.00
Moyenne		***14.00***	***34.50***

Tabl. 5 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP

(ns) : il n'est pas possible de calculer l'épaisseur de l'horizon fissuré supérieur en raison de l'absence d'altérites

5. Calcul de la réserve en eau souterraine

5.1. SYNTHESE DES MESURES RMP

Les résultats des campagnes de sondages de Résonance Magnétique Protonique sont présentés dans l'annexe 1.

26 sondages ont fourni des résultats utilisables après inversion. Pour chaque sondage a été réalisée une interprétation géologique, en tenant compte de la position des interfaces obtenues par modélisation géométrique au droit de chacun d'eux et de l'incertitude sur ces interfaces. Le but de cette interprétation géologique était de caler chaque sondage sur le système multicouche des aquifères d'altération, afin de calculer les teneurs moyennes en eau de chaque horizon.

L'interprétation géologique des sondages est présentée sous forme synthétique sur le tableau 6.
Pour chaque sondage est présenté le rapport signal/bruit qui constitue un indice de qualité global du sondage, dépendant des conditions de bruit électromagnétique sur le site au moment de l'acquisition (lignes électriques hautes, moyennes et basses tension, et clôtures à vaches).
Les teneurs en eau brutes ont été calculées en faisant la moyenne des teneurs en eau sur l'épaisseur de chaque compartiment de l'aquifère. Une teneur en eau brute moyenne a été calculée à partir de ces résultats pour chaque formation géologique. Afin de tenir compte de la qualité variable des sondages, des teneurs moyennes en eau pondérées ont été calculées dans les 3 colonnes de droite : en face de chaque sondage figure le produit de la teneur en eau brute par le rapport signal/bruit ; les teneurs en eau pondérées pour chaque formation géologique correspondent au quotient de la somme des produits (teneurs en eau brute * signal/bruit) par la somme des rapports signal/bruit.

Les résultats présentés dans le tableau 2 permettent de classer les formations géologiques de la zone d'étude par ordre de teneurs en eau décroissante de la manière suivante :

- Les Micaschistes du Conquet avec des teneurs en eau de 7,1 % pour les arènes, 6,1 % pour l'horizon fissuré supérieur et 0,4 % pour l'horizon fissuré inférieur, c'est la formation géologique qui présente les teneurs en eau les plus élevées ;
- Le granite de Kersaint grossier : ce faciès vient en deuxième position avec des teneurs en eau de 4,6 %, 3,7 % et 1,2 % respectivement pour chaque horizon d'altération ;
- Les Schistes et Calcaires de l'Armorique viennent ensuite avec respectivement 4 %, 3,2 % et 0,9 % ;
- Les Orthogneiss de Plougonven présentent des teneurs en eau de 2,8 %, 3,2 % et 0,7 % ;
- Le granite de Huelgoat présente des teneurs en eau plus faibles que le granite de Kersaint (2,4 %, 2,7 % et 0,5 %) ;
- Les schistes briovériens de l'Elorn présentent de faibles teneurs en eau dans les altérites (1,7 %, 3,4 % et 0,3 %) dues à l'absence de biotite ; l'horizon fissuré supérieur comporte néanmoins des teneurs en eau raisonnables ;

			TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES		
Géologie	**RMP**	**signal/bruit**	**Altérite %**	**Fissup %**	**Fissinf %**	**Altérite %**	**Fissup %**	**Fissinf %**
Granite de Kersaint grossier	RD01	1.47	4 73	4.18	0 84	6 95	6.14	1.23
	PLB07	0.8	4 26	3.54	2 07	3 41	2.83	1.66
	PLB10	1.76	4 58	3.15	1.07	8 06	5.54	1.88
	PLB12	1 95	4 79	3 66	1.56	9 33	7.13	3 04
	PLB34	0 63	4 67	3 95	0.53	2.94	2 49	0 33
Moyenne			***4.60***	***3.70***	***1.21***	***4.64***	***3.65***	***1.23***
Micaschistes du Conquet	HR03	1.04	-	1.92	0.24	-	2.00	0 25
	HR04	2.34	4 31	6 85	0.11	10 09	16 03	0 26
	RD02	3 82	4 81	4.66	0.75	18.37	17.80	2.86
	RD22	5.72	9.85	7.43	0 41	56.35	42.52	2.32
Moyenne			***6.32***	***5.22***	***0.38***	***7.14***	***6.06***	***0.44***
Gneiss de Brest	PLB35	1.42	-	5.11	0 32	-	7.26	0 45
	PLB36	1.08	0.72	3 40	0.73	0.78	3.67	0.78
	RD03	1.58	0.38	0 85	0 46	0 60	1.34	0.73
Moyenne			***0.55***	***3.12***	***0.50***	***0.52***	***3.01***	***0.48***
Schistes briovériens de l'Elorn	RD04	1.89	-	4.66	0 45	-	8.80	0.85
	RD23	1.5	1.66	1.91	0.11	2.48	2 86	0.17
Moyenne			***1.66***	***3.28***	***0.28***	***1.66***	***3.44***	***0.30***
Schistes et Quartzites de Plougastel	RD06	2 48	-	1.96	0 96	-	4 86	2.37
	RD07	1.5	-	0 83	0 84	-	1.25	1.27
	RD10	1.44	0.32	1.09	?	0 47	1.57	?
	RD21	1.42	-	0 99	?	-	1.40	?
Moyenne			***0.32***	***1.22***	***0.90***	***0.32***	***1.33***	***0.91***
Schistes et Calcaires de l'Armorique	RD09	1.34	4.77	6 29	0.90	6.39	8 43	1.21
	RD25	3.4	3.72	2.43	?	12 64	8 25	?
	RD11	1 6	-	2 33	?	-	3 73	?
Moyenne			***4.24***	***3.68***	***0.90***	***4.01***	***3.22***	***0.90***
Groupe de Traon	RD12	1.47	-	1.27	0.32	-	1.87	0.47
	RD13	2.36	-	1 68	?	-	3.97	?
Moyenne			***-***	***1.48***	***0.32***	***-***	***1.53***	***0.32***
Orthogneiss de Plougonven	YA01	1.42	-	3.99	0.68	-	5.67	0.96
	YA02	3 33	3.15	4 24	0 91	10 49	14.11	3.02
	RD26	2 29	3 20	2.17	0.41	7.34	4.97	0.95
	RD14	1.06	0.83	0.79	?	0 88	0.84	?
Moyenne			***2.40***	***2.80***	***0.67***	***2.80***	***3.16***	***0.70***
Granite de Commana	RD15	1.17	1 60	1 65	?	1 87	1.93	?
	RD27	1.24	-	1.00	0.24	-	1.24	0 30
Moyenne			***1.60***	***1.33***	***0.24***	***1.60***	***1.32***	***0.24***
Granite de Huelgoat	RD16	2 47	2.35	3 61	?	5 81	8 91	?
	RD28	1.38	-	0 99	0 46	-	1.36	0 63
Moyenne			***2.35***	***2.30***	***0.46***	***2.35***	***2.67***	***0.46***
Bassin carbonifère de Chateaulin	RD17	1.49	1.61	4.47	0.72	2.40	6 66	1.07
	RD18	1.14	-	2.56	0 22	-	2.92	0 25
	RD19	0 95	1.27	1.50	?	1.21	1.43	?
Moyenne			***1.44***	***2.85***	***0.47***	***1.48***	***3.08***	***0.50***
Grès armoricain	RD20	2.87	-	3.56	0.32	-	10 22	0 90
	RD24	2.05	-	2 87	?	-	5 89	?
Moyenne			***-***	***3.22***	***0.32***	***-***	***3.28***	***0.32***

Tabl. 6 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique

? : les teneurs en eau de l'horizon fissuré inférieur ne sont pas interprétables (le bruit est plus important que le signal)

- Les formations du bassin carbonifère de Châteaulin présentent des teneurs en eau de 1,5 %, 3,1 % et 0,5 % ;
- Les Gneiss de Brest présentent des teneurs en eau relativement faibles (0,5 %, 3 % et 0,5 %) ;
- Les grès armoricain ne présentent pas d'altérites et les formations fissurées ont de faibles teneurs en eau (3,3 % et 0,3 %) ;
- Le granite de Commana présente des teneurs en eau relativement faibles pour un granite (1,6 %, 1,3 % et 0,2 %), probablement dues à la faible taille du grain de la roche (grain moyen par rapport au granite porphyroïde de Huelgoat) ;
- Les Schistes et Quartzites de Plougastel viennent ensuite avec respectivement 0,3 %, 1,3 % et 0,9 % ;
- Les formations du Groupe de Traon ne présentent pas d'altérites et les formations fissurées ont des teneurs en eau très faibles de 1,5 % et 0,3 %.

Les altérites des Micaschistes du Conquet sont argileuses (perméabilité RMP très faible) et contiennent beaucoup d'eau (teneur > 7 %). L'altération du granite de Kersaint donne des arènes à gros grains présents dans une gangue argileuse (perméabilité RMP faible de 1.10^{-5} m/s) ; les teneurs en eau sont également fortes (4,6 %). Les Orthogneiss de Plougonven présentent une arène limoneuse (perméabilité RMP très faible 5.10^{-6} m/s) fine à teneur en eau non négligeable (2,8 %).

Les Gneiss de Brest ont une altération sableuse à perméabilité plus élevée qui laisse circuler l'eau jusqu'à l'horizon fissuré et ne la retient pas ; ceci explique les teneurs en eau faibles dans les altérites (0,5 %) et plus élevées dans l'horizon fissuré supérieur (3%).

Les teneurs en eau des différents niveaux d'altération des schistes briovériens de l'Elorn et des formations du bassin carbonifère de Châteaulin sont similaires.

Les Schistes et Quartzites de Plougastel comportent peu d'eau par rapport aux Schistes et Calcaires de l'Armorique (perméabilité RMP faible de 2.10^{-5} m/s), malgré le caractère voisin de ces deux formations sur le secteur d'étude.

5.2. CALCUL DE LA CARTE DE LA RESERVE EN EAU SOUTERRAINE

Pour chacun des trois horizons d'altération, la réserve en eau souterraine a été calculée en multipliant l'épaisseur saturée par la teneur moyenne pondérée en eau. La réserve est exprimée en hauteur d'eau (ou lame d'eau).

Les altérites (planche 9) contiennent globalement un stock d'eau souterraine assez faible totalisant environ 22 millions de m^3, dû au faible degré d'ennoiement des altérites dans la nappe, malgré des lames d'eau atteignant localement 1,97 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 10) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 201 millions de m^3, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 1,27 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 11) contient un stock d'eau un peu moins important : 170 millions de m^3, pour une lame d'eau maximale de 0,41 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 12) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 393 millions de m^3, avec une lame d'eau maximale de 2,67 m.

5.3. DISCUSSION ET COMMENTAIRES

La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 32,6 m, et saturé sur 26,8 m en moyenne. Le calcul est réalisé sur les 50 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP (cf. chapitre 3.4.3.). Le volume total d'eau souterraine est donc sous-estimé par rapport à la réalité. Néanmoins, la répartition des réserves en eau souterraine reflète largement la réalité.

Au sein de la zone d'étude, la répartition de la réserve n'est pas homogène, elle apparaît fortement contrôlée par les teneurs en eau des formations géologiques : ainsi, les formations présentant la réserve la plus importante sont :

- les Micaschistes du Conquet et le granite de Kersaint grossier, au Nord ;
- les Schistes et Calcaires de l'Armorique, au centre ;
- ainsi que les Orthogneiss de Plougonven, au Nord-Est.

Les formations comprenant un peu moins de réserve sont :

- le bassin carbonifère de Châteaulin, au Sud-Est ;
- les Gneiss de Brest, au Nord et Nord-Ouest ;
- le granite de Huelgoat, à l'Est.

Les autres formations géologiques présentent un intérêt moindre en terme de réserve.

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la répartition de l'eau souterraine au sein de l'aquifère multicouches montre qu'environ 94 % de la réserve en eau souterraine est contenue dans l'horizon fissuré (51 % dans l'horizon fissuré supérieur, 43 % dans l'horizon fissuré inférieur, et 6 % dans les altérites).
Ceci est principalement lié à la meilleure préservation de l'horizon fissuré, les altérites ayant été plus largement érodées sur le secteur (épaisseur moyenne faible de 2,2 m et répartition inégale sur le secteur d'étude), ainsi que par la position de la surface piézométrique au sein des horizons d'altération. En effet, sur 87,5 % du territoire étudié, la surface piézométrique se situe au sein de l'horizon fissuré (contre 12,5 % pour les altérites).

Ces résultats sont supérieurs à ceux obtenus dans des terrains majoritairement granitiques dans le Finistère nord (Wyns et al., 2002) où la réserve était située à 80 % dans l'horizon fissuré. Cette différence s'explique en partie par des reliefs plus contrastés sur la présente zone d'étude, ce qui entraîne d'une part le fait qu'une partie importante des altérites ait été évacuée par érosion, et d'autre part que la surface piézométrique est plus profonde.

Les valeurs des pluies efficaces varient sur la zone d'étude (Louvrier et Margat, 1983 : moyenne annuelle 1946-1976) ; les valeurs sont croissantes de l'Ouest du secteur (250-300 mm) au Nord-Est (> 500 mm). La figure 16 représente cette répartition des pluies efficaces.
La valeur moyenne des pluies efficaces sur le secteur d'étude de 1 600 km² est d'environ 475 mm. La pluie efficace se répartit en ruissellement et en infiltration ; seul ce dernier phénomène alimente la réserve en eau souterraine.

En considérant un ruissellement compris entre 25 % et 50 % de la pluie efficace, l'infiltration annuelle est comprise entre 235 et 355 mm.

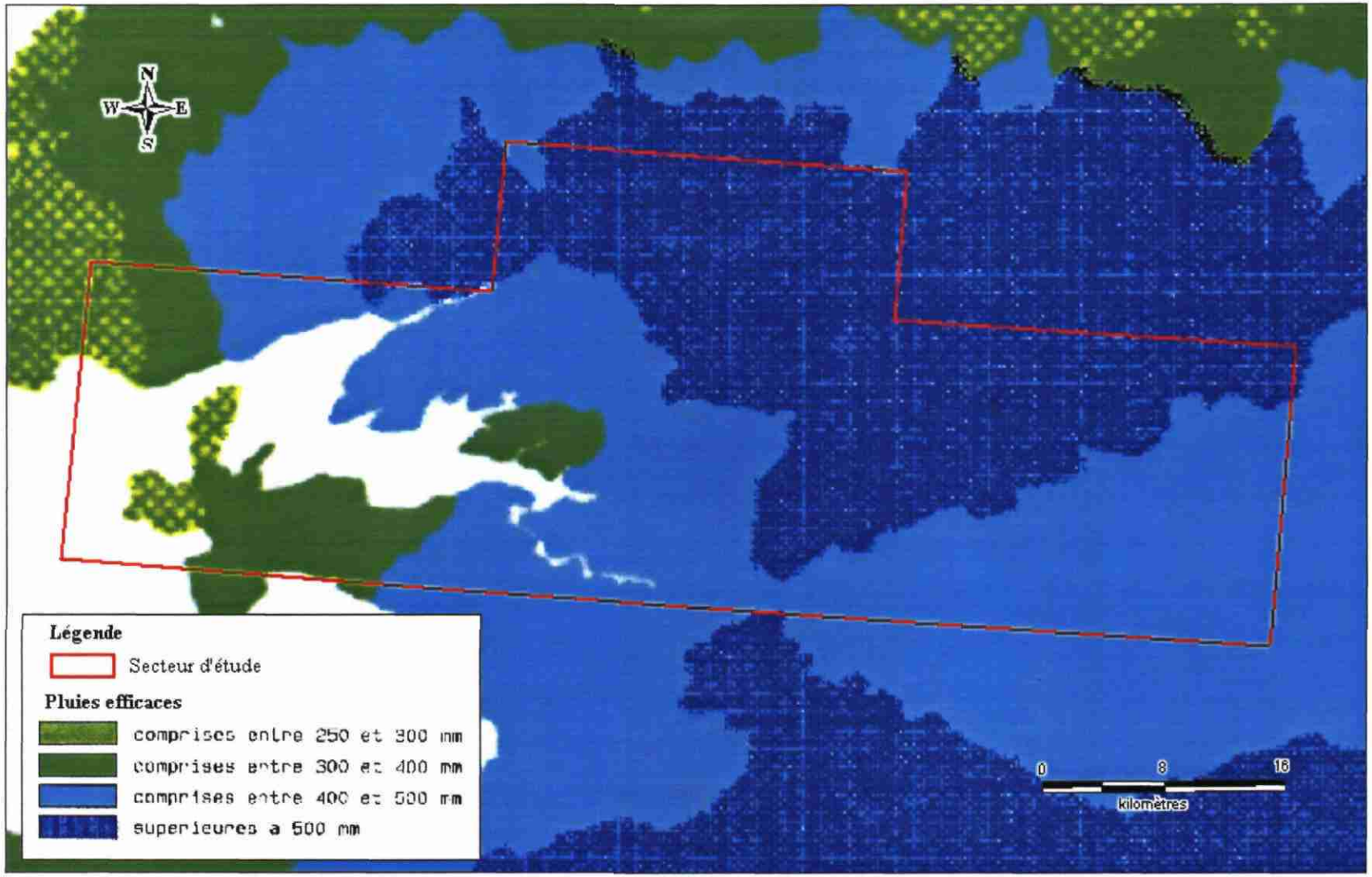


Fig. 16 - Précipitations efficaces moyennes annuelles (1946-1976)

Une modélisation globale effectuée, au moyen du logiciel Gardénia développé par le BRGM, sur les bassins versants de l'Elorn et de l'Aulne, de géologie et morphologie comparables à celles de la zone étudiée (rapport BRGM/RP-51032-FR) a permis de déterminer la part ruisselée et la part infiltrée de la pluie efficace : la part infiltrée représente 347,5 mm sur le bassin de l'Elorn et 297 mm sur celui de l'Aulne, ce qui confirme l'ordre de grandeur précédent.

L'intégration des volumes d'eau par unité de surface sur l'ensemble des mailles valorisées (1 318 km²) permet de calculer la lame d'eau moyenne stockée dans l'aquifère : celle-ci est de l'ordre de 298 mm pour l'ensemble de l'horizon fissuré et des altérites.
En considérant la pluie efficace moyenne égale à 300 mm, et une lame d'eau estimée sur les 1 600 km² à environ 360 mm, la hauteur d'eau représenterait un peu plus d'une année d'infiltration moyenne (exactement 1 an et 2 mois).
En gardant le même raisonnement, la répartition de la réserve totale (393 millions de m^3) par carte géologique a été calculée (cf. tableau 7). La hauteur d'eau moyenne est comparée à l'infiltration moyenne.

	Hauteur d'eau moyenne (m)	Volume d'eau souterraine (m^3)*	Pluie efficace moyenne (mm)	Estimation pluie infiltrée moyenne (mm)	Nombre de mois d'infiltration
Brest	0,263	48 459 862	381	240	13
Le Faou	0,238	101 084 518	477.5	300	9.5
Huelgoat	0,253	105 745 244	493.5	310	10
Landerneau Sud	0,446	111 390 626	541	340	16

Tabl. 7 - Répartition de la réserve en eau souterraine par carte géologique

(*) Le total obtenu est inférieur à 393 millions de m^3 car le calcul de la lame d'eau totale s'est poursuivi légèrement au-dessus de la carte Landerneau-Sud.

Le tableau 7 montre que la réserve d'eau souterraine est répartie principalement au Nord du secteur (la demi-carte de Landerneau totalise un peu plus que les quantités des cartes de Huelgoat et du Faou ; la moindre quantité de Brest vient d'une zone terrestre moins importante) et qu'elle met davantage de temps à se constituer par rapport au reste de la zone d'étude.

Ces résultats sont inférieurs à ceux obtenus dans des terrains majoritairement granitiques dans le Finistère nord (Wyns et al., 2002) où la réserve représentait environ 3 ans d'infiltration efficace.

La lame d'eau moyenne égale 298 mm paraît faible par rapport au secteur de Plabennec (Wyns et al., 2002).
Ceci s'explique par une surface piézométrique qui se trouve en position basse dans l'aquifère d'altération, en raison d'une part de l'érosion importante des profils, et d'autre part du relief plus accentué.
Par ailleurs, le secteur de la rade de Brest est renseigné par des formations sédimentaires moins riches en eau que les formations plutoniques de Plabennec ; le cas extrême étant les quartzites, roches non altérables, qui ont un aquifère d'altération très peu épais.

6. Utilisations des cartes

6.1. UTILISATION DES CARTES POUR LA RECHERCHE DES EAUX SOUTERRAINES EN VUE DE LEUR EXPLOITATION

6.1.1. Mise en évidence de zones favorables

Un des buts de ce projet est de rechercher, dans le périmètre de la zone d'étude sur le bassin de la rade de Brest, les régions les plus favorables à la recherche d'eau souterraine, après avoir identifié la structure des aquifères.

Le rapport de fin de phase 1 de ce projet (BRGM/RP-51031-FR) avait permis de réaliser une étude statistique, à partir des données de forages d'eau disponibles, pour caractériser l'intérêt hydrogéologique des formations géologiques.
Ce rapport mettait en évidence l'intérêt des aquifères situés :

- dans les formations situées à proximité de la faille de l'Elorn : Gneiss de Brest, Micaschistes du Conquet, et schistes briovériens de l'Elorn,
- au nord de la faille de l'Elorn : le granite de Kersaint grossier,
- et au sud de la faille : les Schistes et Calcaires de l'Armorique.

Les résultats statistiques des autres formations géologiques présentaient un intérêt moins important.

La répartition des réserves en eau souterraine (teneur en eau et épaisseur d'aquifère, cf. chapitre 5) et la perméabilité relative des formations géologiques, caractérisée par l'intérêt hydrogéologique des formations (cf. ci-dessus), font apparaître trois zones d'intérêt pour la recherche d'eau souterraine (cf. planche 13) :

- le granite de Kersaint grossier et les Micaschistes du Conquet, au nord de la zone d'étude,
- et les Schistes et Calcaires de l'Armorique, au centre.

Parmi les formations géologiques présentes sur la zone d'étude, ces trois formations présentent : des réserves en eau souterraine qui semblent intéressantes, des perméabilités faibles au sein des altérites et plus élevées dans l'horizon fissuré.

Les eaux souterraines de ces formations présentes au sein des altérites seront donc difficiles à mobiliser : afin d'exploiter l'eau souterraine, il faudra traverser les altérites et prélever l'eau dans l'horizon fissuré ; l'aquifère des altérites assurant la protection de l'aquifère sous-jacent et son alimentation régulière par infiltration.

6.1.2. Recommandations

Dans ce contexte de socle métamorphique et plutonique altéré, la hauteur d'eau maximale est observée dans les secteurs où le degré de préservation du profil d'altération et la position relative de la surface piézométrique permettent d'ennoyer une épaisseur maximale de l'aquifère d'altération. Cette configuration optimale est obtenue soit dans des compartiments tectoniques effondrés, soit au centre de plateaux faiblement incisés par le réseau hydrographique.

Toutefois il n'y a pas de corrélation directe entre teneur en eau des aquifères et débits : les perméabilités les plus fortes seront obtenues dans des couloirs drainants liés à des fractures tectoniques ou à des roches compétentes (filons de quartz, quartzites). C'est la conjonction entre la présence d'une structure drainante, assurant une bonne perméabilité, et une hauteur d'eau maximale dans l'aquifère d'altération (assurant une alimentation pérenne de cette structure drainante) qui devrait représenter la configuration la plus favorable à l'implantation de forages de recherche d'eau souterraine.

La recherche en eau souterraine passe donc par l'identification de ces fractures drainantes généralement subverticales qui relève des techniques classiques de prospection hydrogéologique en domaine de socle : photo-interprétation, prospection géophysique (électrique et/ou électromagnétique), prospection émanométrique par le radon par exemple.
Les meilleurs débits devraient être obtenus dans des fractures ouvertes traversant les zones de ressource en eau maximale.

6.2. UTILISATION DES CARTES POUR LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES ET DES EAUX DE SURFACE

Les cartes réalisées donnent une vision probablement correcte de la répartition spatiale des ressources en eau souterraine. Elles peuvent donc constituer un atout important dans la mise en œuvre d'une politique de protection des ressources, dans la mesure où elles permettent un zonage du territoire.

Sachant que le débit d'étiage des rivières est fourni principalement par l'écoulement de la nappe contenue dans les réservoirs de subsurface, la connaissance de la répartition spatiale des volumes d'eau stockée dans ces réservoirs constitue un progrès notable dans la compréhension des relations spatiales nappe-rivières, notamment en vue de l'amélioration de la qualité des eaux des rivières et des estuaires.

En effet, la lecture de la planche 13 permet de déduire que, parmi les aquifères présents dans les formations géologiques étudiées :

- c'est l'aquifère contenu dans les Micaschistes du Conquet qui contribue le plus aux débits d'étiage de l'Elorn,
- pour la rivière de Daoulas, c'est celui des Schistes et Calcaires de l'Armorique,
- pour la Douffine, c'est celui des formations du bassin carbonifère de Châteaulin,
- et ce sont les aquifères des formations du bassin carbonifère de Châteaulin et du granite de Huelgoat qui contribuent le plus aux débits d'étiage de l'Aulne.

Afin d'améliorer la qualité chimique de l'eau de la rivière, les mesures préventives susceptibles d'obtenir les meilleurs résultats de reconquête seront à mener principalement dans ces formations géologiques qui sont à protéger vis à vis de l'infiltration de l'eau jusqu'à la nappe.

Le rapport final du projet « Transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest » (Rapport BRGM/RP-52655-FR) mené en parallèle à cette étude, propose une autre valorisation de la carte de la réserve en eau souterraine : une cartographie de la sensibilité du sous-sol au ruissellement et à l'infiltration.

Conclusion

Ce rapport final présente la synthèse des travaux menés dans le cadre du projet « comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest ».

Au cours de la dernière année, plusieurs travaux ont été menés en parallèle :

- campagnes de réalisation de sondages RMP,
- modélisation la géométrie des réservoirs aquifères,
- reconstitution la piézométrie du secteur,
- cartographie les volumes d'eau souterraine,
- rédaction de ce rapport final.

La cartographie de la répartition spatiale des ressources en eau souterraine, acquise dans le cadre de ce projet, peut constituer un atout majeur d'une politique de protection de la qualité des nappes et des eaux de rivières.

Elle peut en outre contribuer notablement à orienter l'exploration des eaux souterraines en vue de leur exploitation dans les meilleures conditions de préservation de la qualité de la ressource.

Bibliographie

Lachassagne, P., Wyns R., Bérard P., Bruel T., Chéry L., Coutand T., Desprats J.-F., Le Strat P. (2001) - Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones - Groundwater, vol. 39, (4), p. 568-581

Legchenko A., Shushakov O. (1998) - Inversion of surface NMR data, Geophysics, Vol. 63, n°1, pp. 75-84

Legchenko A.V., Baltassat J.M., Beauce A., Makki M.A., and Al-Gaydi B.A. (1998) - Application of the surface proton magnetic resonance method for the detection of fractured granite aquifers : Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section), September 14-17, 1998, Barcelona (Spain), pp. 163-166

Louvrier M. et Margat J. (1983) - Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1946-1976) ; carte à 1/500 000 - Rapport BRGM 83 SGN 003 EAU, Orléans

Mougin B., collaboration : Blanchin R., Capdeville J-P. (2001) - Comportement hydrodynamique des roches altérées de la surface sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - BRGM/RP-51031-FR - Rapport de fin de phase 1 - 24 p., 1 tab., 10 fig., 1 annexe

Mougin B. (2001) - Transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - BRGM/RP-51032-FR - Rapport de fin de phase 1 - 47 pages, 24 figures, 8 tableaux

Mougin B. et Thomas E. (2003) - Transfert des polluants par ruissellement et écoulement souterrain sur le bassin versant de la rade de Brest (Finistère) - Rapport final - BRGM/RP-52655-FR - 42 p., 5 tab., 20 fig.

Shirov M., Legchenko A., and Creer G. (1991) - New direct non-invasive ground water detection technology for Australia: Expl. Geophys., vol. 22, pp. 333-338.

Trushkin D.V., Shushakov O.A., and Legchenko A.V. (1994) - The potential of a noise-reducing antenna for surface NMR ground water surveys in the earth's magnetic field : Geophys. Prosp., vol. 42, pp. 855-862

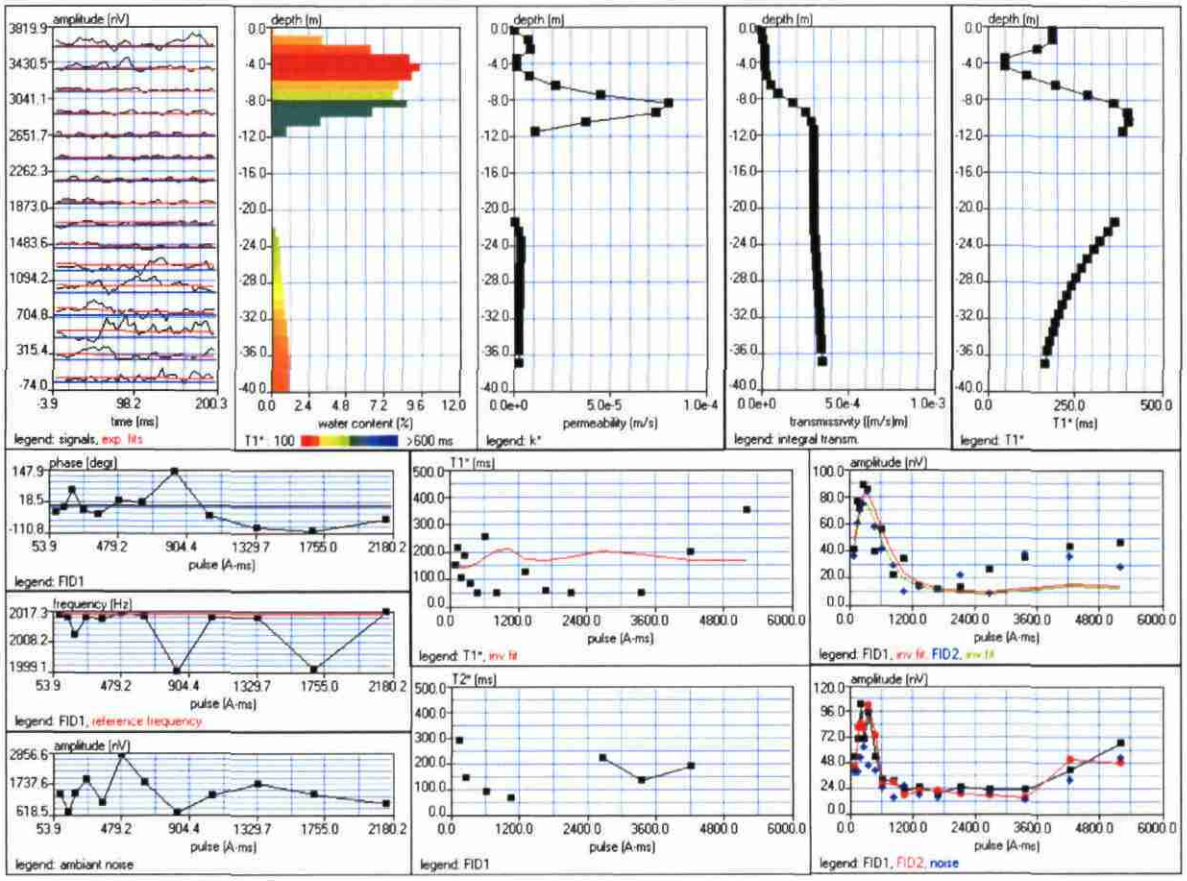
Wyns, R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J., (2004) - Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France).- Bull. Soc. Géol. Fr., t. 175, (1) (accepté)

Wyns, R. (1998) - Ressources en eau de la Margeride ouest - PRD 324 - Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin-versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central). Rapport BRGM R 40191, 18 p., 9 fig., 4 pl. hors-texte.

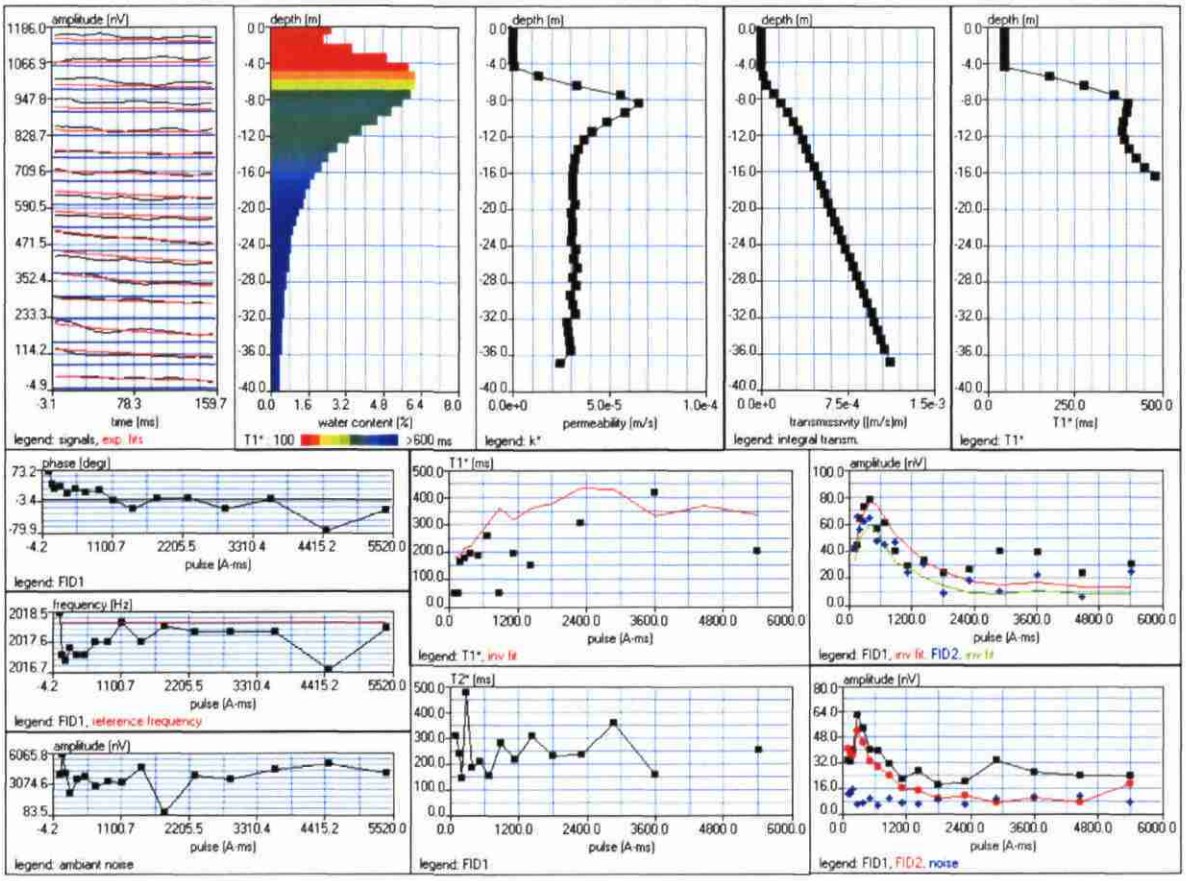
Annexe 1

Données et résultats d'interprétation des sondages RMP
Inversion automatique en quarante couches

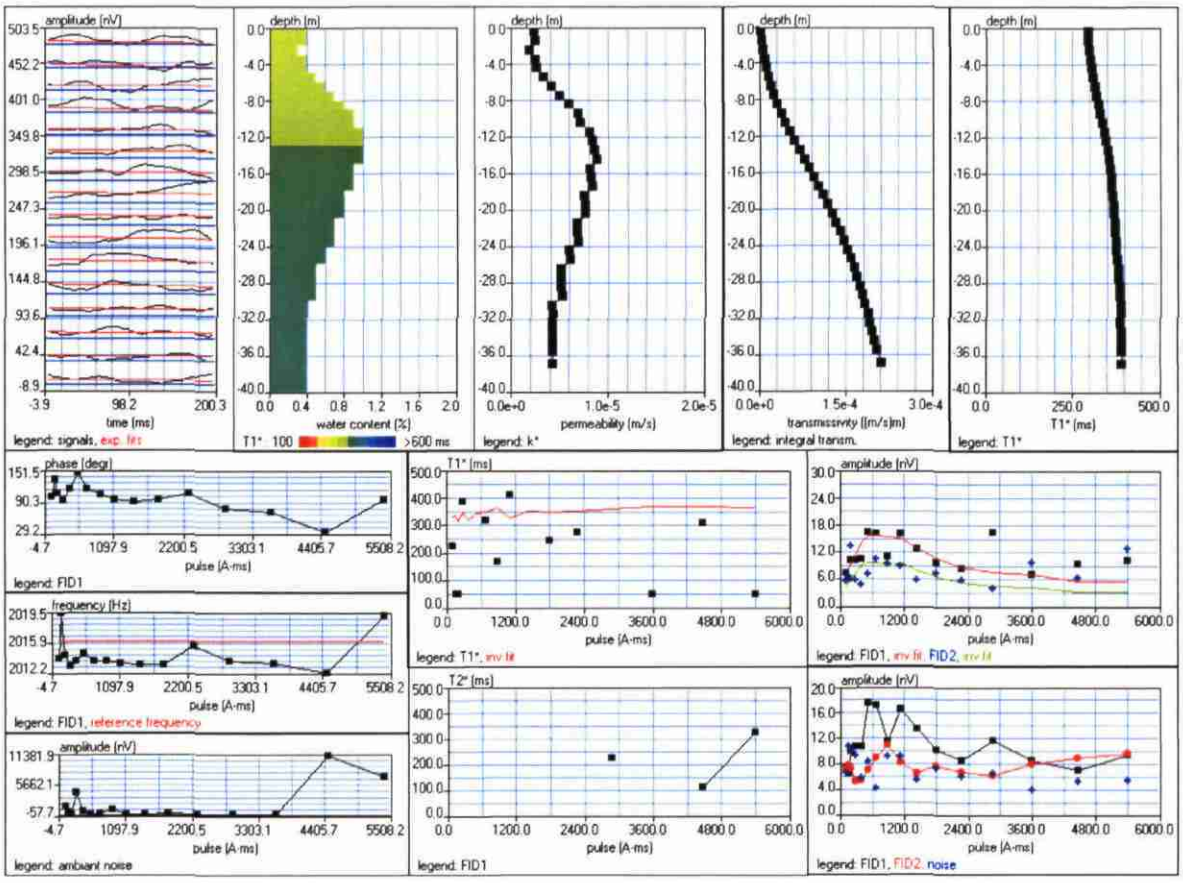
```
Site: RADE DE BREST
Date: 29.01.2002;    Time: 16:09

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd01.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Bretagn1.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47335.68 nT

filtering window =  198.4 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.47;  EN/IN =   6.38
fitting error: FID1 =  31.77%;  FID2 =  24.43 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



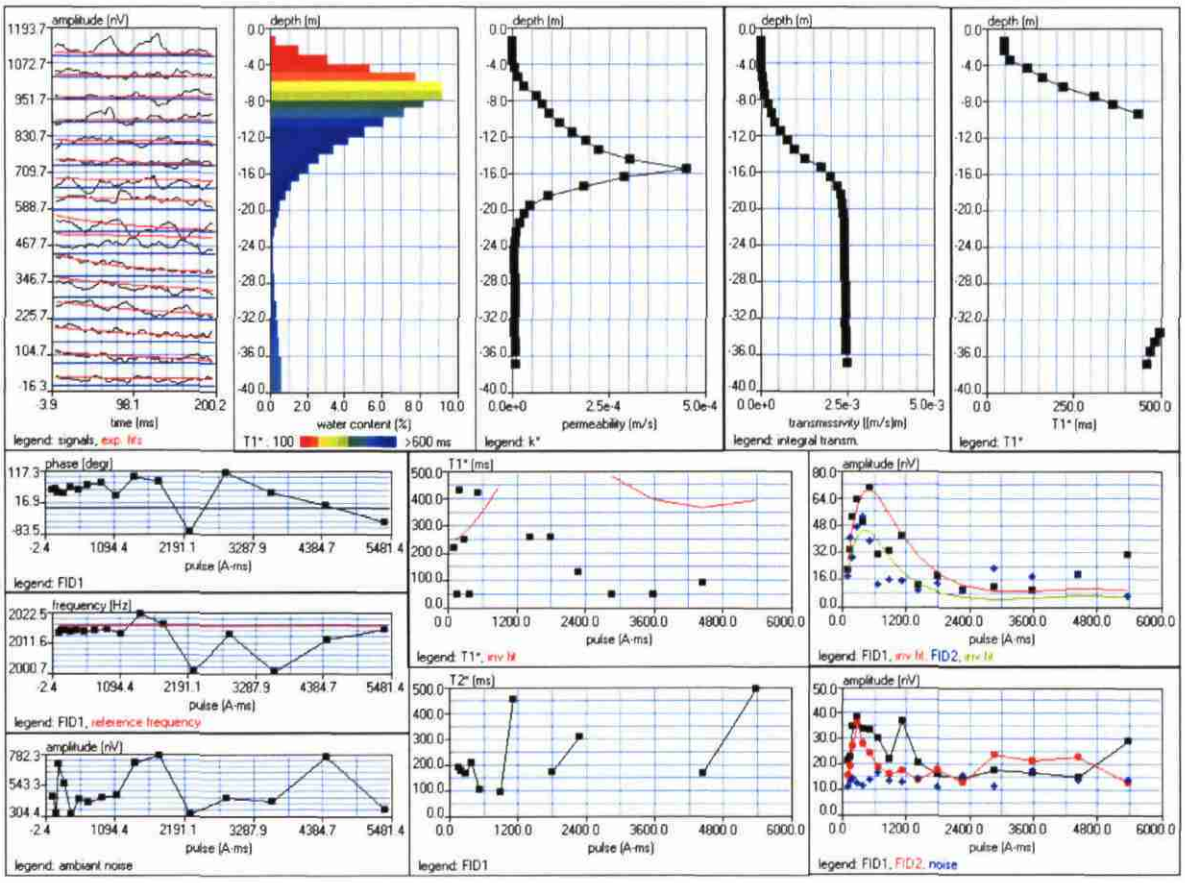
```
Site: RADE DE BREST
Date: 05.02.2002;    Time: 17:38

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd02.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window =  158.6 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   3.82;  EN/IN =   1.72
fitting error: FID1 =  25.67%;  FID2 =  23.75 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-9
```



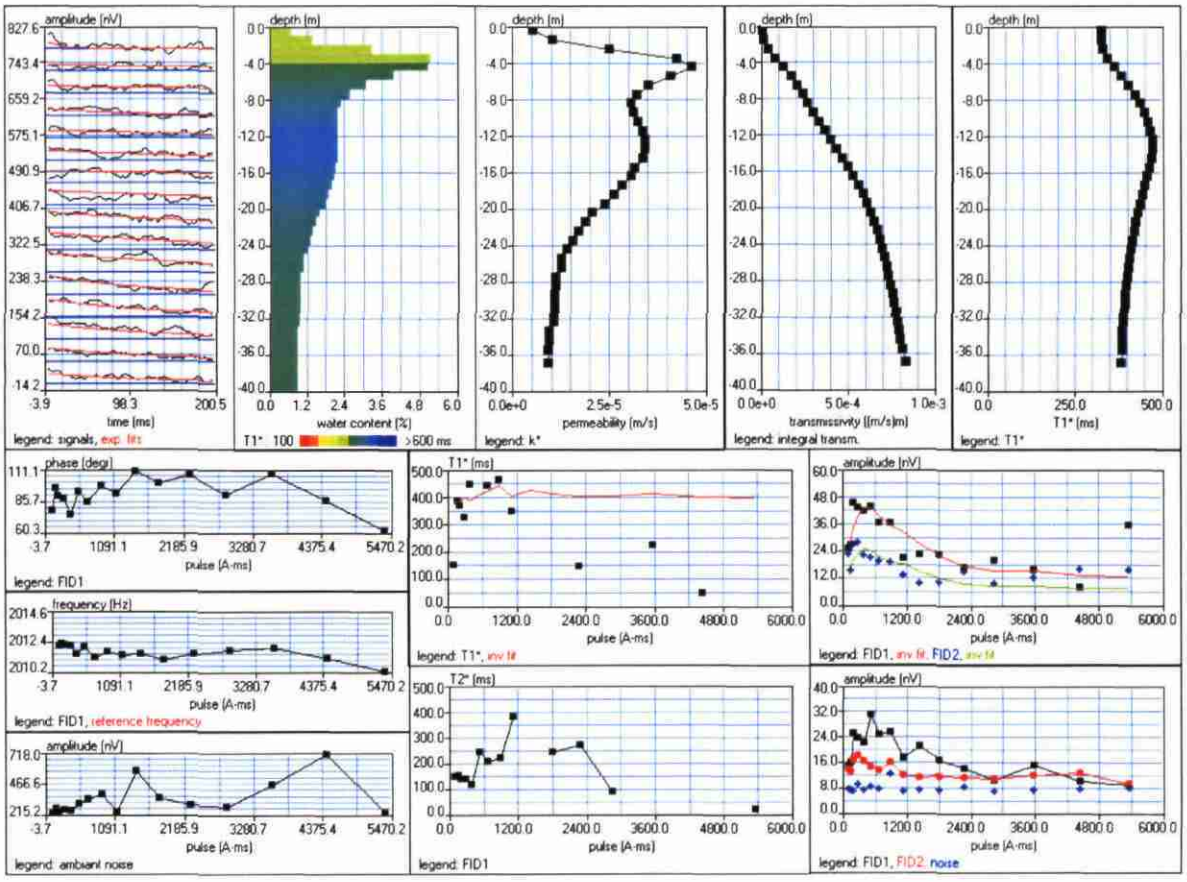
```
Site: RADE DE BREST
Date: 05.02.2002;    Time: 11:48

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd03.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47326.29 nT

filtering window =  198.4 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.58;  EN/IN =   1.41
fitting error: FID1 =  27.24%;  FID2 =  44.53 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



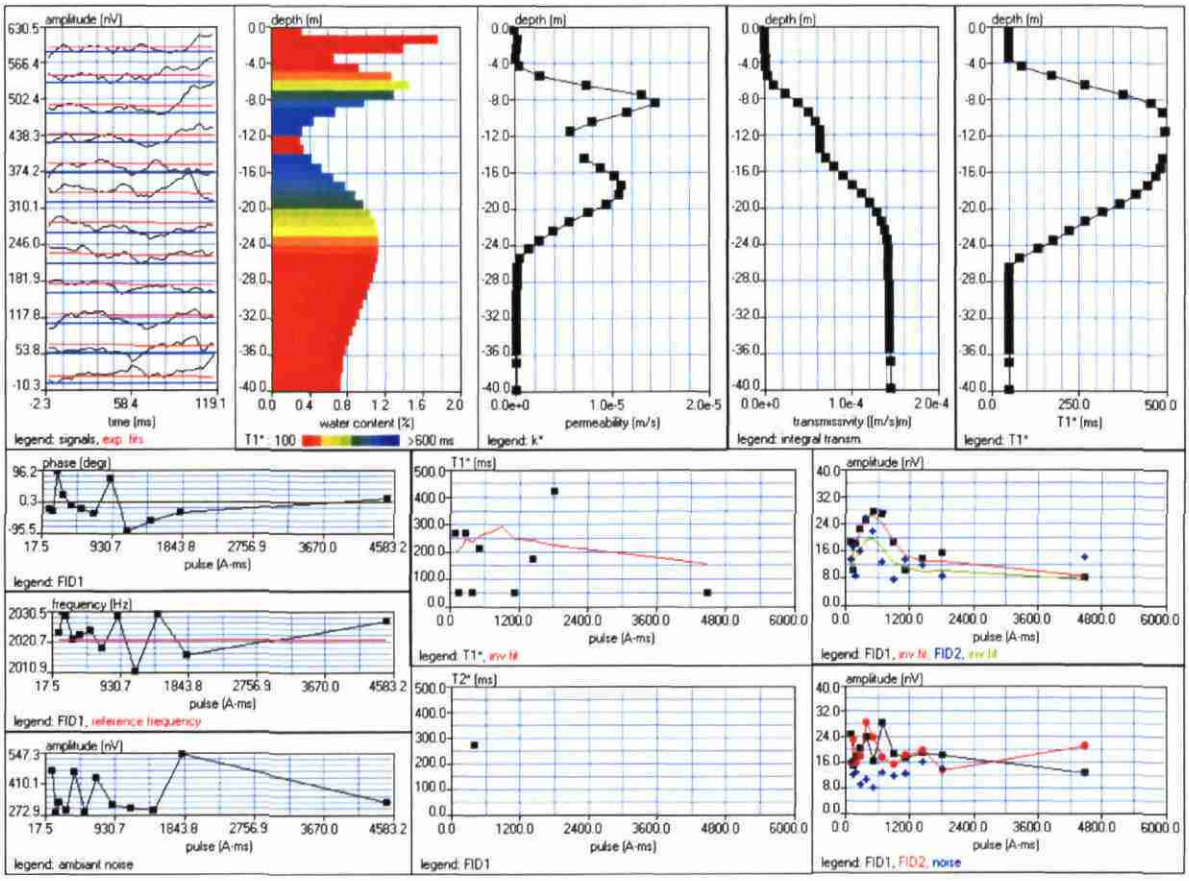
```
Site: RADE DE BREST
Date: 04.02.2002;    Time: 16:11

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd04.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47366.20 nT

filtering window =  198.2 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.89;  EN/IN =   2.66
fitting error: FID1 =  36.16%;  FID2 =  39.84 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



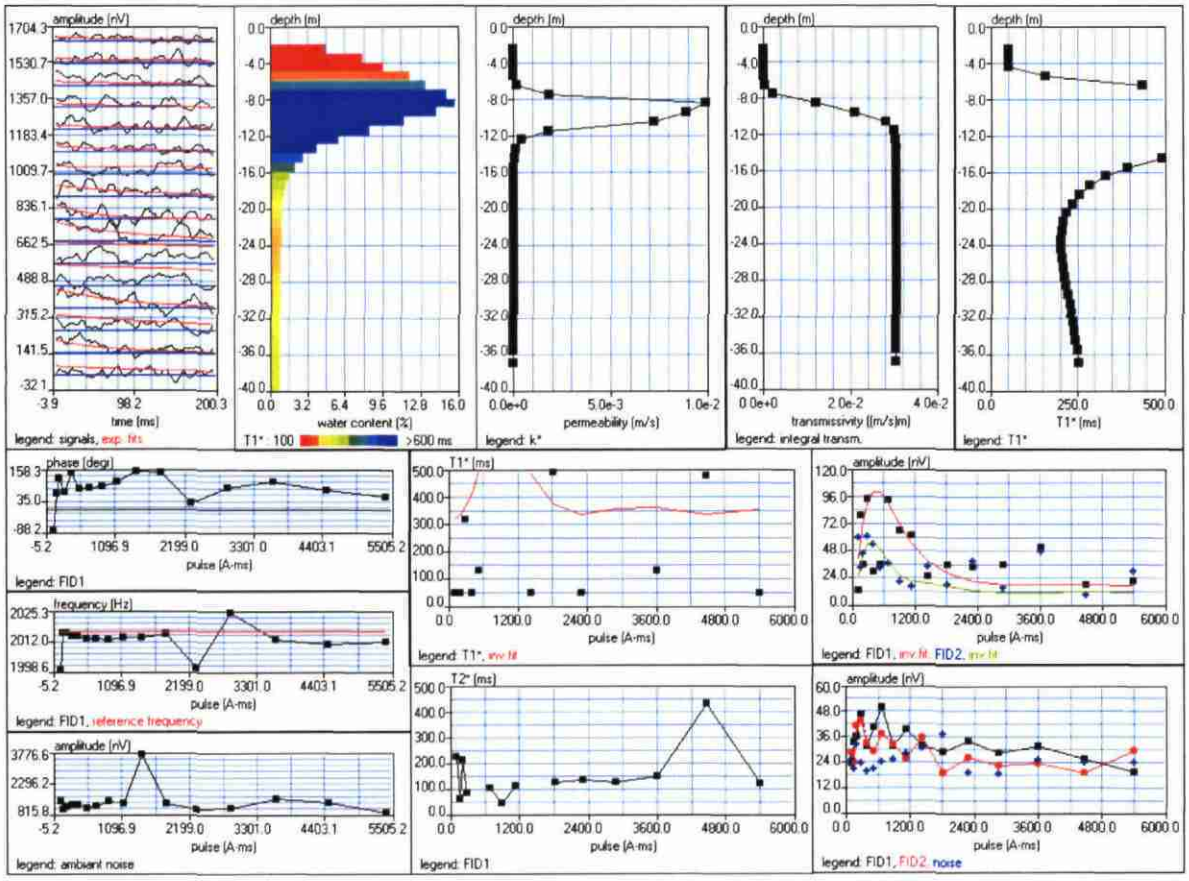
```
Site: RADE DE BREST
Date: 02.02.2002;    Time: 09:49

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd06.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47288.73 nT

filtering window =  198.6 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   2.40;  EN/IN =   1.55
fitting error: FID1 =  23.99%;  FID2 =  28.34 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



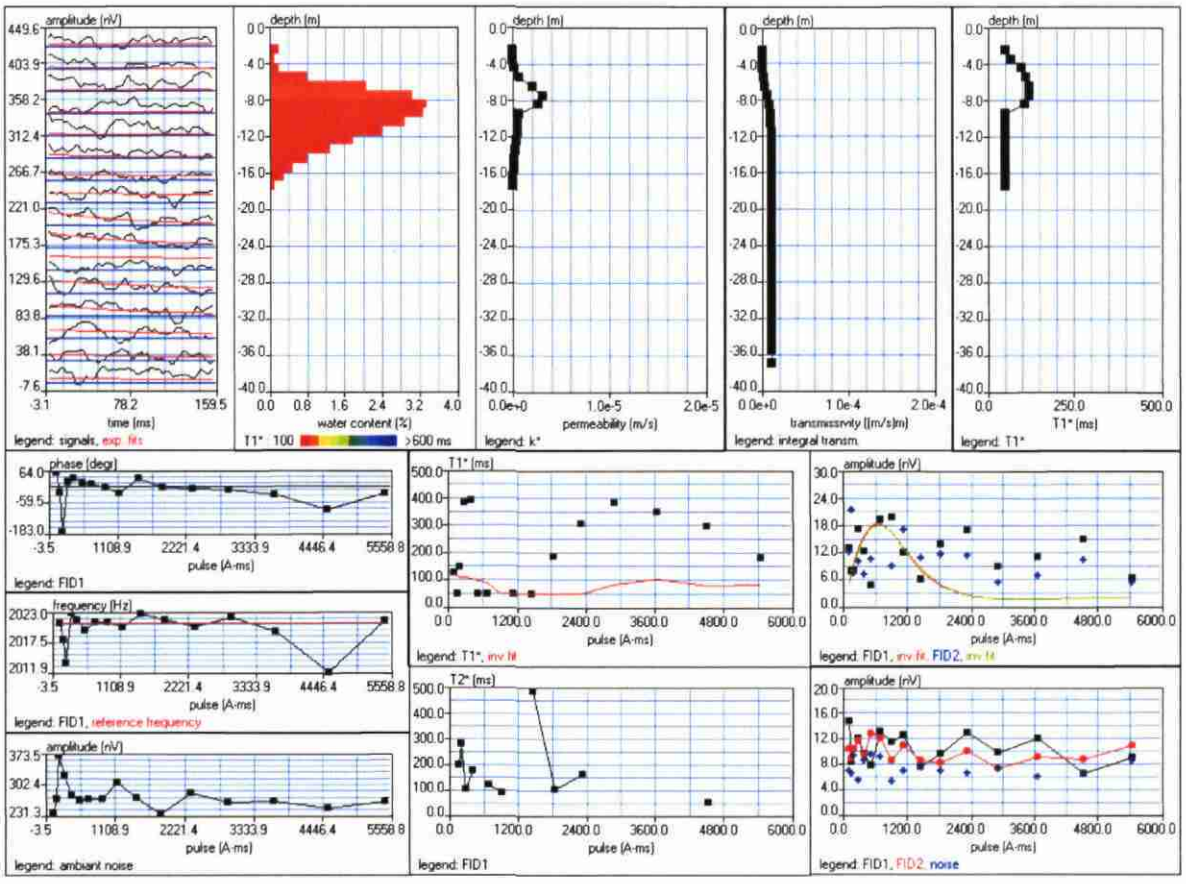
```
Site: RADE DE BREST
Date: 03.02.2002;    Time: 10:42

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd07.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47450.70 nT

filtering window =  118.7 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.59;  EN/IN =   2.44
fitting error: FID1 =  28.67%;  FID2 =  28.18 %
param. of regular.: E,T2* =  114.4;  T1* =  0.715
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



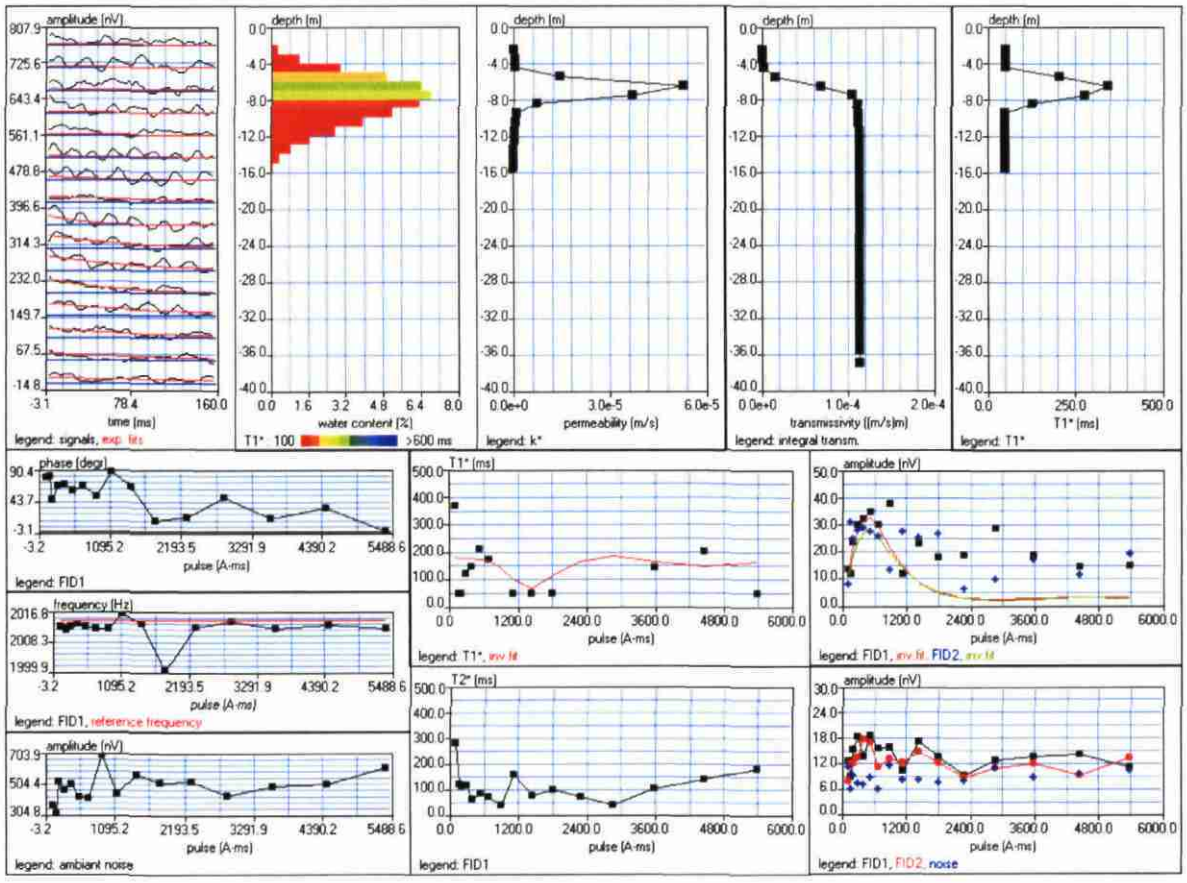
```
Site: RADE DE BREST
Date: 04.02.2002;     Time: 09:54

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd09.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47326.29 nT

filtering window =  198.4 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.34;  EN/IN =   4.97
fitting error: FID1 =  56.42%;  FID2 =  42.37 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



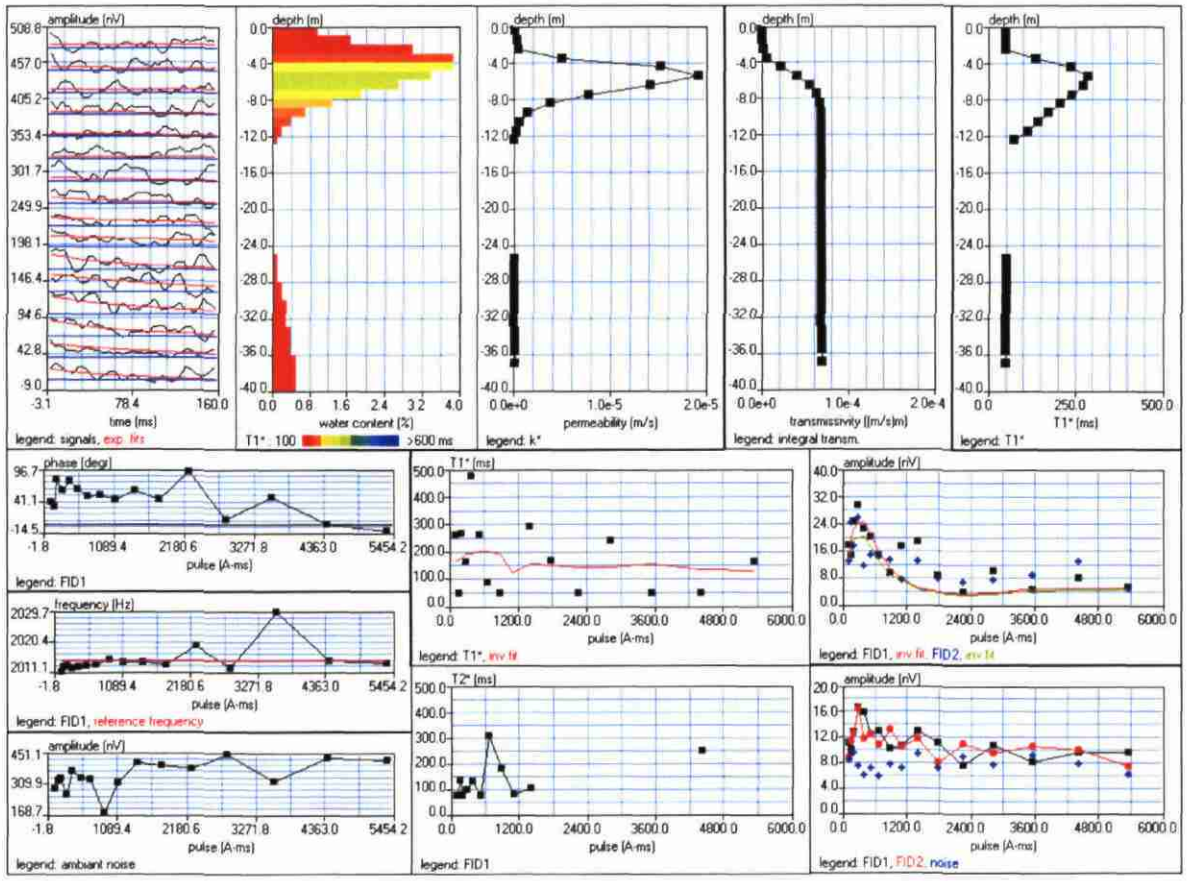
```
Site: RADE DE BREST
Date: 30.01.2002;    Time: 17:48

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd10.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window =  158.3 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.44;  EN/IN =   1.46
fitting error: FID1 =  58.38%;  FID2 =  54.66 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



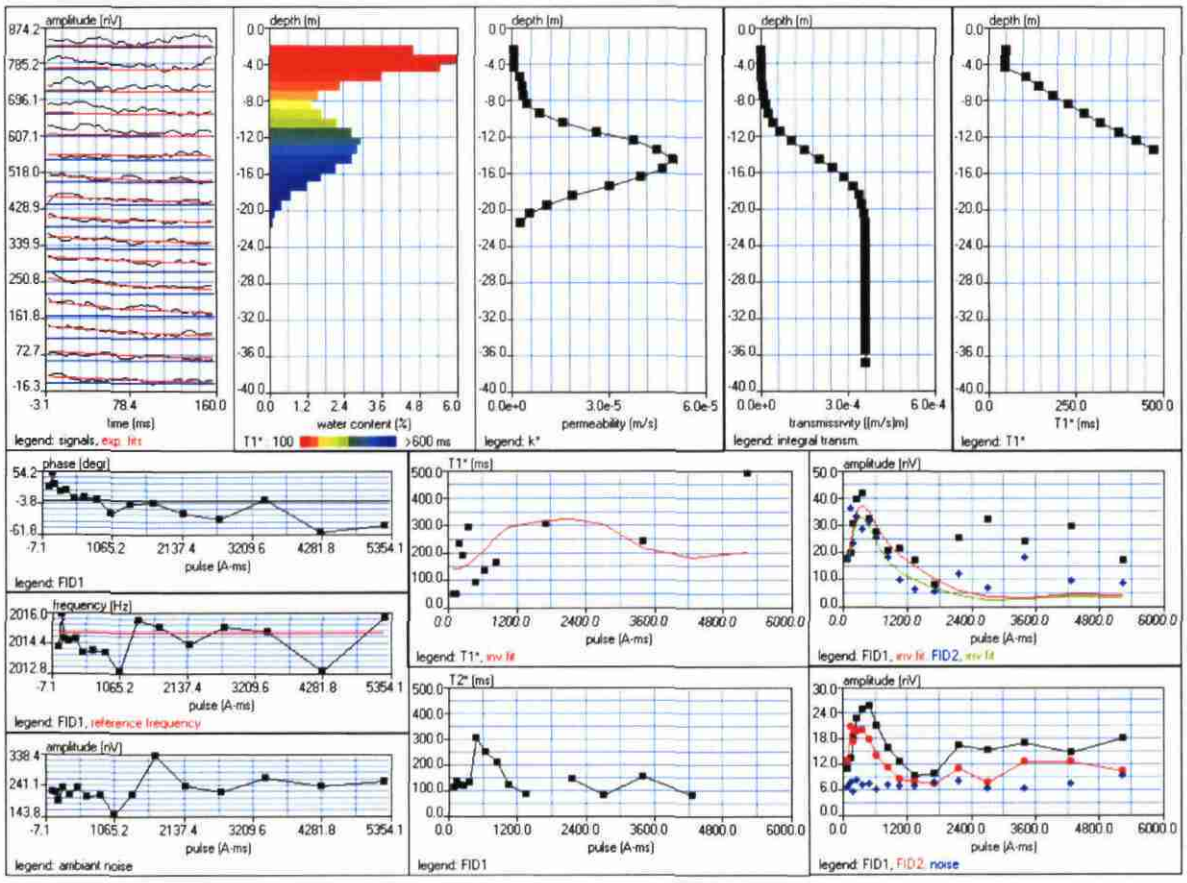
```
Site: RADE DE BREST
Date: 02.02.2002;    Time: 17:34

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd11.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47288.73 nT

filtering window =  158.8 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.60;  EN/IN =   1.72
fitting error: FID1 =  48.05%;  FID2 =  49.46 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



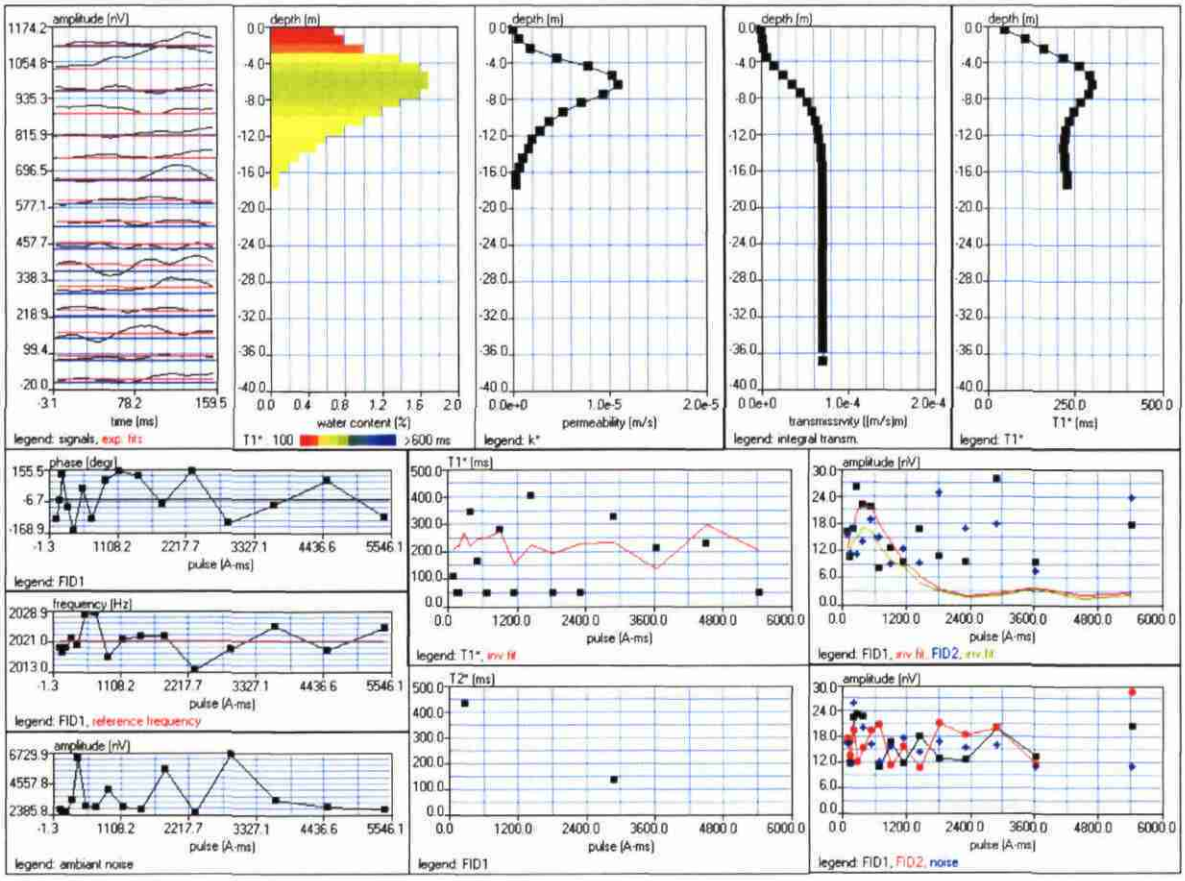
```
Site: RADE DE BREST
Date: 01.02.2002;    Time: 16:54

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd12.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47288.73 nT

filtering window =  158.8 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.47;  EN/IN =   1.55
fitting error: FID1 =  32.02%;  FID2 =  36.02 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



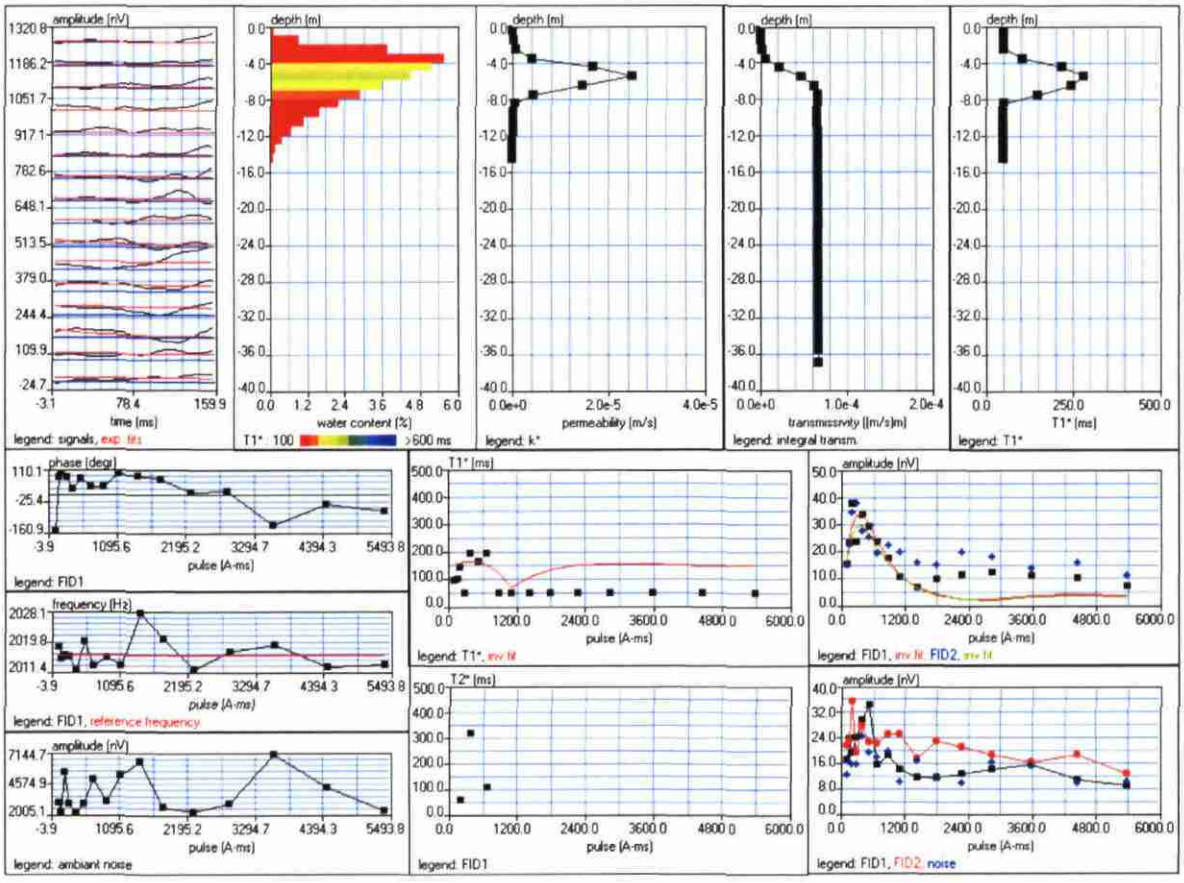
```
Site: RADE DE BREST
Date: 16.01.2002;    Time: 16:03

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd13.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47298.12 nT

filtering window =  158.8 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   2.36;  EN/IN =   1.41
fitting error: FID1 =  46.76%;  FID2 =  30.67 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



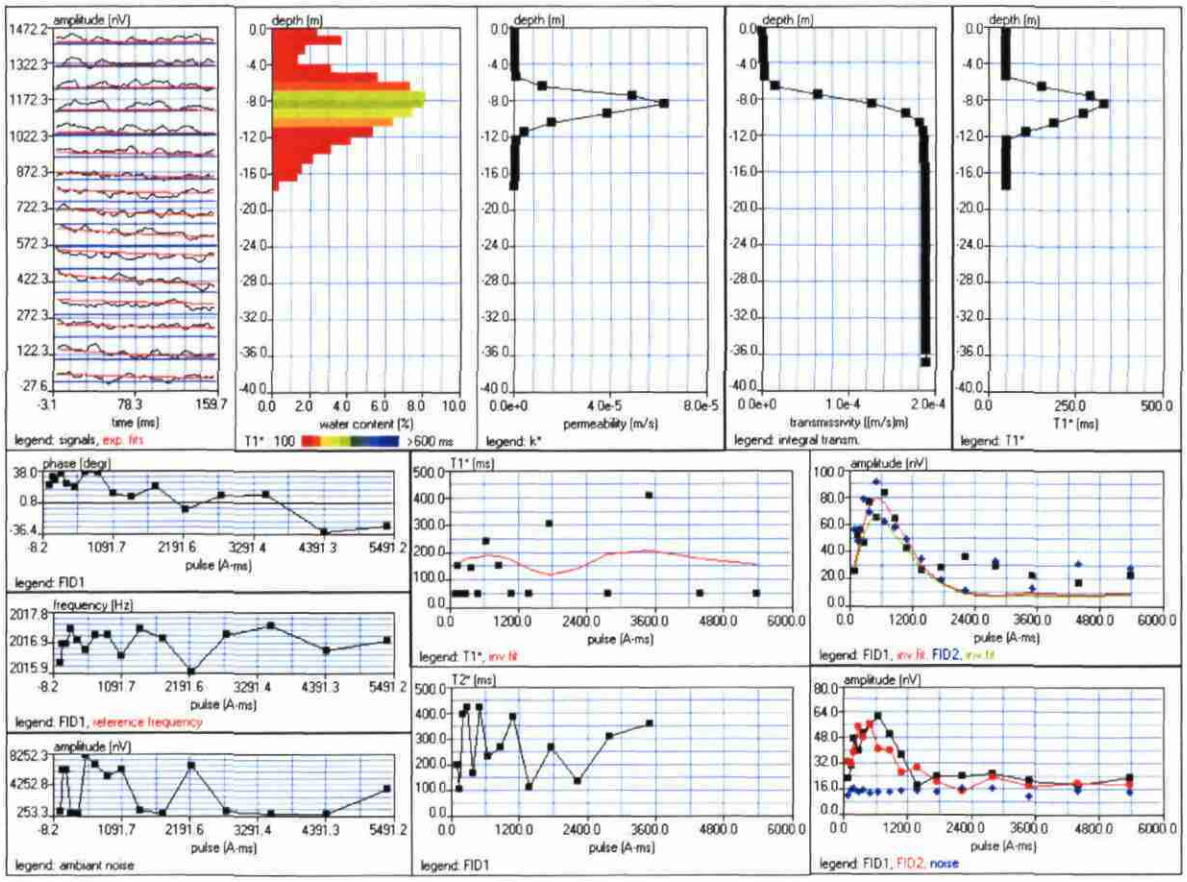
```
Site: RADE DE BREST
Date: 31.01.2002;    Time: 09:26

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd14.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window =  158.3 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.06;  EN/IN =   3.74
fitting error: FID1 =  69.27%;  FID2 =  72.91 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



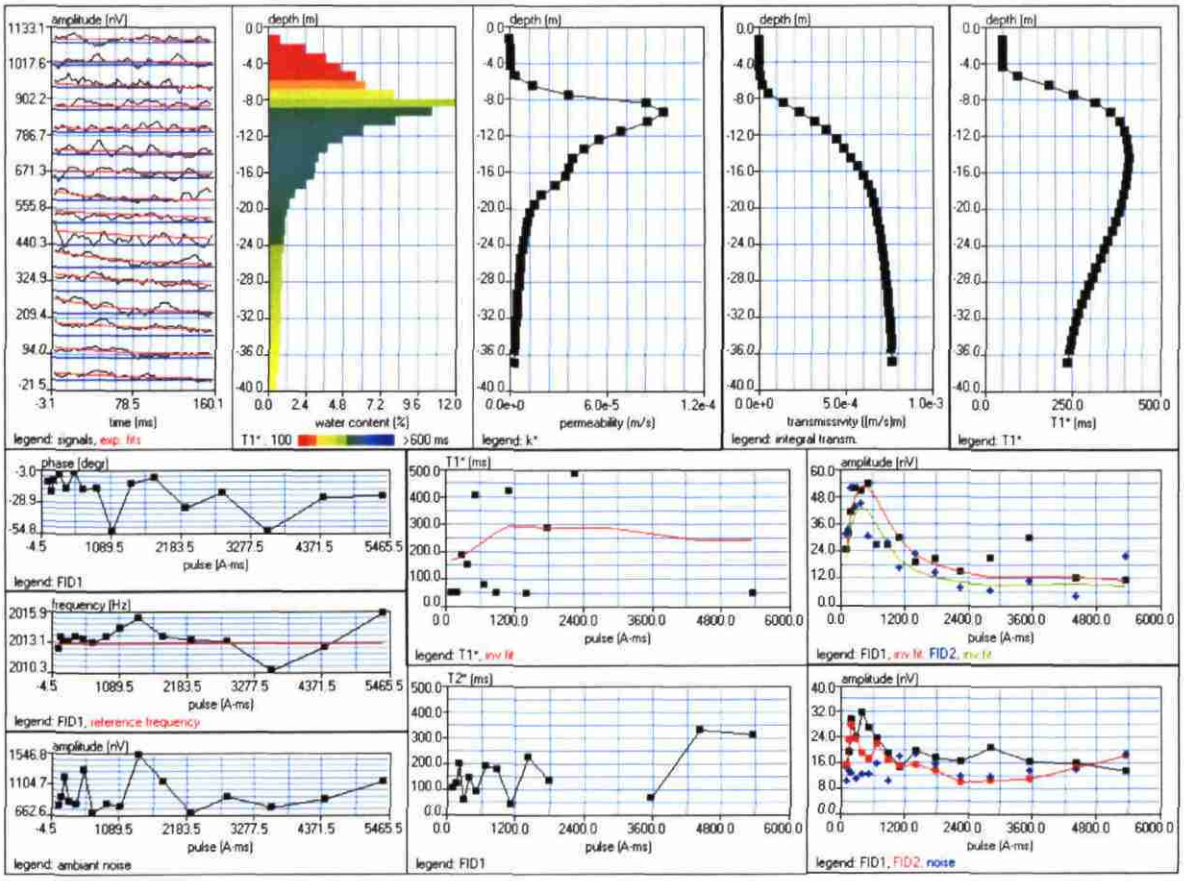
```
Site: RADE DE BREST
Date: 31.01.2002;    Time: 16:54

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd15.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47326.29 nT

filtering window =  158.7 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.17;  EN/IN =   3.00
fitting error: FID1 =  28.20%;  FID2 =  41.72 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



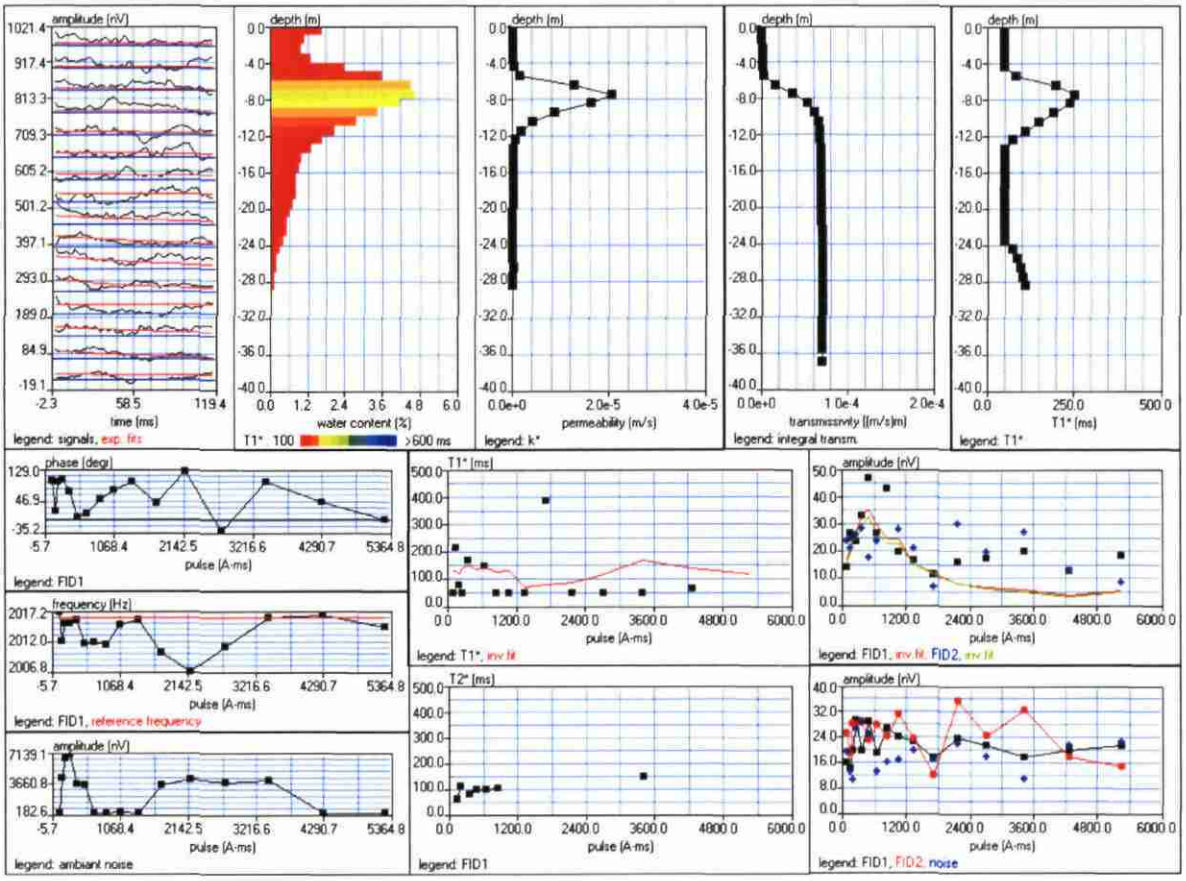
```
Site: RADE DE BREST
Date: 17.01.2002;    Time: 17:38

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd16.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47366.20 nT

filtering window =  158.6 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   2.47;  EN/IN =   2.79
fitting error: FID1 =  25.56%;  FID2 =  31.34 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



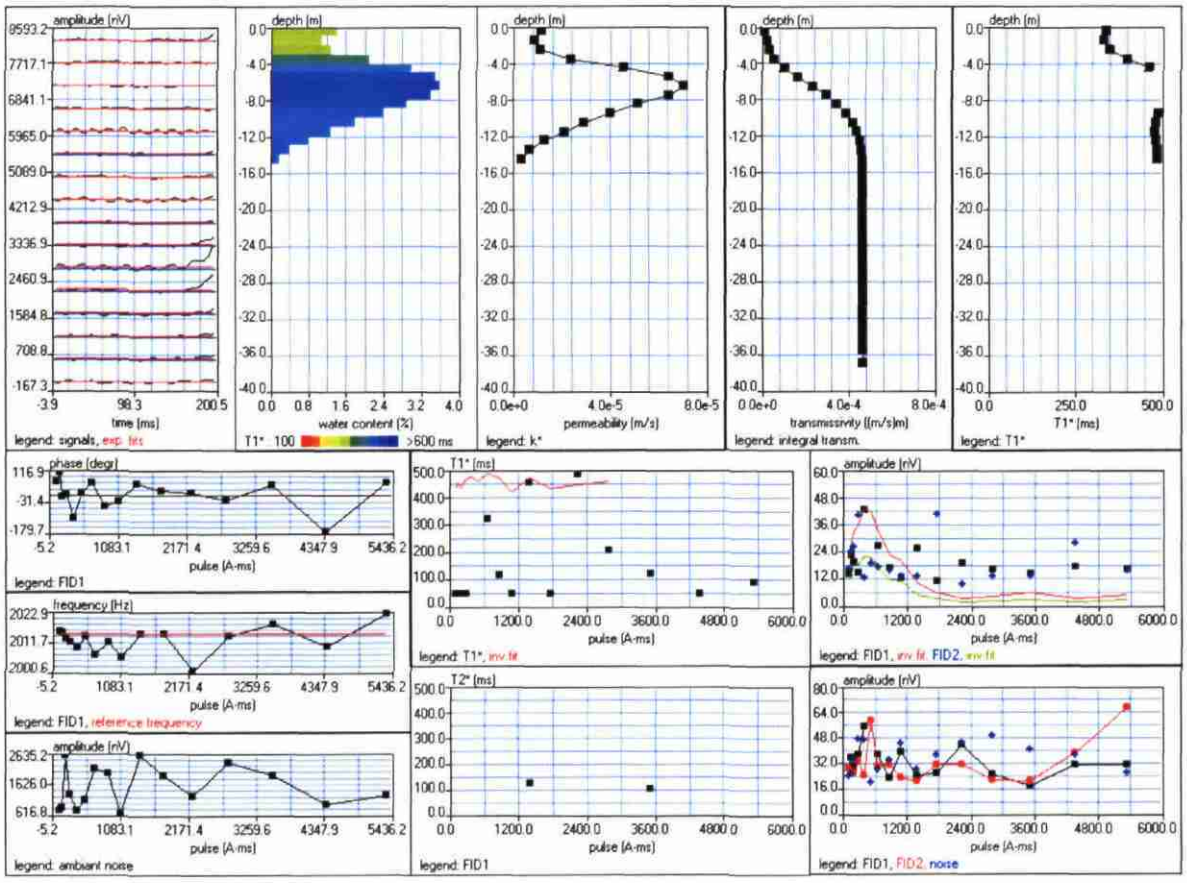
```
Site: RADE DE BREST
Date: 01.02.2002;     Time: 10:00

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd17.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47251.17 nT

filtering window =  159.0 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.49;  EN/IN =   2.72
fitting error: FID1 =  23.59%;  FID2 =  26.95 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



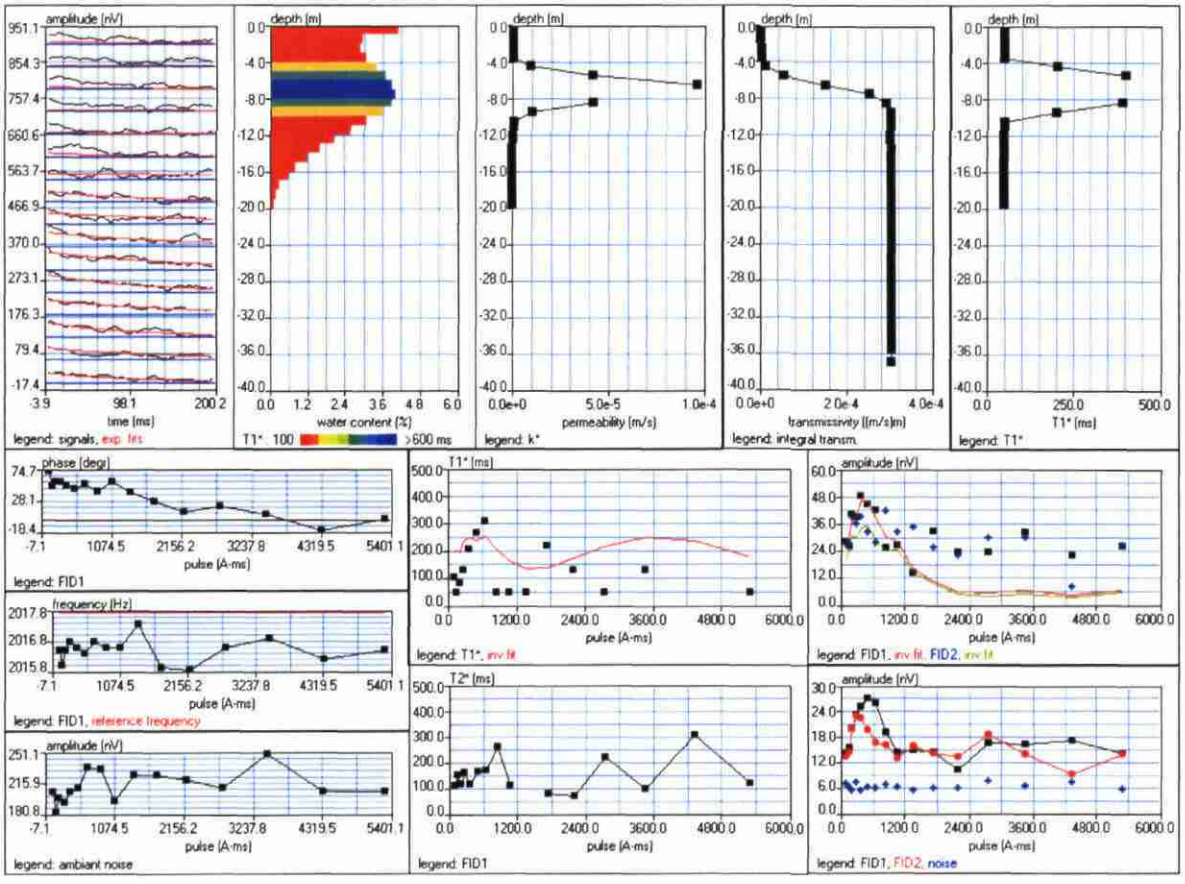
```
Site: DADE DE BREST
Date: 17.01.2002;    Time: 12:20

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd18.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47326.29 nT

filtering window =  119.0 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.14;  EN/IN =   3.74
fitting error: FID1 =  34.31%;  FID2 =  51.21 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



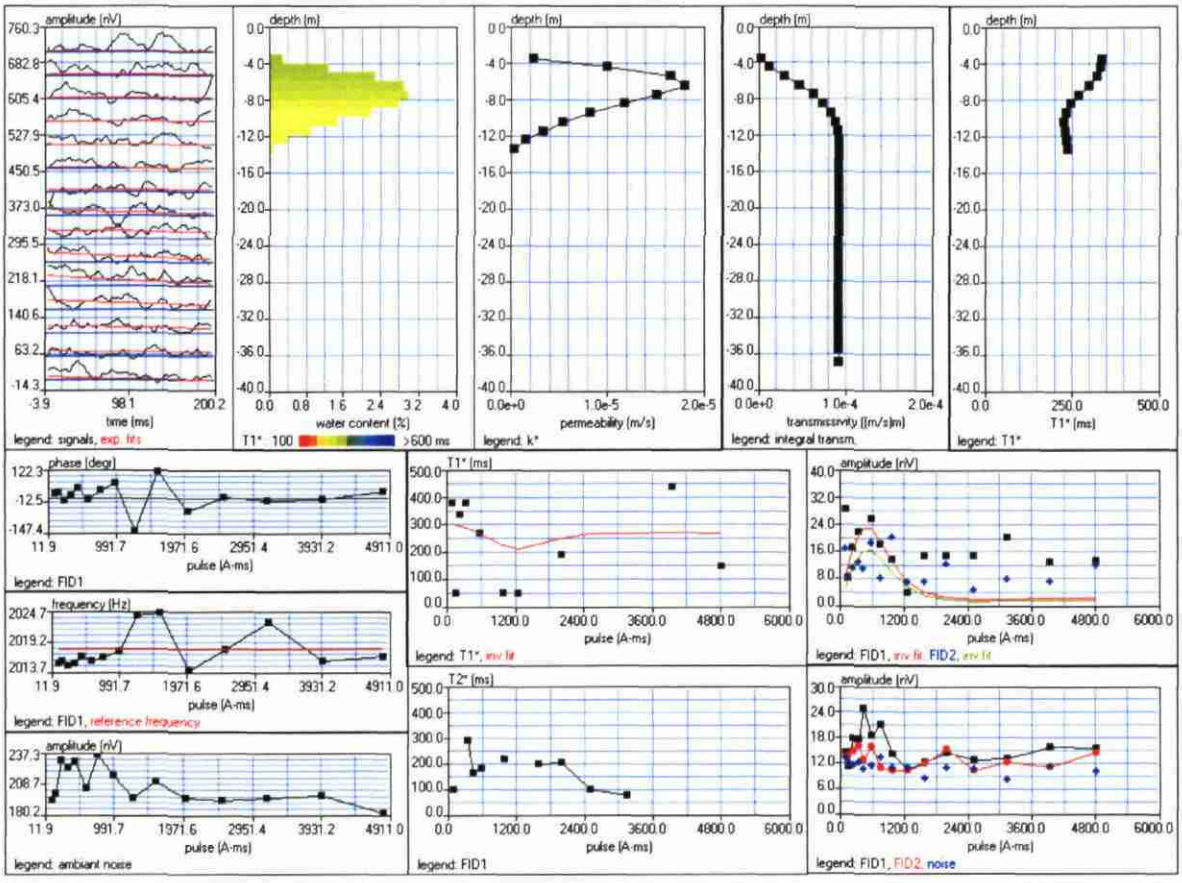
```
Site: RADE DE BREST
Date: 19.01.2002;    Time: 10:14

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd19.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47298.12 nT

filtering window =  198.5 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.03;  EN/IN =   7.09
fitting error: FID1 =  47.91%;  FID2 =  66.20 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



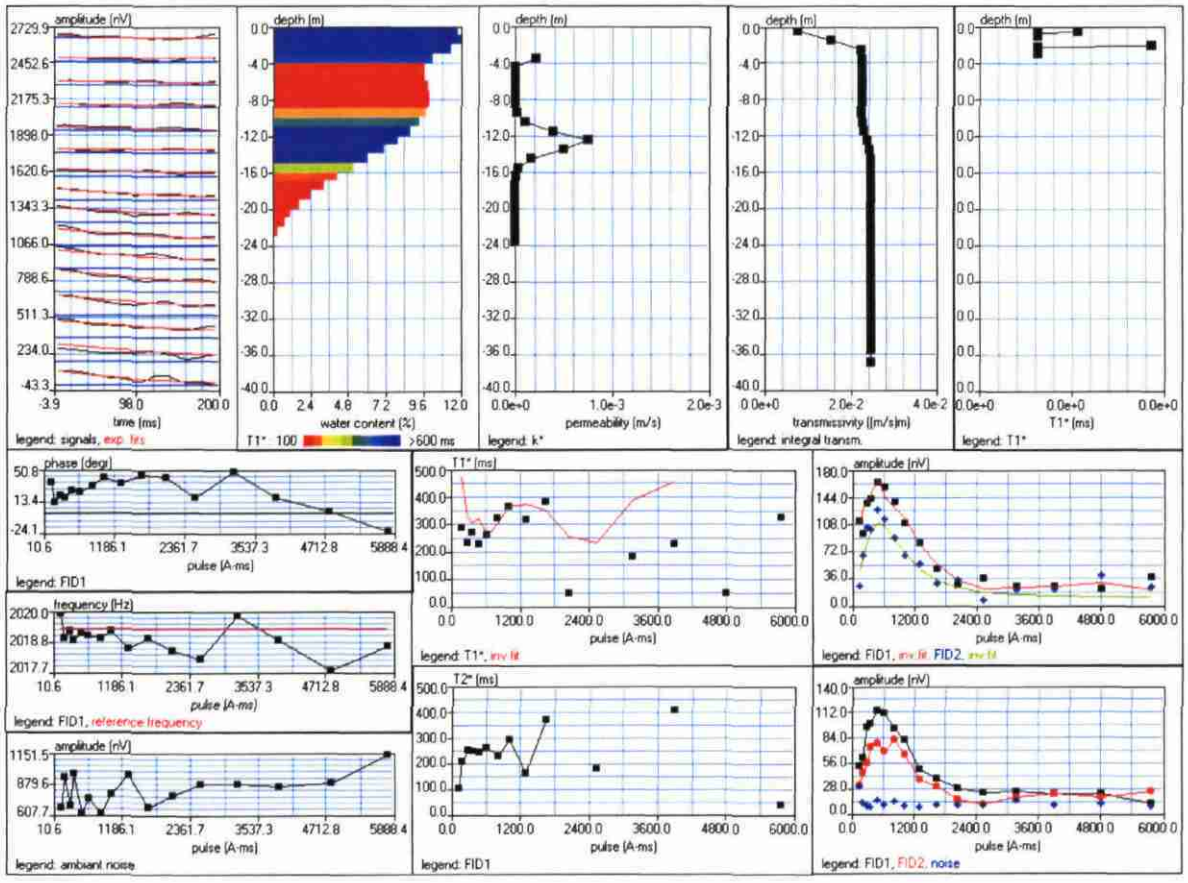
```
Site: RADE DE BREST
Date: 18.01.2002;    Time: 17:10

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd20.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47366.20 nT

filtering window =  198.2 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   2.87;  EN/IN =   1.25
fitting error: FID1 =  39.57%;  FID2 =  46.01 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



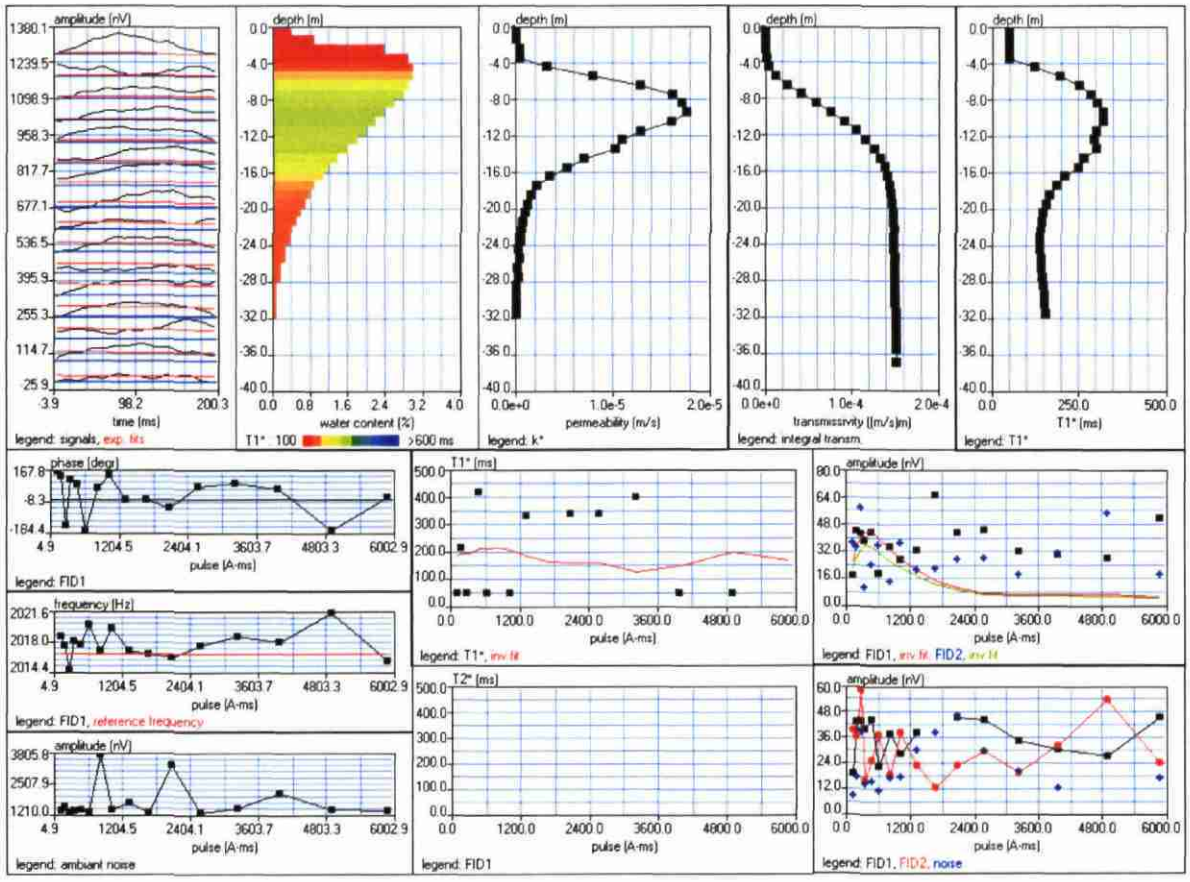
```
Site: RADE DE BREST
Loop:  4 - 37.5      Date: 06.02.2002     Time: 11:42

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd21.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47366.20 nT

filtering window =  198.2 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.42;  EN/IN =   2.19
fitting error: FID1 =  54.83%;  FID2 =  54.44 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



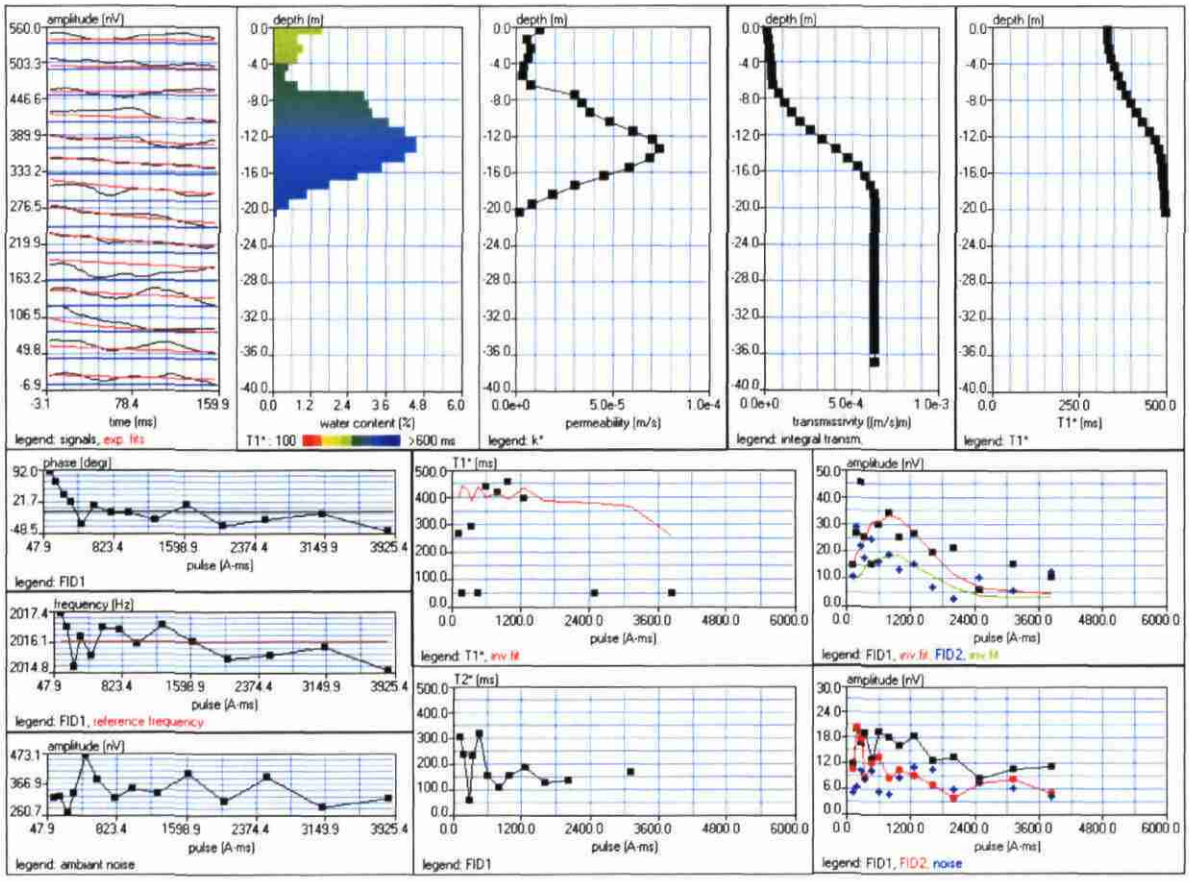
```
Site: RADE DE BREST RD22
Loop:  4 - 37.5      Date: 17.02.2003     Time: 09:19

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd22.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47403.76 nT

filtering window =  198.1 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   5.09;  EN/IN =   2.29
fitting error: FID1 =  12.21%;  FID2 =  18.15 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



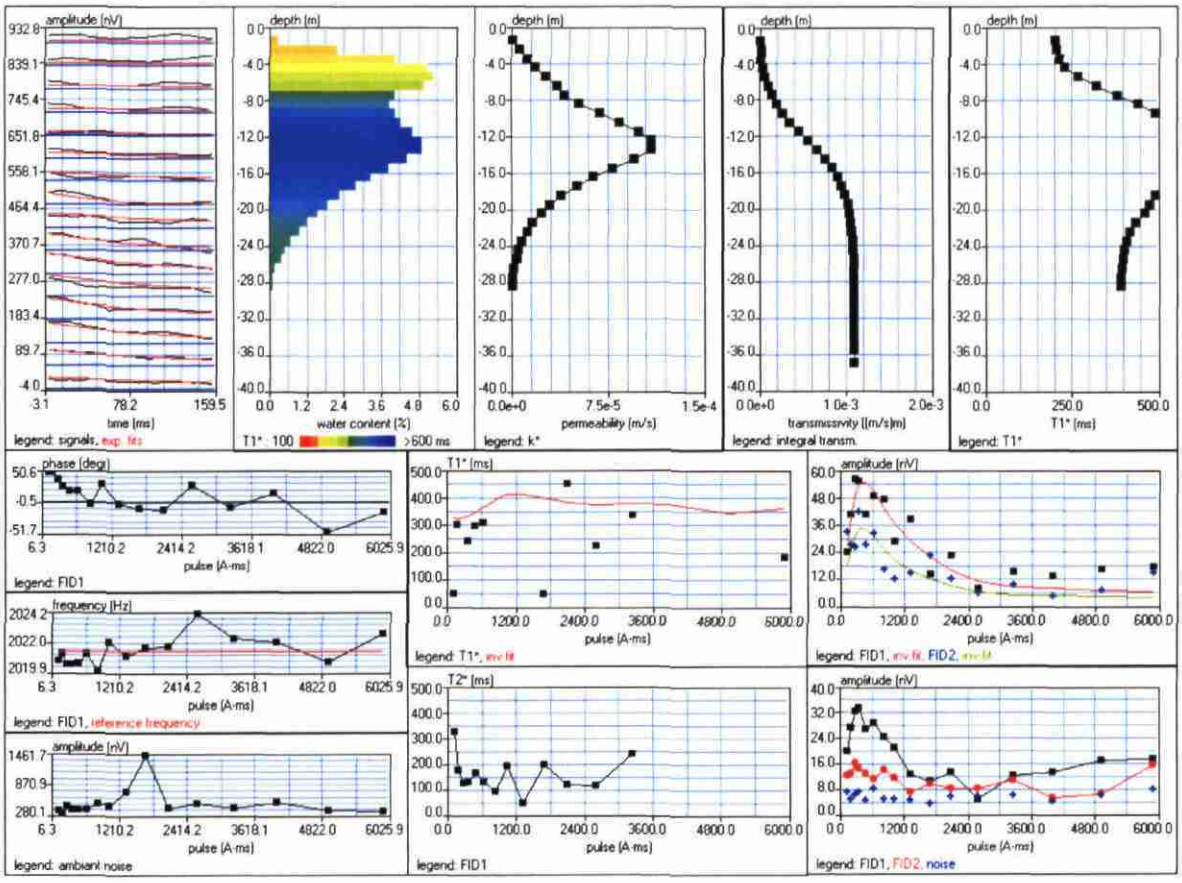
```
Site: RADE DE BREST RD23
Loop:  4 - 37.5      Date: 17.02.2003     Time: 13:26

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd23.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47335.68 nT

filtering window =  198.4 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.50;  EN/IN =   5.10
fitting error: FID1 =  62.62%;  FID2 =  61.58 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



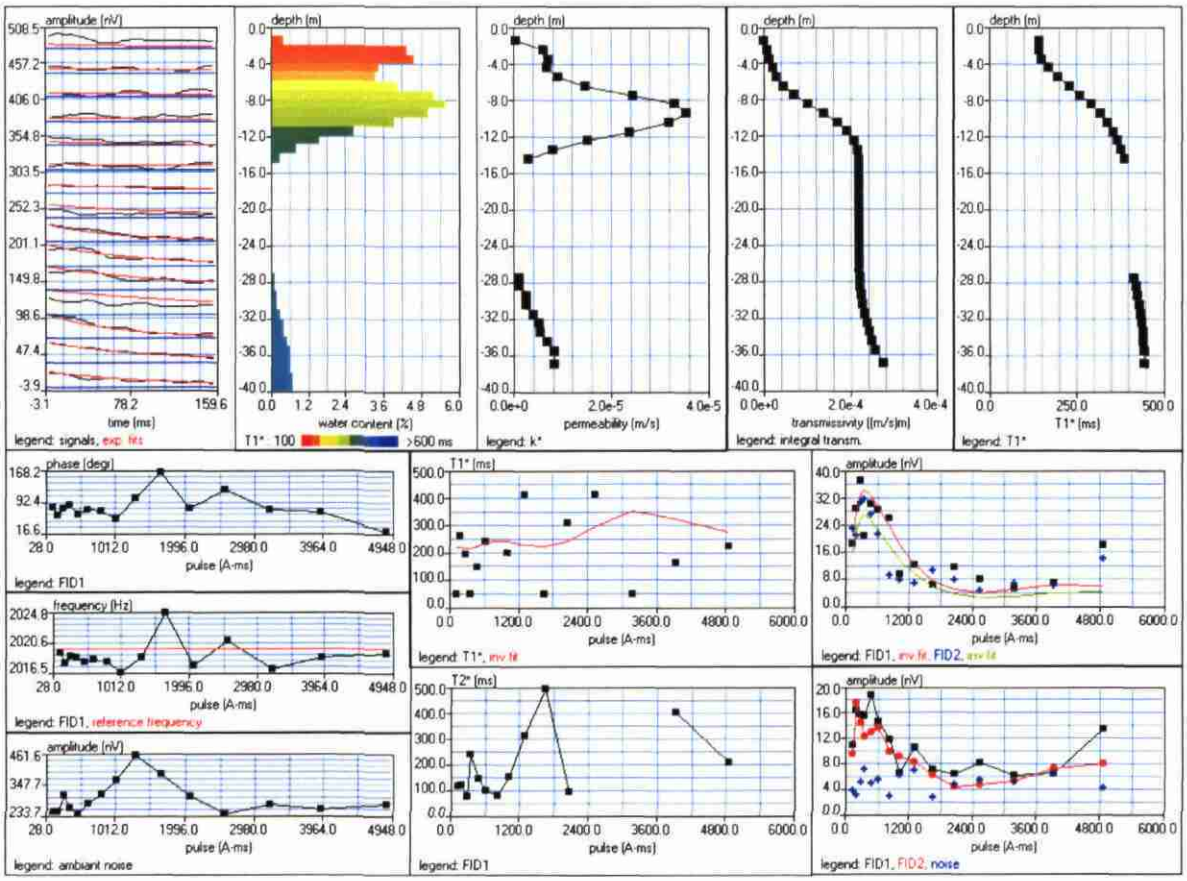
```
Site: RADE DE BREST RD24
Loop:  4 - 37.5      Date: 18.02.2003     Time: 06:54

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd24.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47326.29 nT

filtering window =  158.7 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   2.05;  EN/IN =   1.45
fitting error: FID1 =  37.00%;  FID2 =  44.26 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



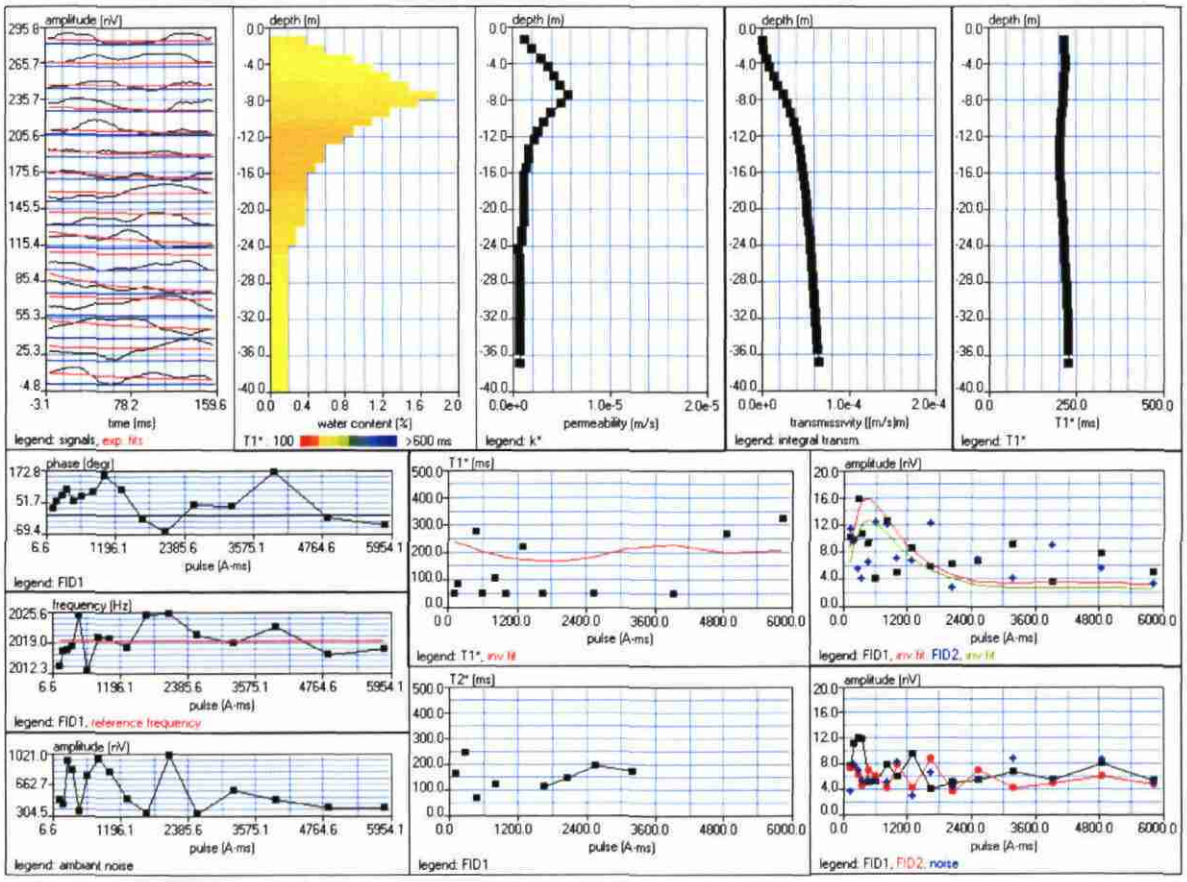
```
Site: RADE DE BREST RD25
Loop:  4 - 37.5      Date: 18.02.2003     Time: 12:16

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd25.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47450.70 nT

filtering window =  158.3 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   3.44;  EN/IN =   1.15
fitting error: FID1 =  21.01%;  FID2 =  30.88 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



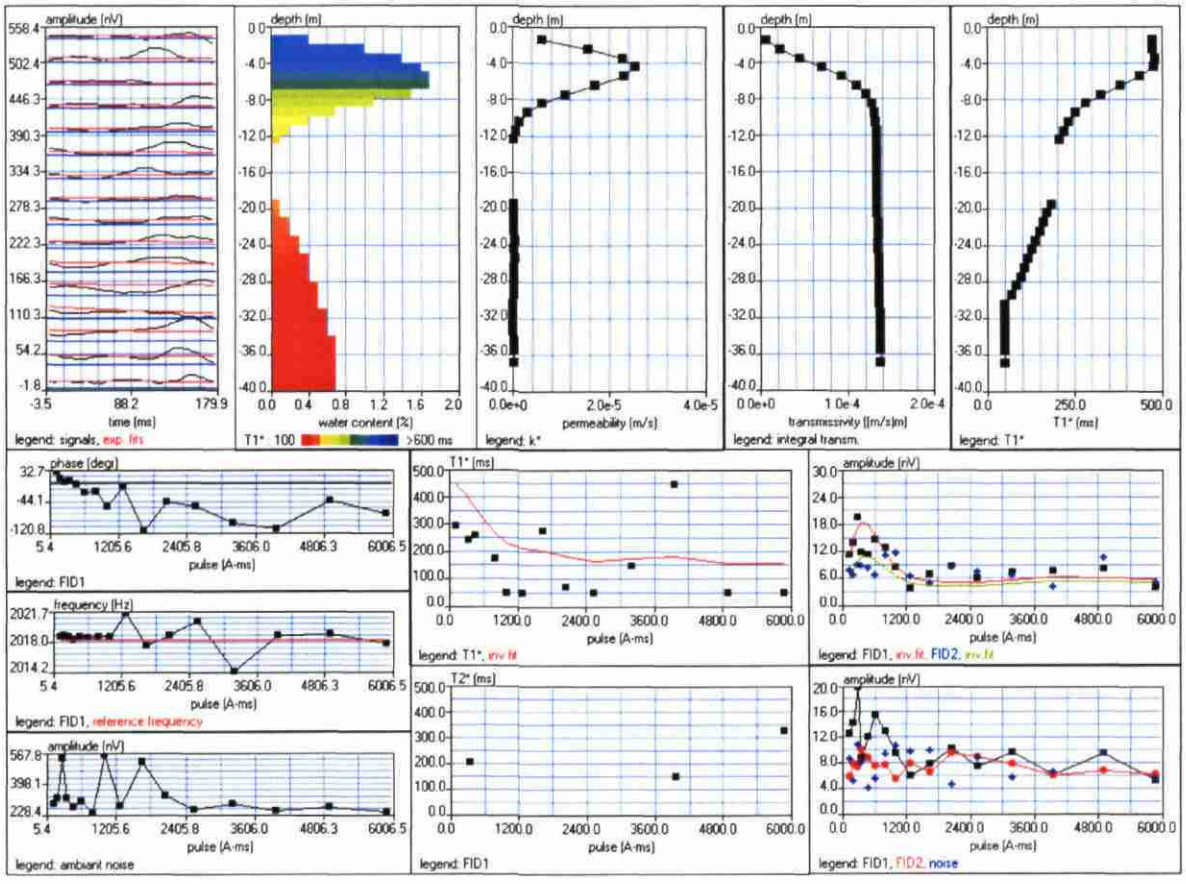
```
Site: RADE DE BREST RD26
Loop:  4 - 37.5      Date: 19.02.2003     Time: 04:29

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd26.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47413.15 nT

filtering window =  158.4 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   2.29;  EN/IN =   0.98
fitting error: FID1 =  28.37%;  FID2 =  27.81 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```



```
Site: RADE DE BREST RD27
Loop:  4 - 37.5      Date: 19.02.2003     Time: 09:28

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd27.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47403.76 nT

filtering window =  158.5 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.24;  EN/IN =   1.17
fitting error: FID1 =  49.45%;  FID2 =  51.48 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```

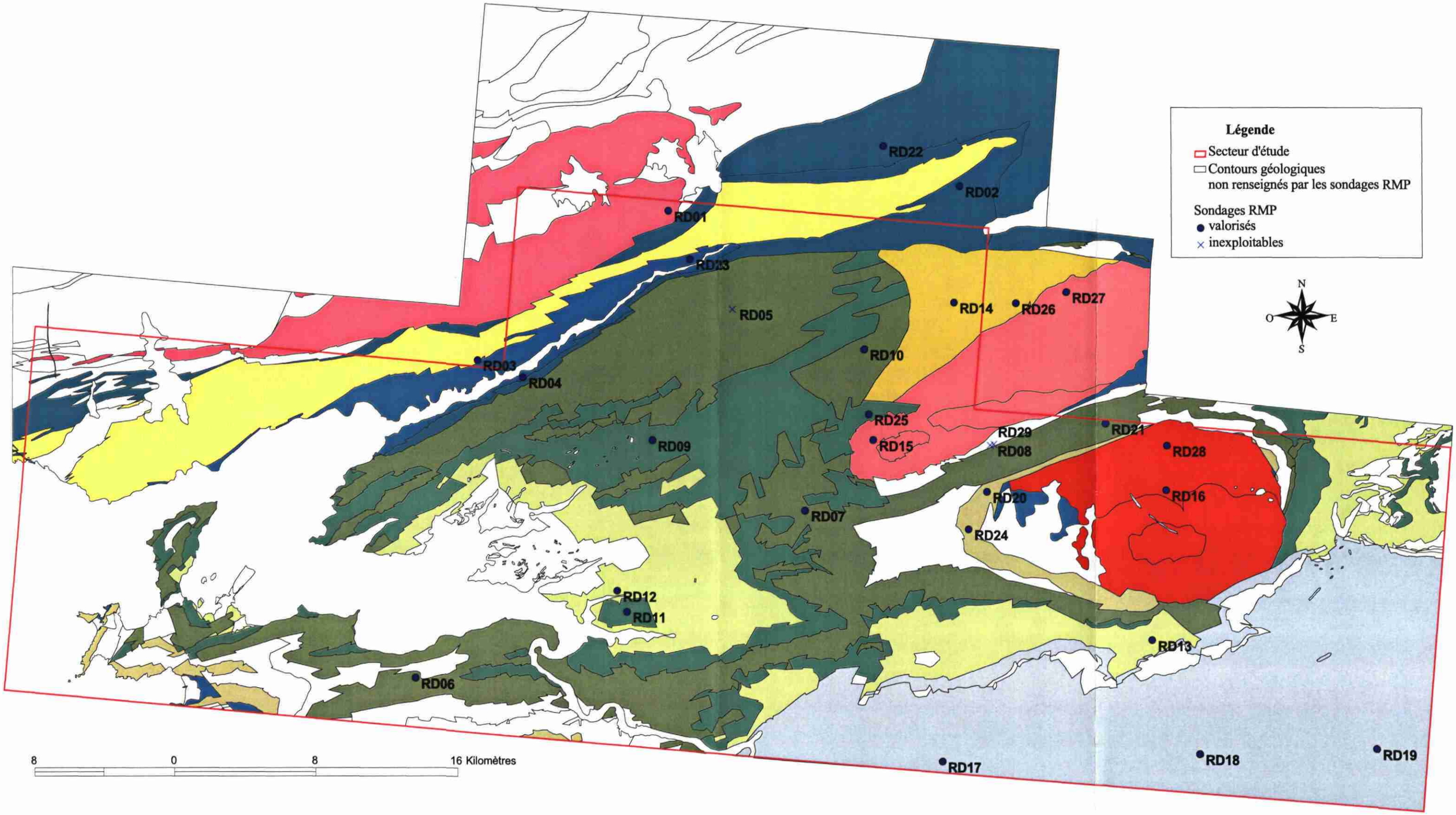


```
Site: RADE DE BREST RD28
Loop:  4 - 37.5      Date: 20.02.2003     Time: 12:51

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Rd28.inp
matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
loop: eight square, side = 37.5 m
geomagnetic field:
inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window =  178.4 ms
time constant = 15.00 ms
average S/N =   1.38;  EN/IN =   1.51
fitting error: FID1 =  26.85%;  FID2 =  35.16 %
param. of regular.: modeling
permeability constant  Cp = 7.00e-09
```

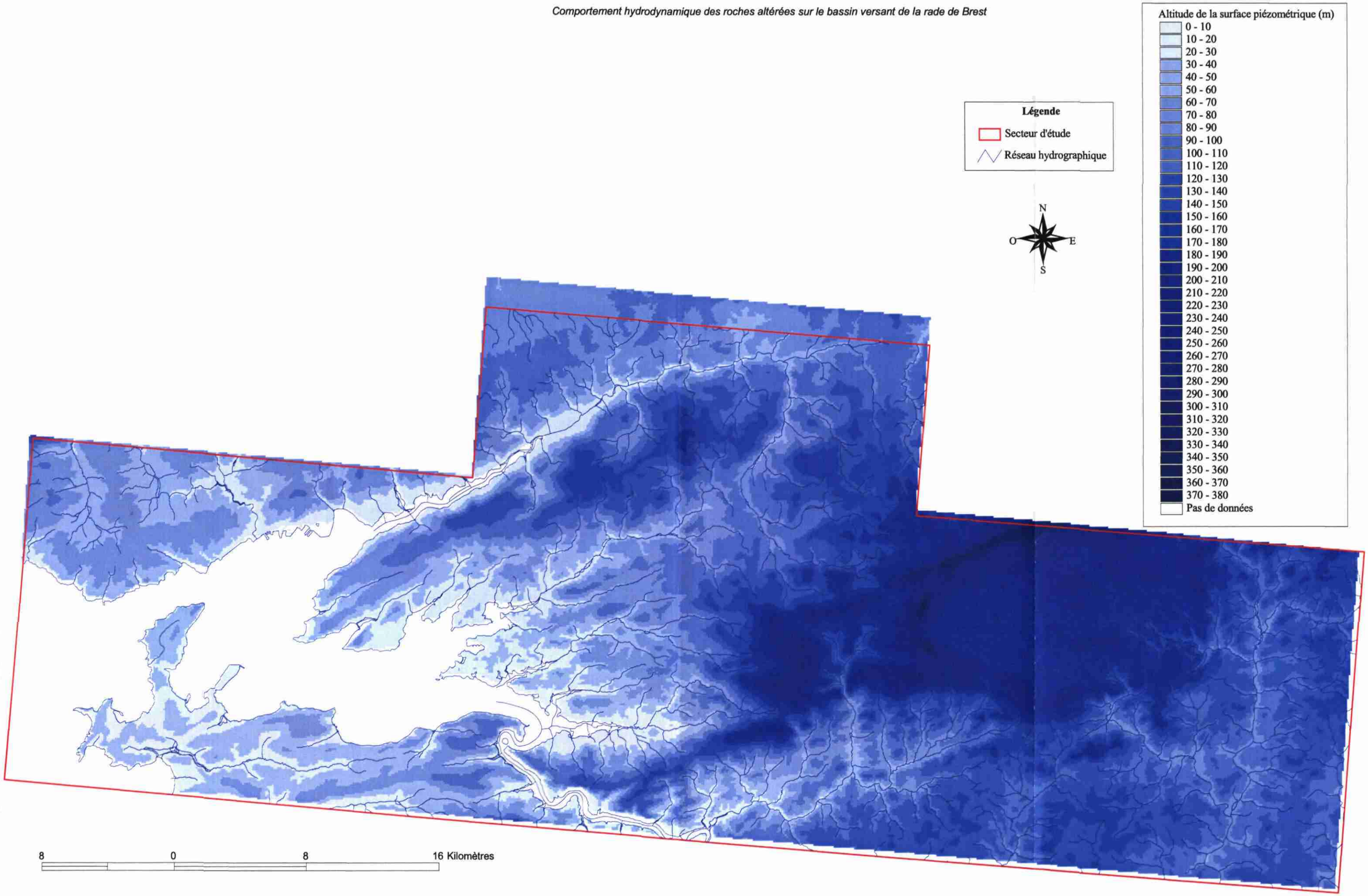


Annexe 2

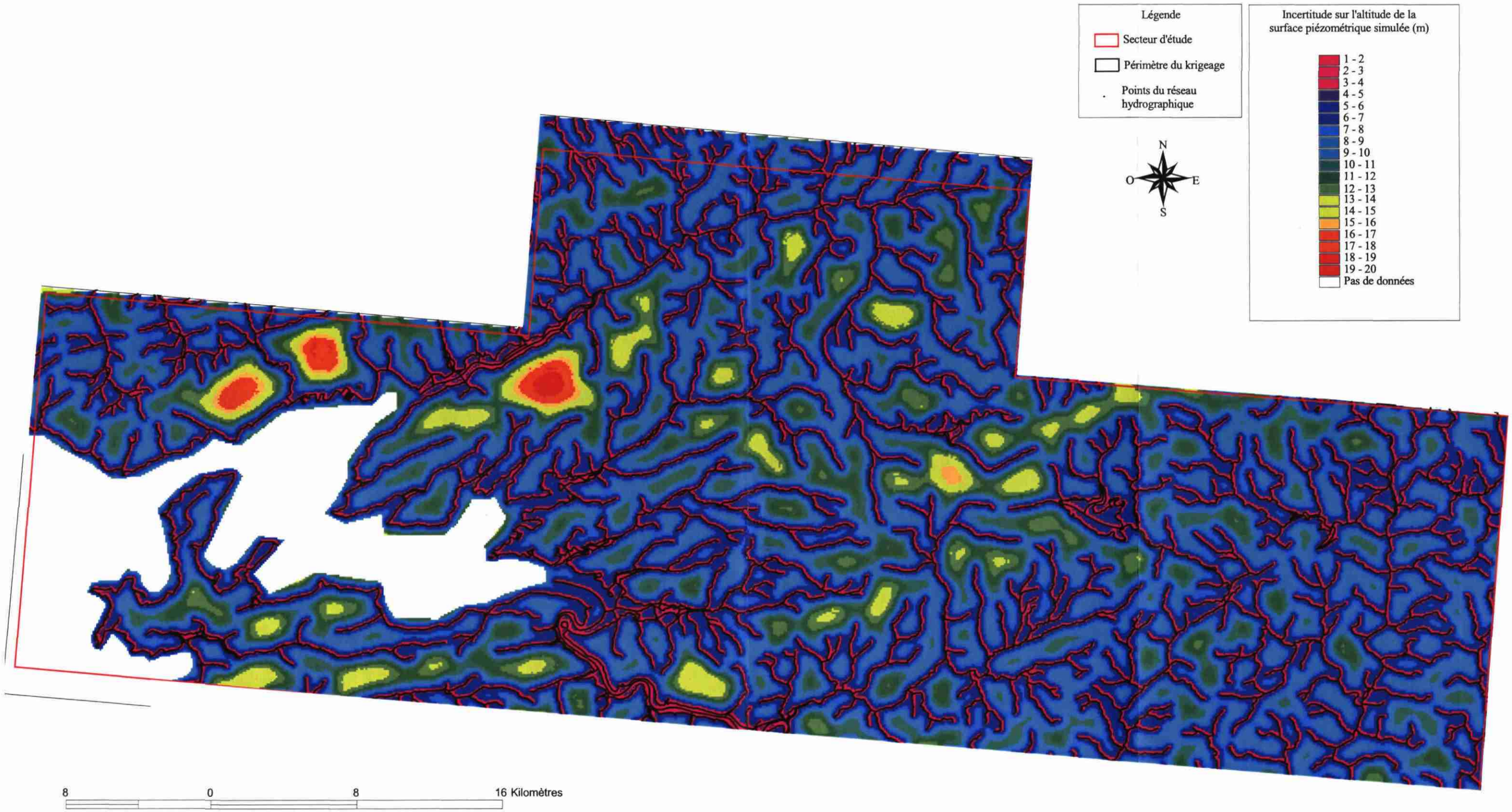
Planches A3



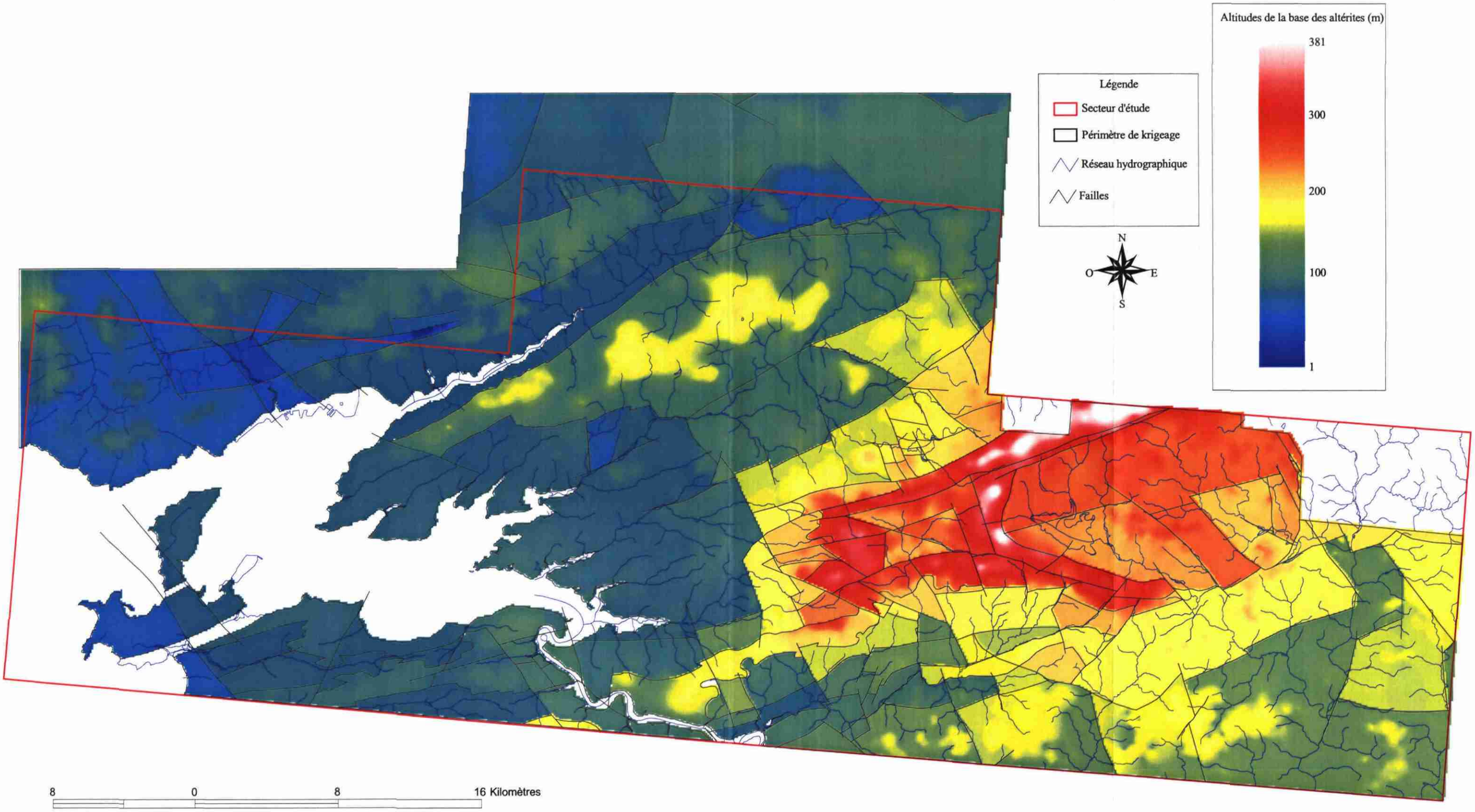
Pl. 1 - Géologie et implantation des sondages RMP



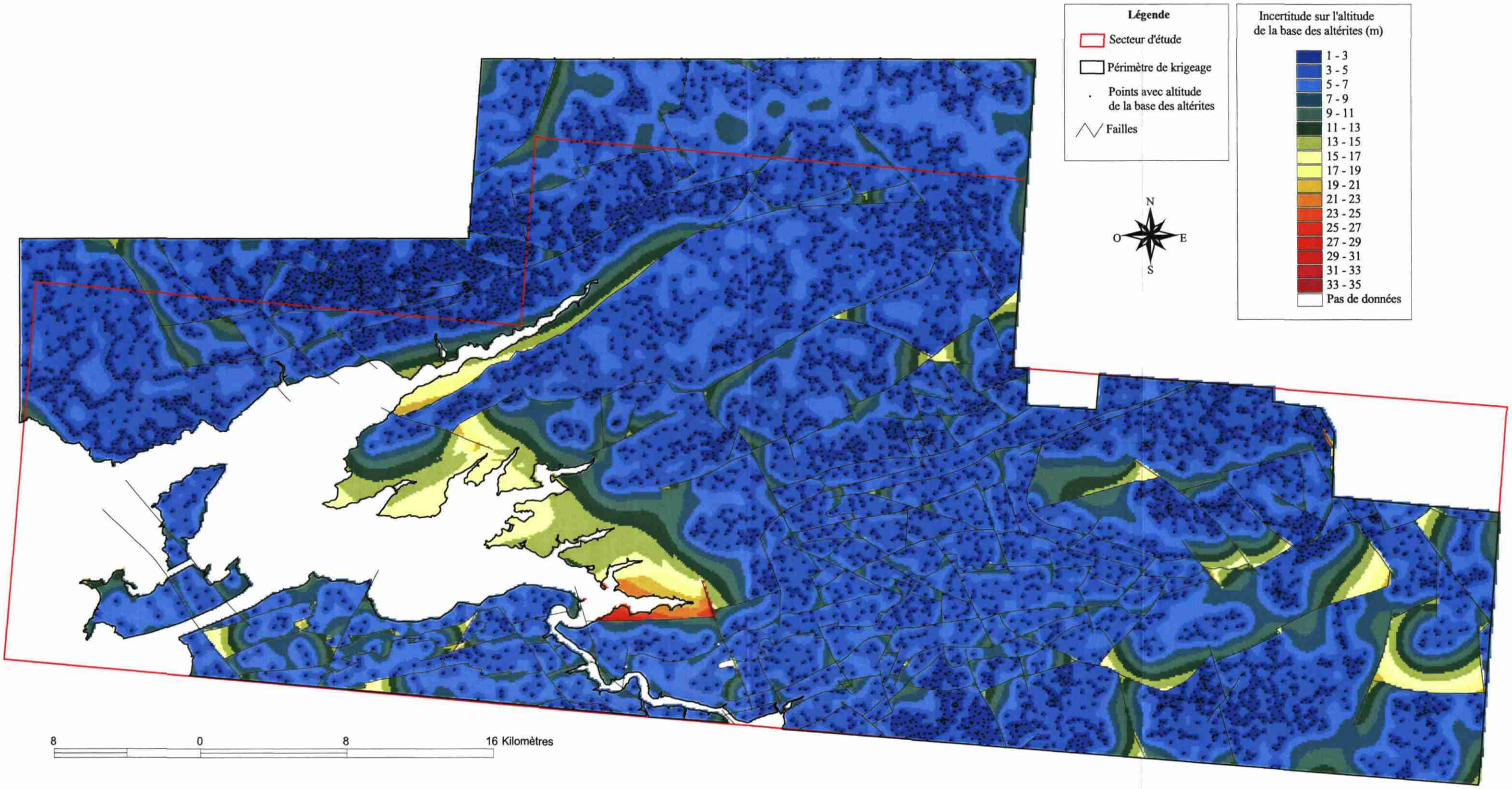
Pl. 2 - Altitude de la surface piézométrique



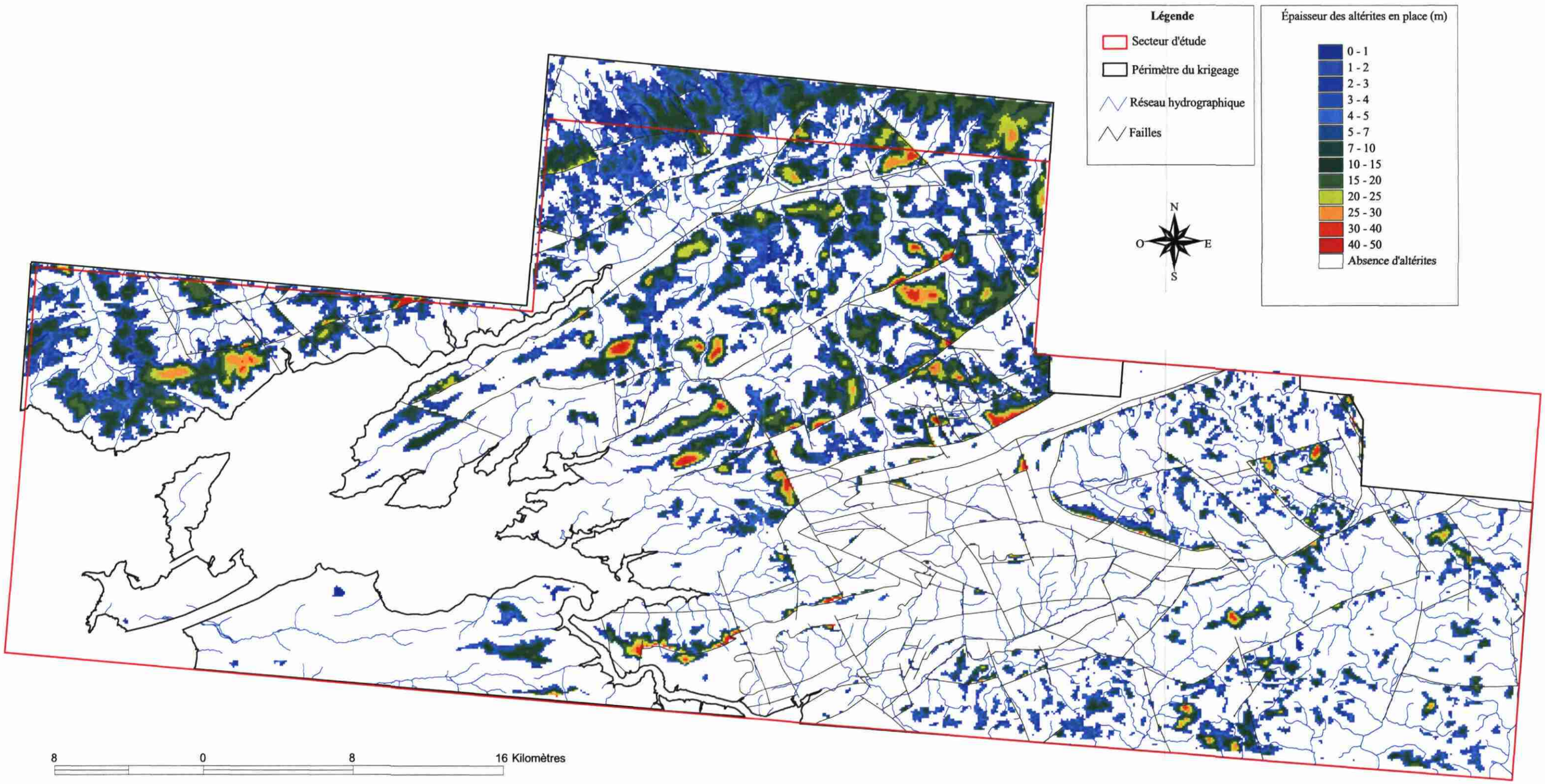
Pl. 3 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique



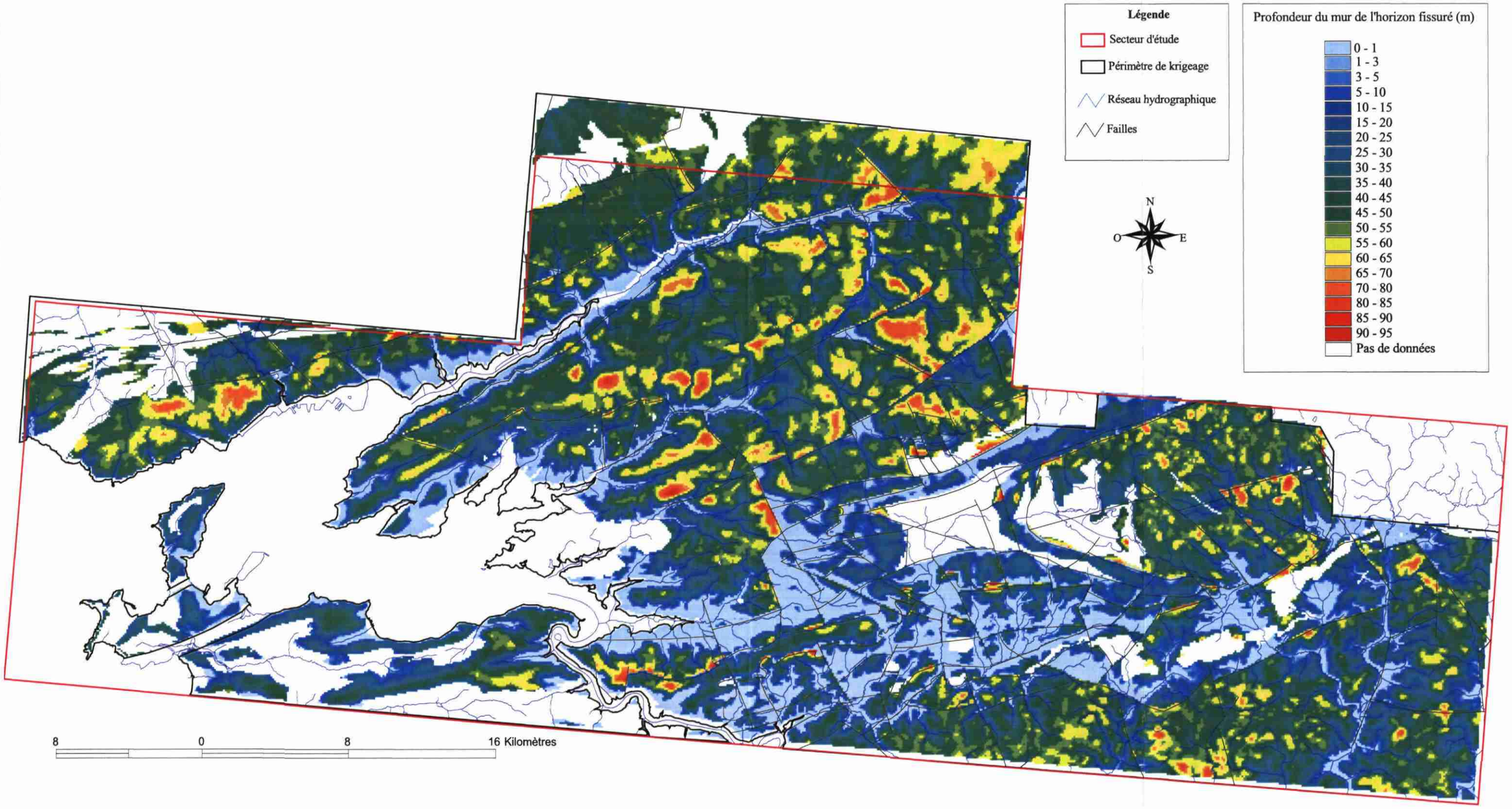
Pl. 4 - Altitude de la surface de base des altérites



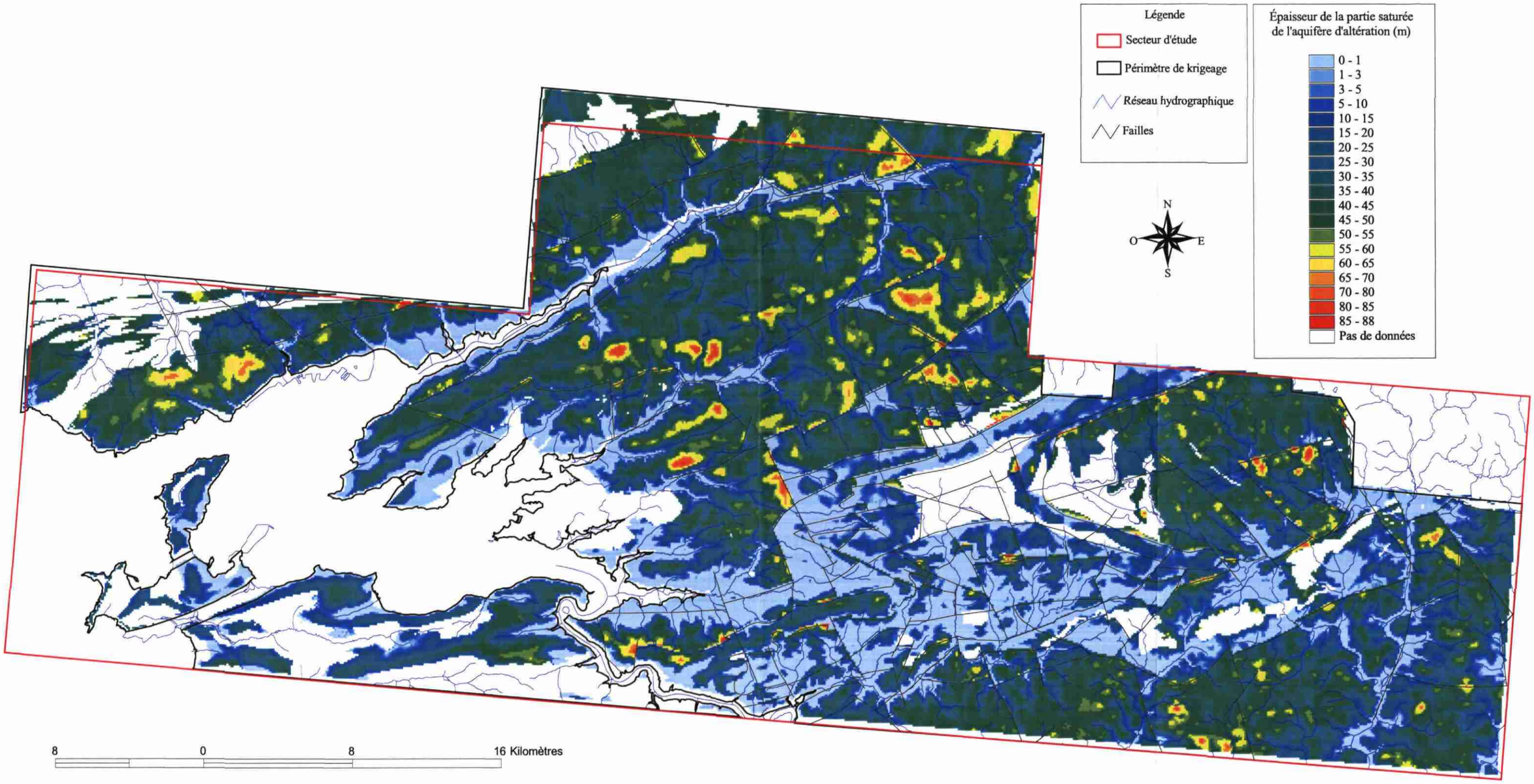
Pl. 5 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites



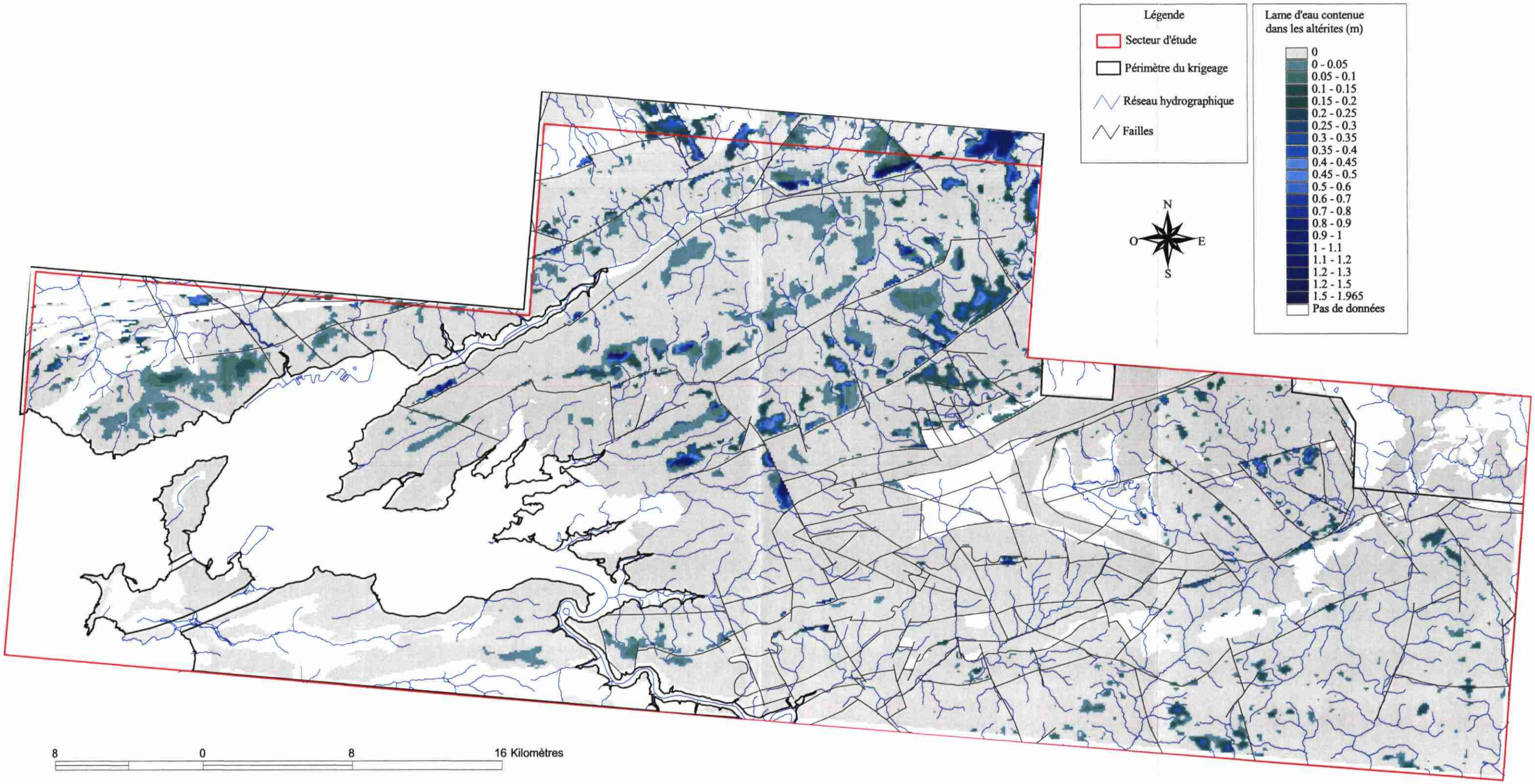
Pl. 6 - Epaisseur des altérites en place



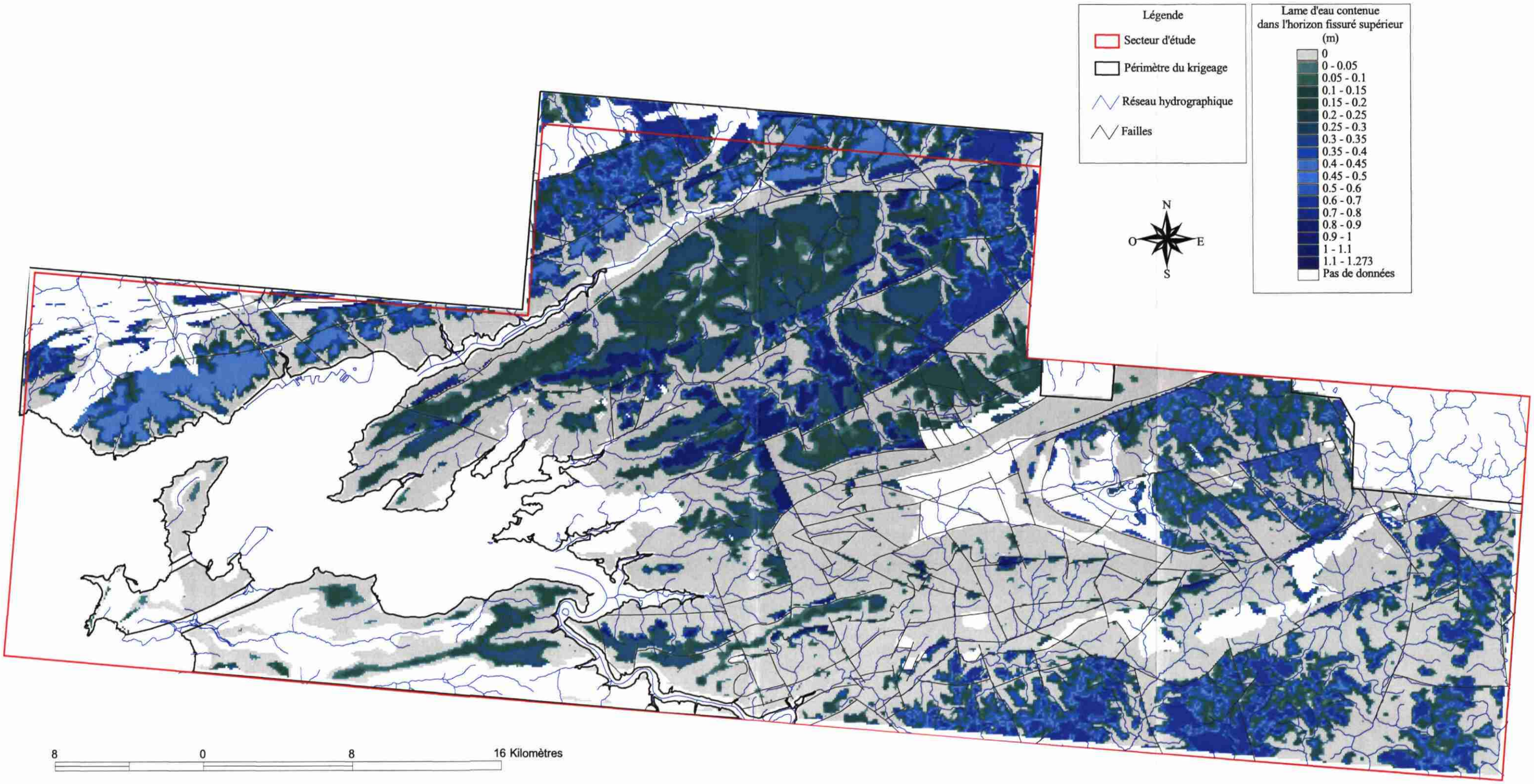
Pl. 7 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol



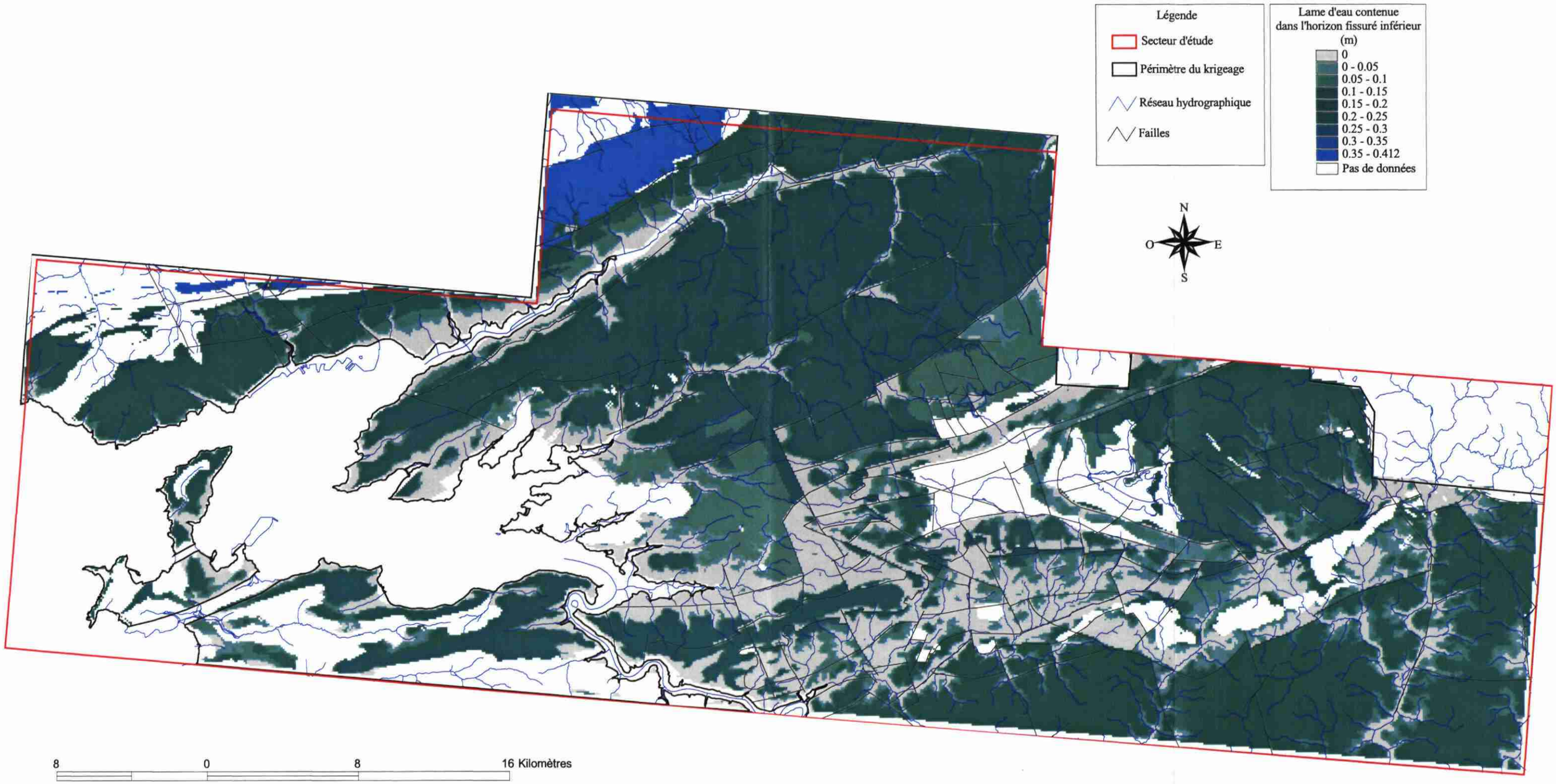
Pl. 8 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération



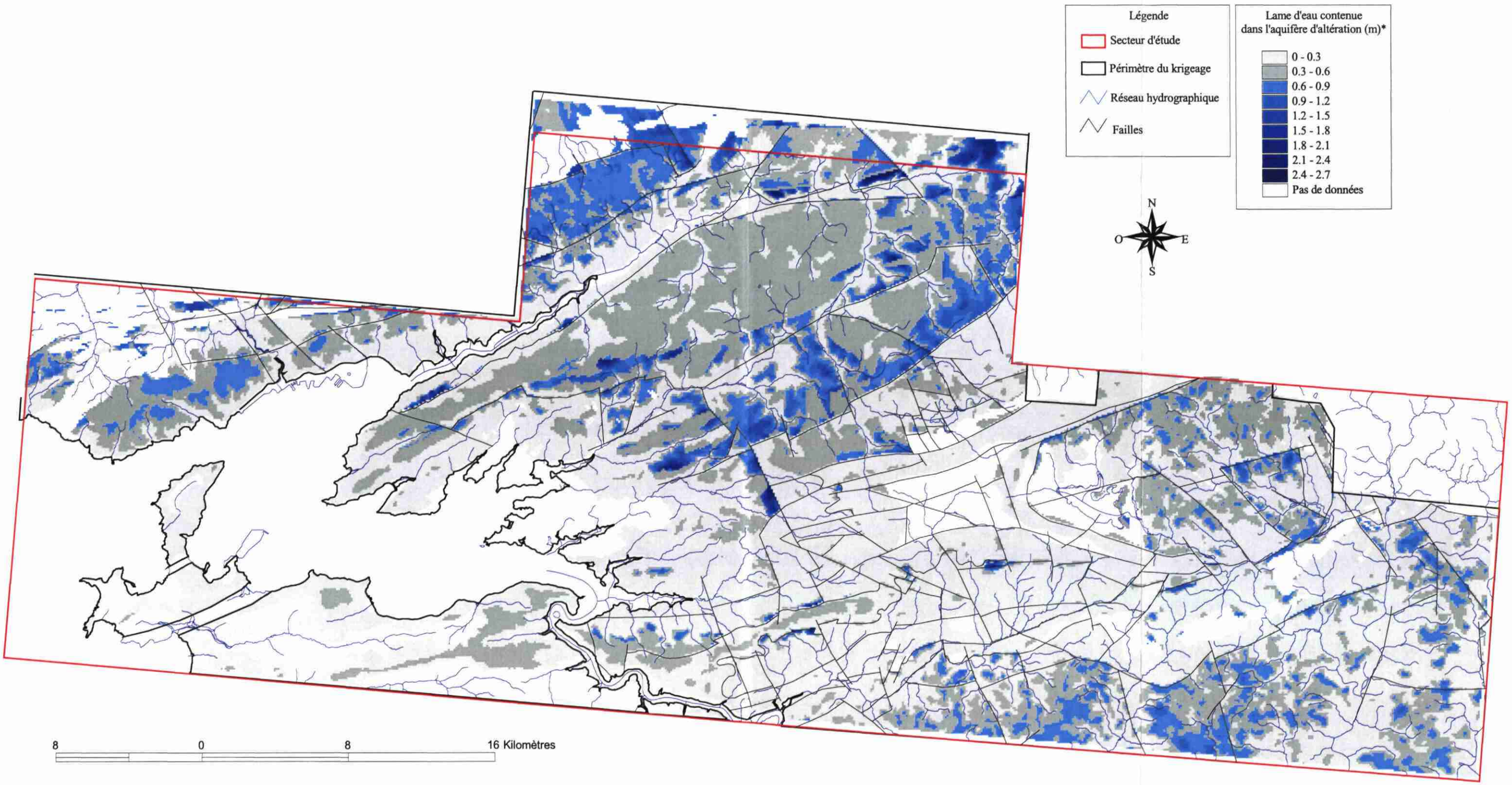
Pl. 9 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites



Pl. 10 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur

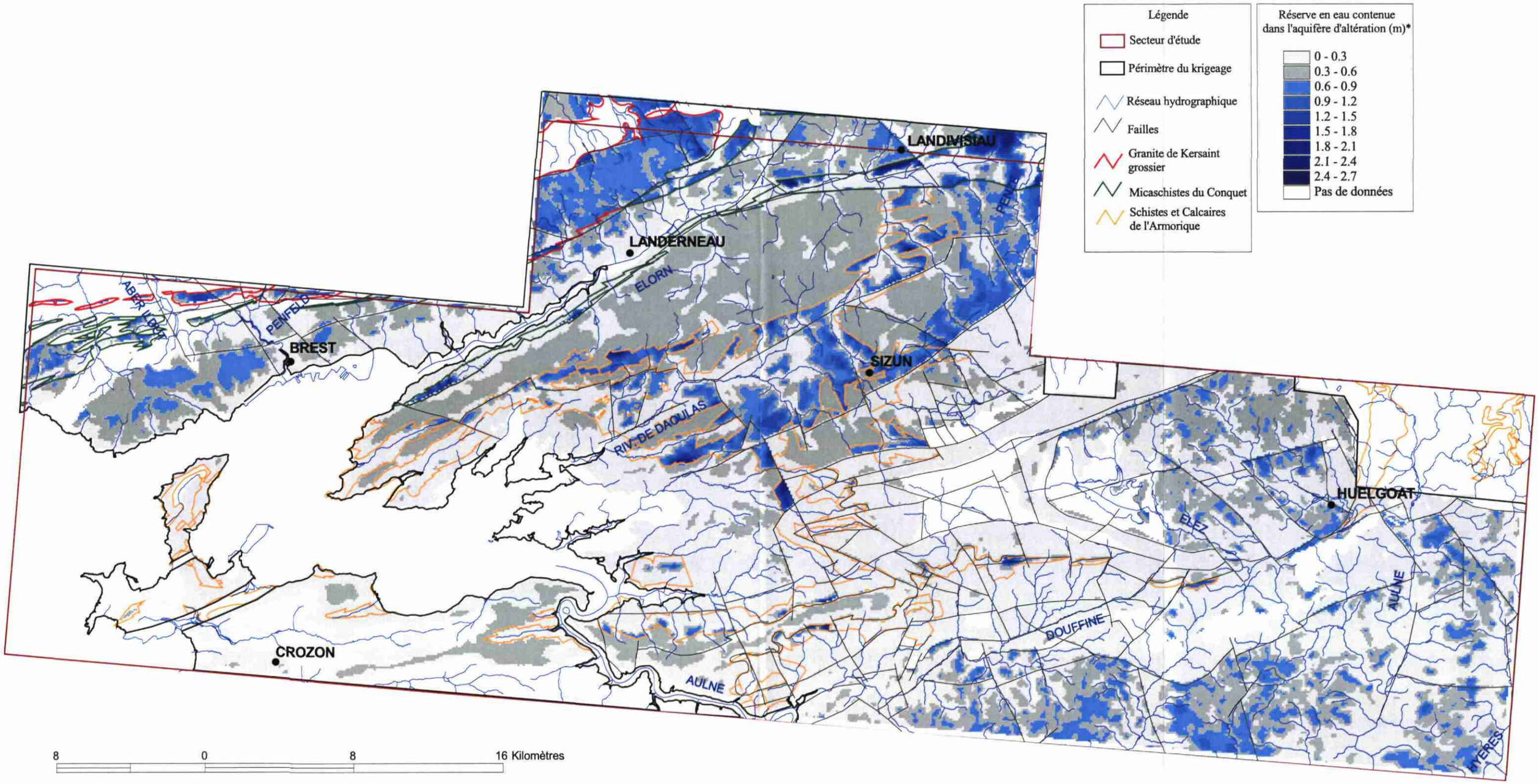


Pl. 11 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur



(*) La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 32,6 m et saturé sur 26,8 m en moyenne. Le calcul est réalisé sur les 50 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP.

Pl. 12 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération



(*) La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 32,6 m et saturé sur 26,8 m en moyenne. Le calcul est réalisé sur les 50 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP.

Pl. 13 - Répartition de la lame d'eau totale au sein des formations géologiques

Centre scientifique et technique

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.

BRGM/RP-52656-FR

Géosciences pour une Terre durable

brgm